



FKZ: 03EN2107A-C

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Aktueller Stand der Forschung und Entwicklung zur Hochtemperatur-Wärmepumpe in Deutschland

Technikanalyse im Rahmen von EE4InG2

Karlsruhe, Aachen, Bensheim

24. November 2025

Präambel

Das Begleitforschungsvorhaben EE4InG2 im Überblick

Projekthintergrund

Die **Energieforschungsförderung** orientiert sich an den energie- und klimapolitischen Zielen der Bundesregierung. Hauptziel ist dabei Klimaneutralität bis 2045 unter anderem durch höhere Energieeffizienz und den Ausbau erneuerbarer Energien. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) flankiert diese Ziele durch **Forschungsförderung der angewandten Energieforschung** im Rahmen des **Energieforschungsprogramms**. Ein Fokus liegt dabei auf der Energie- und Ressourceneffizienz in Industrie und Gewerbe. Das **Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe** fördert den Austausch von Experten in diesen Bereichen. Das BMWE prüft die Wirksamkeit des Energieforschungsprogramms und dessen zukünftige Entwicklung durch **Begleitforschung**. Die Begleitforschung dient schließlich als Instrument zur Bewertung und Weiterentwicklung der Forschungsförderung.

Projektziele

Das 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.

Projektpartner: IREES, IOB/RWTH Aachen, ETA-Solutions

Kontakt: projektleitungEE4InG2@irees.de

Projekthomepage: <https://ee4ing2.de/>

Projektpartner



IREES – Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien GmbH

Durlacher Allee 77
76131 Karlsruhe
Ansprechpartnerin:
Dr. Heike Brugger

Tel.: +49 721 9152636-0
E-Mail: h.brunner@irees.de



**RWTH Aachen University
Institut für
Industrieofenbau
und Wärmetechnik (IOB)**

Kopernikusstr. 10
52074 Aachen
Ansprechpartner:
Felix Kaiser

Tel.: +49 241 80 26068
E-Mail: kaiser@iob.rwth-aachen.de



ETA-Solutions GmbH

Darmstädter Str. 239
64625 Bensheim
Ansprechpartner:
Juliane Heydemann

Tel. +49 6251 82555 42
E-Mail: heydemann@eta-solutions.de

Hinweise

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben „EE4InG2 – Begleitforschung für Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe 2.0“ wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 03EN2107A-C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt ausschließlich bei den Autoren.

Vorschlag zur Zitation dieses Dokuments:

Decker, Alexandra; Lösch, Oliver; Maertens, Robert; Jochem, Eberhard (2025): Aktueller Stand der Forschung und Entwicklung zur Hochtemperatur-Wärmepumpe in Deutschland. Technikanalyse im Rahmen von EE4InG2. Hg. v. IREES GmbH, RWTH Aachen (IOB), ETA-Solutions GmbH. Karlsruhe, Aachen, Bensheim.

Korrespondenz an:

Dr. Robert Maertens, IREES GmbH, E-Mail: r.maertens@irees.de

Inhaltsverzeichnis

1	Executive Summary.....	5
2	Hintergrund, Zielsetzung und methodisches Vorgehen.....	7
3	Darstellung der Technik und möglicher Wettbewerber	9
3.1	Kurzbeschreibung der Hochtemperatur-Wärmepumpe.....	9
3.2	Reife und Entwicklung der Technik.....	10
3.3	Absehbare Anwendungsbereiche und weitere Potenziale	14
3.4	Konkurrenztechniken und ihre Auswirkungen auf die Anwendungspotenziale ..	17
3.5	Stand der Technik im internationalen FuE-Wettbewerb	20
3.6	Patent- und Publikationsanalysen.....	24
4	Relevanz in Forschung und Entwicklung	27
4.1	FuE in Deutschland und der EU.....	27
4.2	FuE im Rahmen des Energieforschungsprogramms	29
4.3	Verankerung der Technik im 8. Energieforschungsprogramm	33
5	Energiewirtschaftliche Bedeutung und weitere Effekte	34
6	Funktionalität des Innovationssystem in Deutschland.....	37
7	Erforderlicher FuE-Bedarf	40
7.1	FuE-Bedarf für Pilot- und Demonstrationsprojekte	40
7.2	Entwicklungsziele für FuE.....	42
8	Hemmnisse und fördernde Faktoren	44
8.1	Hemmnisse in der Einführung und einer schnellen Marktdiffusion	44
8.2	Ungenutzte fördernde Faktoren	48
9	Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	50
	Abkürzungen	51
	Abbildungsverzeichnis	53
	Tabellenverzeichnis.....	54
	Anhang.....	55
	Literaturverzeichnis	57

1 Executive Summary

Wenn es um die Elektrifizierung von Industrieprozessen geht, kann die Hochtemperatur-Wärmepumpe (HT-WP) heute in Temperaturbereichen bis 120 °C erfolgreich zum Einsatz kommen. Es wird erwartet, dass sich die WP-Techniken mit Senktemperaturen bis 160 °C bis 2026 im Markt etablieren und zeitnah in den darauffolgenden Jahren eine Weiterentwicklung bis 200 °C marktfähig wird (Zühlsdorf et al. 2023). Aufgrund ihrer bereits vergleichbaren Wirtschaftlichkeit zu fossilen Anlagen und ihrem hohen Effizienzpotenzial, werden sie absehbar zuerst in der Dampferzeugung sowie in den Papier-, Nahrungsmittel- und Chemieindustrien eingesetzt werden (Fraunhofer ISI 2024). Dabei befindet sich die Technik, nach dem Verlauf der Patentzahlen (eigene Analyse, siehe Kapitel 3.6) zu schließen, in der Phase des Aufstiegs innerhalb des Technikzyklus.

Auf den deutschen und europäischen Ebenen wurde die HT-WP bislang eher mit kleinen Fördermittelbeträgen von 100 bis 500 Tsd. € gefördert. Dabei zeichnet sich eine steigende Projektanzahl ab, insbesondere seit den 2010er Jahren. Im Energieforschungsprogramm (EFP) wurden seit dem Jahr 2000 insgesamt 14 Verbundprojekte zu HT-WP gefördert (eigene Analyse, siehe Kapitel 4.2). Dabei ist zu sehen, dass es bereits mit geringen Fördersummen zwischen 150-750 Tsd. € gelungen ist, eine spezifische Technik in die Anwendung zu überführen und die geförderten Hersteller neue Produktserien in den Markt bringen.

Andere Industrieländer sind ebenfalls stark in der Entwicklung von WP-Technologien vertreten und bauen ihren HT-Bereich aus. Insbesondere Japan, Norwegen und Frankreich zeigen starke Herstellerlandschaften. Bei den Patentanmeldungen sind vor allem die USA, China und Japan groß, während sich Deutschland auf Platz vier befindet. Somit ist auf globaler Ebene ein Wettbewerb zu erwarten. Dieser wird jedoch durch internationale Unterschiede in den Sicherheitsbestimmungen und Genehmigungsverfahren erschwert.

McKinsey¹ beziffern den industriellen WP-Markt für 2023 auf ca. 4 Mrd. USD an globalen Investitionen mit einer jährlichen Wachstumsrate von über 15 %, sodass der Markt bis zum Jahr 2030 je nach Szenario auf ca. 11-21 Mrd. USD wächst. Dabei machte Europa im Jahr 2023 etwa 22,5 % (0,9 Mrd. USD) aus und wird bis 2030 auf einen Anteil von etwa 18,5 % (ca. 2-4 Mrd. USD) schrumpfen. Gleichzeitig wird der Anteil Chinas von derzeit 0,3 Mrd. USD (7,5 %) auf 5-8 Mrd. USD (38-45 %) anwachsen. Dabei wird sich der Markt von kleineren Systemen bis 5 MW_{th} mit Temperaturen zwischen 80-100 °C zu größeren Systemen >5 MW_{th} und >100 °C bewegen.

Die Technologieentwicklung in den letzten 10 Jahren konnte weitere Anwendungs-, Effizienz- und Nutztemperaturbereiche erschließen. Mit den mittlerweile deutlich gestiegenen Energie- und CO₂-Zertifikatspreisen sollte die Wirtschaftlichkeit von WP ebenfalls angestiegen sein, während gleichzeitig der Nutztemperaturbereich >120 °C erschlossen wird und die

¹ <https://www.mckinsey.com/industries/industrials-and-electronics/our-insights/industrial-heat-pumps-five-considerations-for-future-growth> (zuletzt geprüft am 11.11.2025)

Tendenz auf 150 °C ansteigt. Somit wird das energiewirtschaftliche Potenzial von industriellen WP >100 °C im Jahr 2030 auf etwa 25 PJ geschätzt. (Hirzel 2017)

Das Innovationssystem der HT-WP ist bereits aufgebaut und aktiv, jedoch befindet es sich weiterhin in der Entwicklung, um zusätzliche Anwendungen zu erschließen. Dabei nimmt die Zahl der Hersteller und Anwender in Deutschland stetig zu. Gleichzeitig wachsen auch die Intermediäre und der Ordnungsrahmen mit, während Wissenschaft und Forschung kontinuierlich neue Temperaturbereiche erreichen.

Eine Lösung der existierenden Hemmnisse ist für die Anwendung und Marktdiffusion von HT-WP essenziell, wobei sich die technischen Herausforderungen vor allem auf den Verdichter, die Wahl des Kältemittels und die Auslegung bzw. das Design der WP konzentrieren. In der Anwendung treten interne infrastrukturelle Hemmnisse wie Platzmangel sowie Hygiene- und Sicherheitsstandards sowie externe Hemmnisse beim Ausbau der Netzanschlüsse auf. Zudem wird die Diffusion der HT-WP durch größere Wissenslücken und fehlende Erfahrungen gebremst, da es derzeit nur wenige Entscheidungsträger und technische Fachkräfte gibt, die kombiniertes Wissen sowohl zur HT-WP als auch zur spezifischen Anwendung besitzen.

Für den erfolgreichen Markteintritt und die Diffusion von HT-WP sind weiterhin erhebliche Kostensenkungen durch Skaleneffekte erforderlich. Die Kosten der Wärmebereitstellung von WP im Vergleich zu konventionellen Anlagen sind zum Teil bereits wirtschaftlich vergleichbar, an anderen Stellen durch ein ungünstiges Strom- zu Gaspreisverhältnis noch unwirtschaftlich. (Agora Industrie und FutureCamp 2022)

Verschiedene Industriezweige sind in ihren Hemmnissen sehr unterschiedlich, vor allem in ihrer Struktur und ihren Betriebskosten. Aufgrund der möglichen Anwendungsbreite bleibt eine gezielte Technikförderung der HT-WP jedoch weiterhin vielversprechend. Bei Querschnittstechnologien wie der HT-WP gilt, ihre Diffusion in weiteren Branchen voranzubringen, um somit wiederum eine stärkere Marktdiffusion zu erreichen.

2 Hintergrund, Zielsetzung und methodisches Vorgehen

Im Rahmen von EE4InG2 wird eine große Spannbreite an Techniken betrachtet, die branchenspezifisch sein können oder Querschnittstechnologien darstellen. Daher ist die Methodik breit aufgestellt, sodass je nach Technikart verschiedene Kriterien und Analyseaspekte ausgewählt werden können. Die Inhalte der Technikanalyse sind in Abbildung 1 zusammengefasst.

Die zu analysierende Technik wird aus einem erstellten Technikportfolio in einem zweistufigen Auswahlprozess über Kriterien zu folgenden Hauptaspekten identifiziert: Energiewirtschaftliche Relevanz (Energiebedarf und Einsparpotenzial heute bzw. in Zukunft), Relevanz in FuE (EFP-Missionen/Ziele, FuE-Projekte/Publicationen) und Technology Readiness Level (TRL). Weitere Aspekte können Szenarienabhängigkeit, Anwendungsfelder, Produktionsperspektiven und Hemmnisse verschiedener Art sein. So sollen Effizienz-Techniken ausgewählt werden, die ein vielversprechendes Potenzial an Energieeffizienz aufweisen und eine deutliche Verknüpfung zum 8. Energieforschungsprogramm (EFP) aufweisen. Die Ergebnisse des Auswahlprozesses (Vorauswahl) fließen in die Ausarbeitung der Technikanalyse ein.

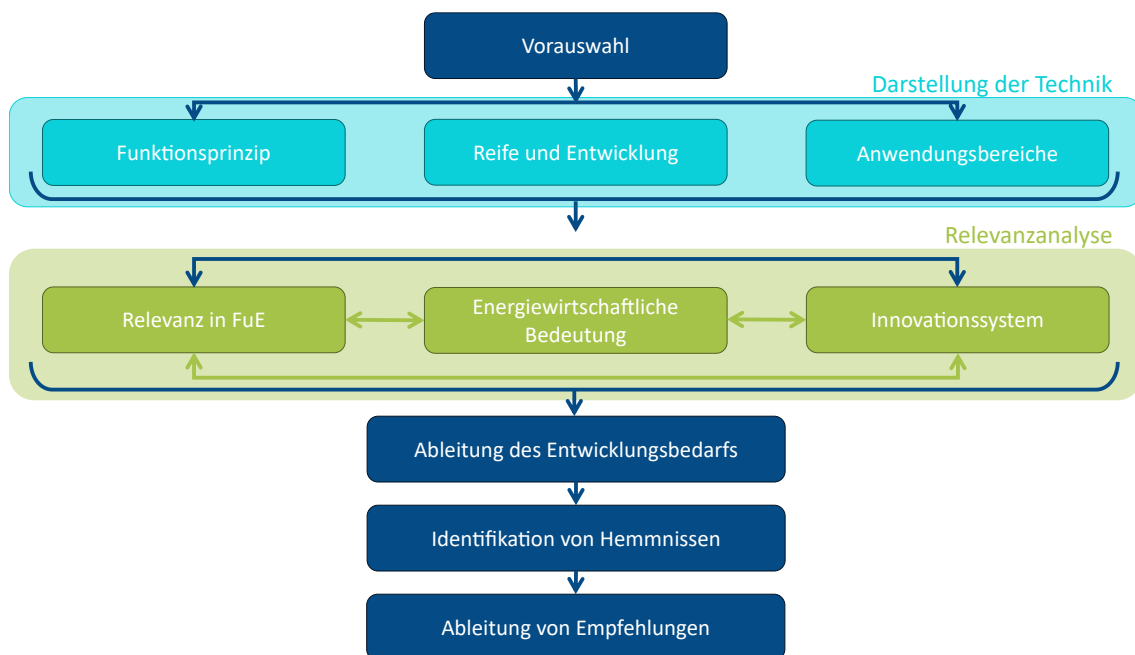


Abbildung 1: Übersicht der Methodik der Technikanalysen, angelehnt an die EDUAR&D-Methode

Quelle: eigene Darstellung

In der Darstellung der Technik wird nach einer Kurzbeschreibung zu Funktionsprinzip und wichtigen Parametern, die Reife und Entwicklung der Technik thematisiert sowie absehbare Anwendungsbereiche aufgezeigt. Optional können der internationale FuE-Wettbewerb, mögliche Konkurrenztechniken und die Abhängigkeit der Technik von unterschiedlichen Szenarien aufgezeigt werden. Dieses Kapitel dient sowohl als Einstieg und Übersicht zu der ausgewählten Effizienz-Technik, als auch als Grundlage für die weiteren Analyseaspekte.

Zentraler Teil der Technikanalyse ist die dreigliedrige Relevanzanalyse, in der die Forschung und Entwicklung der Technik, ihre energiewirtschaftliche Bedeutung sowie ihr Innovationssystem dargestellt werden. In der FuE-Relevanzanalyse der Technik wird die bisherige FuE in Deutschland und speziell im Rahmen des EFP betrachtet sowie die Verankerung der Technik im aktuellen 8. EFP des BMWF aufgezeigt. Damit soll erarbeitet werden, wie die Technik in der Vergangenheit im deutschen FuE-System verortet wurde und sich im aktuellen Forschungsprogramm wiederfindet. Für die energiewirtschaftliche Bedeutung werden der betroffene Endenergiebedarf in Deutschland sowie Energieeffizienz- und Energieeinsparpotenziale der betrachteten Technik ausgearbeitet. Dafür werden theoretische, technische, wirtschaftliche und marktwirtschaftliche Energieeffizienz-Potenziale der Techniken betrachtet. Der Fokus der Potenzialermittlung liegt im Rahmen der Technikanalysen auf dem Status Quo; in weiteren Aktivitäten im Projekt wird die Entwicklung künftiger Energiesystem-Szenarien, die eine perspektivische Fortschreibung der technikspezifischen Potenziale zugrunde legen, verfolgt. Mit der Aufstellung des Innovationssystems sollen die wichtigsten Akteure zur Entwicklung und Diffusion der Technik dargestellt werden. Dabei spielen wissenschaftliche Einrichtungen, Hersteller, Anwender und Intermediäre eine Rolle. Zudem können Lücken und Bedarfe im System aufgezeigt werden.

Mit der Relevanzanalyse soll die Brücke zwischen der FuE-Landschaft, den energiewirtschaftlichen Potenzialen und dem Innovationssystem geschlagen werden, um den aktuellen Stand der Technik festzuhalten und ihre Bedeutung in der Energie(forschungs)landschaft aufzuzeigen. Sowohl in der Technikdarstellung als auch in der Relevanzanalyse können Patent- und Publikationsanalysen einfließen, die den internationalen FuE-Wettbewerb und das Innovationssystem konkretisieren.

Die Analyse schließt mit der Ableitung des Entwicklungsbedarfs der Technik und möglicher Entwicklungsziele, sowie der Identifikation von technischen und ökonomischen Hemmnissen aus den vorherigen Analyseschritten. Hieraus werden dann wiederum Handlungsempfehlungen abgeleitet, insbesondere für die zukünftige Energieforschung des Bundes.

Die genutzte Methodik ist angelehnt an EDUAR&D, kurz für „Energiedaten und -analyse R&D“, ein strukturierter Such- und Analyseprozess, der verschiedenste methodische Ansätze zur Darstellung, Analyse und Bewertung der Techniken miteinander verbindet (Jochem 2009; Schäfer et al. 2021). Dabei muss nicht zwangsläufig jede Technikanalyse das gesamte Tableau der zur Verfügung stehenden Optionen nutzen. Dies ist teilweise abhängig von den zur Verfügung stehenden Informationsquellen. Im Rahmen des Vorhabens EE4InG2 dienen die Technikanalysen auch als Input für Fachgespräche mit Expert*innen und werden in Folge dieser Gespräche nach Bedarf angepasst.

Definition des Untersuchungsrahmen der Technikanalyse: Hochtemperatur-Wärmepumpe

Die untersuchte Technik ist nach der Definition der Internationalen Energieagentur (IEA) die Hochtemperatur-Wärmepumpe (HT-WP), die einen Teil ihrer nutzbaren Energie (Exergie) bei Vorlauftemperaturen über 100 °C abgibt. Zudem soll die Anwendung im industriellen Bereich liegen, sodass höhere Kapazitäten gefragt sind (derzeit ab 200 kW bis ca. 10 MW).

3 Darstellung der Technik und möglicher Wettbewerber

3.1 Kurzbeschreibung der Hochtemperatur-Wärmepumpe

Industrielle Wärmepumpen (WP) nutzen Abwärmeströme als Wärmequellen und heben diese auf nutzbare Prozesswärmemetemperaturen an, sodass die Wärme in denselben oder in andere Prozesse am Standort oder auch in Wärmenetze (Wärmesenke) zurückfließen kann. Für den Temperaturhub (Differenz zwischen Senktemperatur und Quelltemperatur) wird hochwertige Exergie benötigt, wie Strom oder Wärme auf noch höheren Temperaturniveaus. Dabei wird der Coefficient of Performance (COP) als Effizienzkennwert genutzt, der das Verhältnis aus abgegebener Wärme zu aufgewandter Energie (Strom) bildet. Der COP ist abhängig von der Quelltemperatur (z.B. des Abwärmestroms), Temperaturhub und Kältemittel.

An der Wärmequelle (Prozessabwärme) geht das Kältemittel in einem Verdampfer mithilfe der thermischen Energie der Abwärme in einen gasförmigen Zustand über. Danach komprimiert ein Verdichter das gasförmige Kältemittel, sodass sich sein Druck und seine Temperatur erhöhen. An der Wärmesenke kondensiert das gasförmige Kältemittel in einem Kondensator und gibt dabei thermische Energie an die Wärmesenke ab. Zum Schluss wird das Kältemittel durch ein Expansionsventil auf sein ursprüngliches Druckprofil zurückgeführt und durchläuft erneut den Kreisprozess. (GZB 2017)

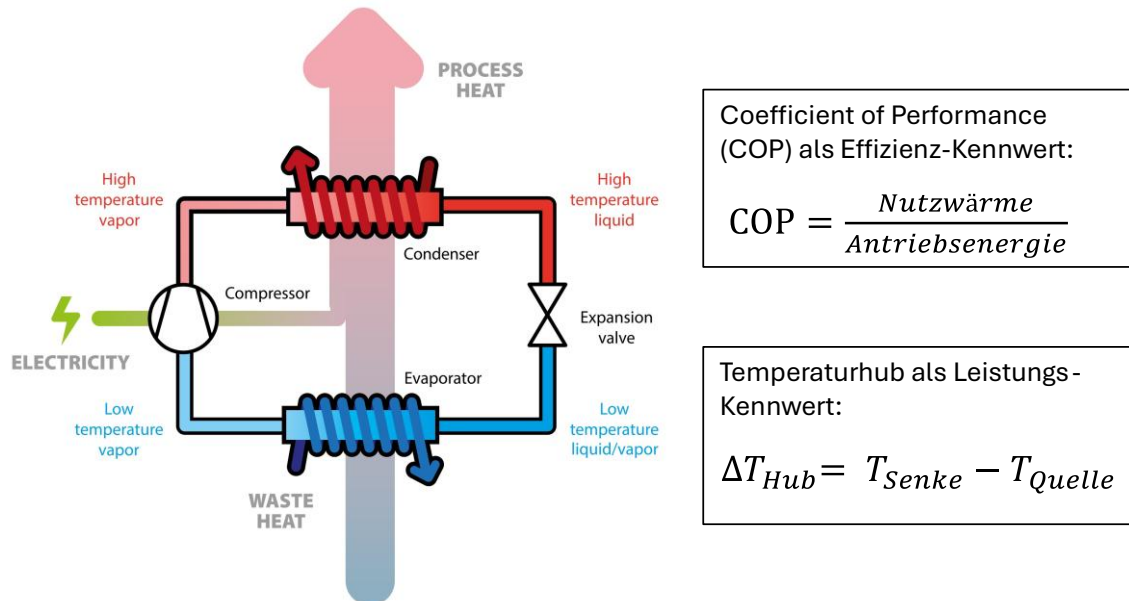


Abbildung 2: Komponenten einer Kompressions-Wärmepumpe und ihr Wärmekreislauf

Quelle: eigene Darstellung, IREES, mit linker Grafik von (Sintef 2020)

Die wichtigsten Komponenten einer WP sind der Verdichter und das im Kreis geführte Kältemittel. Beim Verdichter wird zwischen mechanischen und thermischen Bauarten unterschieden, sodass der Verdichter oft namensgebend für den WP-Typ ist. Eine Kompressions-WP (siehe Abbildung 2) führt das Kältemittel in einem geschlossenen Kreisprozess und nutzt mechanische Energie für den Verdichter, die über elektrische oder thermische Motoren

bereitgestellt wird. Die Sorptions-WP nutzt stattdessen eine zusätzliche Wärmequelle auf höherem Niveau als thermische Antriebsenergie, diese kann ebenfalls aus Abwärme oder durch Zufuehrung bereitgestellt werden. Die Wärmeübertragung des gasförmigen Kältemittels im Sorptionsprozess geschieht entweder durch seine Absorption in einer zusätzlichen Flüssigkeit oder durch seine Adsorption an einen Feststoff. Brödenverdichter-WP funktionieren wie Kompressions-WP, jedoch mit offenem Kreisprozess, in dem das im Kreis geföhrte Kältemittel identisch zum Medium der Wärmequelle ist, sodass letzteres als Gas vorliegen muss (z.B. in Form von Wasserdampf), welches dann thermisch oder mechanisch verdichtet werden kann. (Wolf et al. 2012)

Von diesen generalisierten Bautypen gibt es zudem mehrstufige und hybride Versionen, sowie Sonderformen wie beispielsweise Rotations-WP, die den Druck des Kältemittels durch Zentrifugalkräfte verändern, oder auch chemische WP, die reversible chemische Reaktionen für die Wärmeübertragung nutzen. Im Hochtemperaturbereich sind vor allem die mechanische Verdichter-Bauarten Kolben-, Schrauben- und Turboverdichter vertreten. Bei Brödenverdichter-WP sind neben mechanischen Verdichtern auch thermische Dampfstrahlverdichter möglich. (Hirzel 2017)

Bei der Wahl des Kältemittels sind technische, wirtschaftliche sowie sicherheits- und umwelttechnische Einschränkungen zu beachten. Bislang wurden häufig synthetische Hydrofluorolefine² (HFO) eingesetzt, wobei der Trend zu HFO mit niedrigem Treibhauspotenzial geht (GWP < 10), und verstärkt zu natürlichen Kältemitteln wie Wasser/Dampf (R718), Ammoniak (R717), CO₂ (R744) sowie Butan (R600) und Pentan (R601) (Arpagaus 2019). Ungefähr 85 % der neuen HT-WPs in Europa, USA, Kanada, Japan, China und Südkorea sind auf natürliche Kältemittel ausgelegt (Zühlsdorf et al. 2024b).

Die Internationale Energieagentur (IEA) definiert Hochtemperatur-Wärmepumpen (HT-WP) dadurch, dass sie einen Teil ihrer nutzbaren Energie (Exergie) bei Vorlauftemperaturen >100 °C abgeben. Eine Wärmepumpe für die Erwärmung von Wasser von 70 °C auf 110 °C, zählt demnach zu den HT-WP. Industrielle WP werden meist mit einer Heizleistung von mehr als 100 kW eingesetzt. (Zühlsdorf et al. 2023)

3.2 Reife und Entwicklung der Technik

Der Annex 58 des TCP *Heat Pumping Technologies* (HPT) der IEA schätzt die Entwicklung des Technologie-Reifegrads (TRL) der HT-WP differenziert nach Temperatur der Wärmesenke und Heizleistung ein (siehe Abbildung 3). Demnach sind derzeit bereits HT-WP bis 120 °C zwischen 0,2-10 MW bei mehreren Herstellern verfügbar, werden aber voraussichtlich erst in den kommenden Jahren eine breitere Anwendung erfahren. Für den Temperaturbereich

² HFO (= Hydrofluorolefine) gelten als umweltschonende Alternativen zu klassischen Kühlmitteln aus Fluorkohlenwasserstoffen (FKW). FKW haben ein Treibhauspotenzial (GWP) von bis zu 14.800 und wirken zudem ozonschädigend, während das GWP von HFO nur 0,1 % im Vergleich zu FKW beträgt. Jedoch können Verluste während des Produktionsprozesses über halogenierte Kohlenwasserstoffe zu klimaschädlichen Wirkungen föhren.

120 °C bis 160 °C wird derzeit die Entwicklung vieler Prototypen und ihr Einsatz in diversen Branchen in größeren Demonstrationen abgeschlossen und zu marktreifen Technologien weiterentwickelt, oft im Rahmen von geförderten FuE-Projekten. Durch den großen Bedarf an Dekarbonisierungsoptionen für die Prozesswärme und der Schlüsselrolle von HT-WP im unteren bis mittleren Temperaturbereich wurde ihre Entwicklung durch den Marktdruck in den letzten Jahren beschleunigt, sodass HT-WP bis 160 °C in den Jahren 2025-2026 kommerziell verfügbar werden. Im Bereich über 160 °C³ ist die Entwicklung ähnlich, jedoch mit deutlich geringerer Anzahl an Projekten in der Forschung und Entwicklung (FuE), sodass sich ihr Markteintritt laut IEA auf die Jahre 2026-2028 verschiebt. (Zühlsdorf et al. 2023)

Heating Capacity	Temperature	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	
200 kW to 10 MW	< 120 °C	Prototypes available 🔍		Demonstrators available 🏭		Commercial roll-out 📊		Established as preferred technology 🏆					
		Prototype developments		Technology advancement, upscaling		Optimization of efficiency, cost, ...		Standardization, further improvements and novel applications					
		Test and demonstration of prototypes		Full-scale demonstrations in industrial environment		Commercial deployment of systems							
	120-160 °C		Prototypes available 🔍		Demonstrators available 🏭		Commercial roll-out 📊		Established as preferred technology 🏆				
		Prototype developments		Technology advancement, upscaling		Optimization of efficiency, cost, ...		Standardization, further improvements and novel applications					
		Test and demonstration of prototypes		Full-scale demonstrations in industrial environment		Commercial deployment of systems							
	> 160 °C			Prototypes available 🔍		Demonstrators available 🏭		Commercial roll-out 📊		Established as preferred technology 🏆			
		Prototype developments		Technology advancement, upscaling		Optimization of efficiency, cost, ...		Standardization, further improvements and novel applications					
		Test and demonstration of prototypes		Full-scale demonstrations in industrial environment		Commercial deployment of systems							
>10 MW	< 120 °C	Technology transfer & commercial project sales 🔄		Demonstrators available 🏭		Established as preferred technology 🏆							
		Technology transfer to HP applications		Technology advancement, upscaling		Optimization of efficiency, cost, ...		Standardization, further improvements and novel applications					
		Integration studies with end-users		Full-scale demonstrations in industrial environment		Commercial deployment of systems							
	> 120 °C			Technology transfer & commercial project sales 🔄		Demonstrators available 🏭		Established as preferred technology 🏆					
		Technology transfer to HP applications		Technology advancement, upscaling		Optimization of efficiency, cost, ...		Standardization, further improvements and novel applications					
		Integration studies with end-users		Full-scale demonstrations in industrial environment		Commercial deployment of systems							

Abbildung 3: Entwicklung der Temperatur- und Leistungsbereiche der HT-Wärmepumpe bis 2030

Quelle: (Zühlsdorf et al. 2023)

Bei größeren Leistungen über 10 MW könnten bereits ab dem Jahr 2025 einige Anlagen bis 120 °C in den Markt kommen, während sie sich bei über 120 °C noch in der Entwicklung befinden und erste große Demonstrationsprojekte danach erwartet werden. Bis zum Jahr 2030 werden HT-WP vermutlich in allen genannten Temperatur- und Leistungsbereichen die bevorzugte Technologie werden. (Zühlsdorf et al. 2023)

Somit ergibt sich laut Annex 58 folgende TRL-Entwicklung:

³ Der Annex erwähnt in Bezug auf die Entwicklung leider keinen genaueren Temperaturbereich über 160 °C. Es ist abzuschätzen, dass sich die erwähnte Entwicklung auf den Bereich zwischen 160 °C bis 200

°C bezieht und vor allem Dampfanwendungen, da diese bei den im Annex untersuchten Herstellern die höchsten Senkentemperaturen erreichen.

TRL 8: Demonstration von 25 großtechnischen (1-10 MW) industriellen Wärmepumpen mit 100 °C bis 150 °C

TRL 6-7: Bis zu 5 Demonstrationsprojekte im Pilotmaßstab (mit ± 100 kW) zur Wärmeversorgung >150 °C

TRL 3-5: Entwicklung von 3 Technologien im Labormaßstab (1-10 kW) mit >200 °C

Der Task 1 des Annex 58 des IEA TCP HPT gibt eine gute Übersicht über verschiedene Hersteller in den im Annex partizipierenden Ländern. Alle heutigen oder absehbaren Hersteller der Effizienztechnik haben ihre Technik mindestens im Pilotmaßstab erprobt, manche Weiterentwicklungen zu höheren Temperaturen und/oder Leistungen laufen derzeit im Demonstrationsmaßstab. Im Bericht zum Task 1 und auf der aktuelleren Webseite des Annexes werden über 30 Hersteller aufgezählt, davon sind die sechs in Deutschland sitzenden Hersteller und die zugehörigen technischen Rahmendaten ihres FuE-Stands in Tabelle 1 aufgeführt. Die Hersteller ENGIE, GEA Refrigeration Germany und SMARDT-OPK werden ebenfalls im Annex erwähnt, ihre Techniken dort jedoch nicht aufgezeigt. (Zühlsdorf et al. 2023)

Dabei wird eine große Spannbreite der Techniken von Verdichtern bis Kältemitteln adressiert, und die gezeigten HT-WP bewegen sich in ihren TRL von Pilotanlagen bis hin zur Marktreife. Auch zwischen Quellen- und Senkentemperaturen und der Leistung werden große Unterschiede offensichtlich. Dabei werden bereits Nutztemperaturen von bis zu 250 °C und Leistungen von bis zu 70 MW angegeben, diese sind jedoch eher noch im FuE-Stadium. Darauf ist auch die Breite der Investitionskosten zwischen 100-1600 €/kW zurückzuführen. Mit weiteren Entwicklungen, Optimierungen, und größeren Produktionsmengen sollten die spezifischen Kosten sinken.

Als Forschungsausblick: Das DLR-Institut für CO₂-arme Industrieprozesse hat im Projekt CoBra⁴ erfolgreich eine reverse Brayton-HT-WP in einer Pilotanlage mit trockener Luft als Arbeitsmittel getestet und dabei ein Temperaturniveau von 300 °C bei einer Wärmeleistung von ca. 200 kW erreicht. Bis die Technologie in den Markt kommt, werden noch einige Jahre und weitere Fördermittel benötigt. Es zeigt sich jedoch bereits jetzt, welche zukünftigen Temperatur- und somit ebenso Effizienzbereiche mit HT-WP abgedeckt werden könnten.

Laut einer Studie des Fraunhofer ISI werden marktreife HT-WP bis zum Jahr 2035 wahrscheinlich Temperaturen bis 300 °C erreichen können und HT-WP-Systeme bis 200 °C mit knapp 40 MW existieren können (Fraunhofer ISI 2024). Zudem werden HT-WP-Systeme als modulare Anlagen zur Verfügung stehen, die flexibel eingesetzt und erweitert werden können. Die Anwendungsbereiche der HT-WP und andere Technologien, die in Konkurrenz zu ihr stehen, werden in den folgenden Unterkapiteln behandelt.

⁴ <https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2022/03/cobra-unterstuetzt-waermewende-in-der-industrie> (zuletzt geprüft am 11.11.2025)

Tabelle 1: Übersicht über die Entwicklung von HT-WP durch ausgewählte deutsche Hersteller und ihre technischen FuE-Daten, das jeweilige Fact-Sheet zum Hersteller ist in der Fußnote verlinkt (alle mit Stand: 16.07.2024)

Hersteller	Verdichter	T _{max} -Quelle	TRL	Leistung
	Kältemittel	T _{max} -Senke		Investitionskosten
AGO GmbH Energie + Anlagen ⁵	Kolben, Schrauben	-10-90 °C	8-9	0,7-10 MW
	Ammoniak/ Wasser (R-717/ R-718)	50-160 °C		800-1600 €/kW
COMBITHERM GmbH ⁶	Schrauben	35-90 °C	9	0,3-3,3 MW
	HFO (R-1233zd)	80-120 °C		200-400 €/kW
SPH Sustainable Process Heat GmbH ⁷	Kolben	20-120 °C	6-8	0,3-5 MW
	HFOs (u.a. R-1233zd) und nat. HC	(bis 150 °C) 80-165 °C (>200 °C)		150-1000 €/kW (kl.-gr. T-Hub)
Spilling Technologies GmbH ⁸	Kolben	>120 °C	9	1-15 MW
	Wasser (R-718)	<250 °C (<280 °C max.)		100-400 €/kW
Piller Blowers & Compressors GmbH ⁹	Turbo	-	8-9	>1 MW
	Wasser (R-718) und Prozessdampf	40-230 °C		850 €/kWh für >5 MW
Siemens Energy AG ¹⁰	Turbo	>100K T-Hub	7-9	8-70 MW
	HFOs (u.a. R-1233zd)	90-160 °C		250-800 €/kW
6 deutsche Hersteller	Kolben, Schrauben, Turbo	-10-120 °C	6-9	0,3-70 MW
	Wasser, Ammoniak, HFOs	50-250 °C		100-1600 €/kW

Quelle: Aktuelle Übersicht des Task 1 des Annex 58 des IEA TCP HPT auf <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/task1/>

⁵ <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2023/10/ago.pdf> (neu in der Aufzählung, im Bericht zum Task 1 nicht enthalten, zuletzt geprüft am 11.11.2025)

⁶ <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/12/combithermhthpannex58.pdf> (zuletzt geprüft am 11.11.2025)

⁷ <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/sph-thermbooster.pdf> (Werte in Klammern sind geplante Weiterentwicklungen, zuletzt geprüft am 11.11.2025)

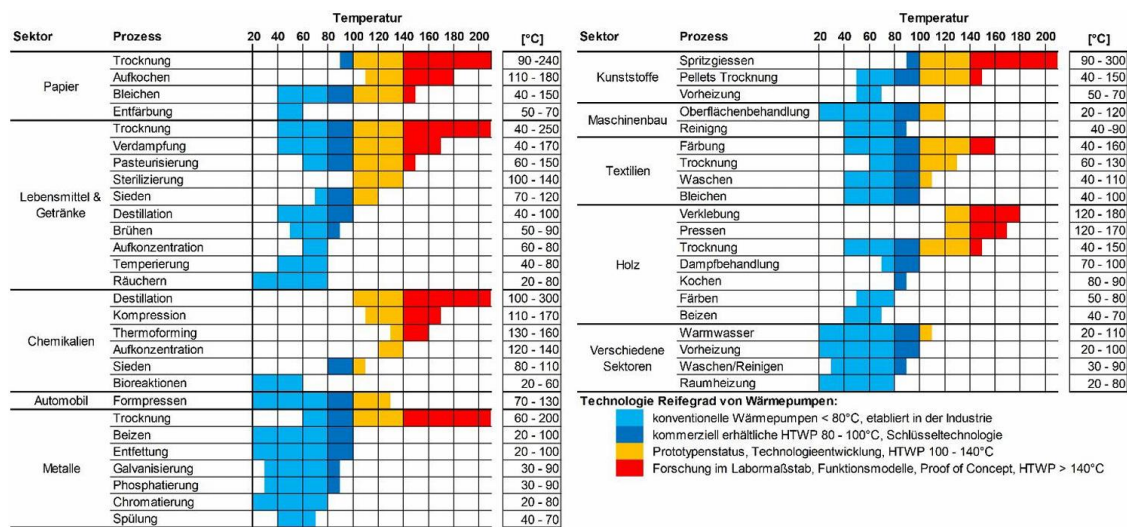
⁸ <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/hthpannex58supplierttechnologyspilling.pdf> (zuletzt geprüft am 11.11.2025)

⁹ <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/hthpannex58pillar-technology.pdf> (zuletzt geprüft am 11.11.2025)

¹⁰ <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/siemens-energy-hthp-technology.pdf> (zuletzt geprüft am 11.11.2025)

3.3 Absehbare Anwendungsbereiche und weitere Potenziale

Wenn es um die Elektrifizierung von Industrieprozessen geht, kann die WP gerade im Temperaturbereich bis 120 °C bereits heute erfolgreich zum Einsatz kommen. Aufgrund ihrer dort bereits bestehenden Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu fossilen Anlagen und ihrem hohen Effizienzpotenzial, wird sie absehbar zuerst bei der Dampferzeugung in den Papier- Nahrungsmittel- und Chemieindustrien eingesetzt werden (Fraunhofer ISI 2024). In diesen Branchen liegen zudem die größten energiewirtschaftlichen Potenziale für die HT-WP (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015; Arpagaus 2019). Weitere Branchen mit ihren Anwendungsbereichen und Temperaturbedarfen sind in folgender Abbildung 4 angegeben. Durch die Technikentwicklung können HT-WP immer höhere Nutztemperaturen erreichen, sodass ihr Anwendungspotenzial in Zukunft auch über den Bereich von 200 °C wächst.



Datenquellen: Brunner et al. (2007), Hartl et al. (2015), IEA (2014), Kalogirou (2003), Lambauer et al. (2012), Lauterbach et al. (2012), Noack (2016), Ochsner (2015), Rieberer et al. (2015), Watanabe (2013), Weiss (2007, 2005), Wolf et al. (2014)

Abbildung 4: Temperaturniveaus industrieller Prozesse unterteilt nach Technologiereife der Wärmepumpe

Quelle: (Arpagaus 2018; Arpagaus et al. 2018)

Die in Tabelle 1 angegebenen Hersteller haben Projekte mit HT-WP in verschiedenen Branchen und Anwendungen durchgeführt. COMBITHERM hat seine HT-WP vor allem für Trocknungsprozesse und die Lebensmittelbranche ausgelegt. Spilling Technologies und Piller adressieren vor allem (Petro-)Chemie, Pharma und Lebensmittel. Piller zudem auch die Papierindustrie. Spilling hat im angegebenen Projektbeispiel Überschussdampf in einer Chemieanlage mit Hilfe der HT-WP recycelt. Piller hat in der Regeneration des Lösemittels in einer Synthesekautschuk-Anlage die Abwärme in Nutzwärme für den Regenerationsprozess umgewandelt. SPH hat in seinem Pilotprojekt geplant, Dampf für die Plastikproduktion zu erzeugen. AGO und Siemens Energy haben mit ihren HT-WP Fernwärmenetze gespeist, AGO nutzte dafür Flusswärme und Siemens Energy die Abwärme existierender Turbo-Kühlmaschinen. (Zühlsdorf et al. 2023)

Auch der Task 2 des Annex 58 zu Integrationskonzepten untersuchte die Anwendungspotenziale von HT-WP für 12 Prozesse, die in Abbildung 5 aufgeschlüsselt wurden. Vor allem Trocknungsschritte und weitere thermische Behandlungen zeigen hohe Potenziale auf. In einigen Prozessen können unterschiedliche Konzepte zum Einsatz kommen, sodass es insgesamt 27 Integrations- und 15 WP-Konzepte gibt. (Zühlsdorf et al. 2024a)

Process			Source			Sink			Temperature ranges [°C]																							Mean ΔT_{LM} [K]						
	Unit Operation	Production Pattern	Medium	T _{in} [°C]	T _{out} [°C]	ΔT_{Glide} [K]	Medium	T _{in} [°C]	T _{out} [°C]	ΔT_{Glide} [K]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250			
Baking ovens	Baking	Continuous	Humid air	110 90	90 65	20 25	Air	180 150	220 180	40 30																									100 88			
Molded fiber dryers	Drying	Continuous	Humid air	150 150	70 100	80 50	Air Steam	150 150	250 165	100 15																									90 33			
Spray Drying	Drying	Continuous	Humid air	50 70 50	20 15 23	30 55 27	Air	84 15 64	210 210 210	146 195 146																									102 70 101			
				40 40	12 12	28 28		15 15	210 210	195 195																									87 87			
				40 40	12 12	28 28		64 210	146																											111		
			Water	40 40	12 12	28 28		15 15	210 210	195 195																												
Brick Drying	Drying	Continuous	Air (Water intermediate circuit)	50 - (*)	- (*)	- (*)	Air (Water intermediate circuit)	- (*)	180 - (*)	- (*)																									- (*)			
		Continuous		50 - (*)	- (*)	- (*)	- (*)	90 - (*)	- (*)																										- (*)			
Painting & Drying	Drying	Non-continuous	Humid air	28	22	6 6	Liquid	130 70	150 90	20 20																									115 80			
Biosludge drying	Drying	Continuous	Steam	120	100	20	Steam	100	146	46																									13			
Plastic granules	Drying	Continuous	Humid air	60	30	30	Air	50	80	30																									20			
Batch Sterilization	Thermal preservation	Batch	Water	40	20	20	Water	100	150	50																									95			
				80	52	28	Steam	80	130	50																										39		
Distillation	Thermal separation	Continuous	Water	65 27 45	60 22 40	5 5 5	Steam Steam Steam	110 105 100	115 115 115	5 10 15																									50 86 65			
							Water	82	95	13																										34		
							Steam	110	120	10																											98	
Anodizing	Utility water heating	Non-continuous	Water	40 20 40	35 15 35	5 5 5	Water Steam Water	80 110 80	85 120 85	5 10 5																									45			
	Thermal treatment			20	15	5	Steam	110	120	10																									98			
Oil and Gas Processing	Thermal separation	Continuous	Oil	70	50	20	Oil	85	105	20																									35			
			Water-glycol	45	35	10		100	140	40																									80			
Extrusion cooking	Thermal treatment	Continuous	Humid air	50	45	5	Water	100	160	60																									83			

Abbildung 5: Integrationskonzepte mit möglichen Temperaturbereichen

Quelle: (Zühlsdorf et al. 2024a)

Zusammenfassend sind mögliche Anwendungen in folgenden Branchen und Prozessen:

- Kurz bis mittelfristig in der **Nahrungsmittelindustrie bei 100 °C-200 °C** (Sterilisieren, Trocknen, Pasteurisieren, Eindampfen, ...) oft zusammen mit Kühlbedarf
- Kurz bis mittelfristig in der **Textilindustrie unter 120 °C** (Waschen, Trocknung, Färben)
- Kurz bis langfristig in der **Chemieindustrie in diversen Temperaturbereichen**, oft in Kombination mit Brüdenverdichtern (Kurzfristig: Sieden und Aufkonzentrieren, Langfristig: Destillieren und Thermoformen)
- Mittel bis langfristig in der **Papierindustrie bei 100 °C und höher** (Bleichen, Kochen, Trocknen), oft in Dampfprozessen
- Kurzfristig für **Trocknungsprozesse zwischen 100 °C-160 °C** in den Branchen Metallverarbeitung, Gummi und Kunststoff, Holzindustrie, Ziegelherstellung sowie Maschinenbau. Insbesondere bei Trocknungsprozessen kann aufgrund der Nutzung der Kondensationswärme der feuchten Abluft am Verdampfer der Wärmepumpe die gesamte Prozesseffizienz gegenüber herkömmlichen Trocknungsprozessen deutlich gesteigert werden.

Die Weiterentwicklung verschiedener Technologien ist in den kommenden 10 Jahren besonders herausfordernd und risikobehaftet, da die Transformation von industrieller Produktion mit dem Ziel der Klimaneutralität im Jahr 2045 sich heute nur unklar abzeichnet. Aufgrund der vielfältigen Unsicherheit im globalen Umfeld wie Produktionsverlagerungen, geopolitischen Spannungen und unterschiedlichen Industriepolitiken (insb. in der EU, China und den USA) spannen sich zwei Szenarien der Industrietransformation für die Zeit bis 2045 auf: Die schnelle und frühe Dekarbonisierung mit moderaten geopolitischen Mächten, moderater Deglobalisierung zeigt ein leichtes Wirtschaftswachstum und viel Ressourceneffizienz auf, während die Ölindustrie und OPEC-Staaten in die globale Klimapolitik eingeeht sind. Im Gegensatz dazu steht die langsame und späte Dekarbonisierung mit strikten geopolitischen Mächten, starker Deglobalisierung, stagnierender Wirtschaft und wenig Ressourceneffizienz, während die Ölindustrie kaum von der Klimapolitik beeinflusst wird. Eine ausführliche Studie zu den Szenarien wurde in (Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe 2025) veröffentlicht.

Dabei kann die Entwicklung einzelner Techniken mehr oder weniger stark von den beiden Szenarien beeinflusst werden. Einen großen Einfluss hat die Art der Energiequelle, je nachdem wie abhängig sie von defossilisierten Alternativen und ihrer Verfügbarkeit ist (z.B. Strom vs. Wasserstoff) und welchen Preisdruck sie von fossilen Energien erfährt (Strom- vs. Gaspreis). Dabei ist die Elektrifizierung von niedrigeren Temperaturen bis 500 °C zum Beispiel unabhängiger bzw. invarianter in den Szenarien als die Wasserstoffverbrennung in den hohen Prozesstemperaturen. Dabei kann die Wasserstoffverbrennung in Konkurrenz zu fossilen Brennstoffen mit Carbon Capture einer späteren Dekarbonisierung stehen.

Die HT-WP ist größtenteils Szenarien-invariant, da sie vor allem niedrige Temperaturbereiche bis 200 °C abdeckt, in dem Elektrifizierung einfach umzusetzen ist und Wasserstoff keine wirtschaftliche Alternative darstellt. Daher werden HT-WP in beiden Szenarien frühe vs. späte Dekarbonisierung eine große Rolle spielen. Vor allem wenn das Preisverhältnis von Strom zu Gas auch in Deutschland besser im Sinne der Elektrifizierung wird, ist der Einsatz von HT-WP für die Prozesswärmeerzeugung langfristig günstiger.

Zusammenfassend gibt es bereits heute eine vielfältige Hersteller- und Anwenderlandschaft, während weitere Anwendungspotenziale und Temperaturbereiche erschlossen werden. Das Wachstum der Herstellerlandschaft nicht nur in Deutschland, sondern auch auf globaler Ebene wird mithilfe von Marktprognosen in Kapitel 3.5 behandelt. Dabei steht die HT-WP jedoch in Konkurrenz zu anderen Techniken, insbesondere im Temperaturbereich zwischen 200-300 °C kann sich eine andere Entwicklung ergeben, die beispielsweise eher den Elektrodenkessel als Technik der Wahl stärkt. Daher werden der Elektrodenkessel, konventionelle Prozesswärmetechniken sowie weitere Konkurrenztechniken in Kapitel 3.4 genauer betrachtet, um ihre Effekte auf die Anwendungspotenziale der HT-WP tiefergehend darzustellen.

3.4 Konkurrenztechniken und ihre Auswirkungen auf die Anwendungspotenziale

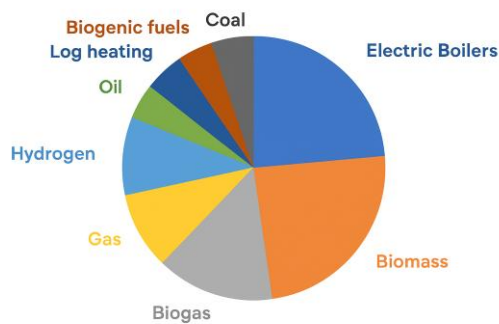


Abbildung 6: Mögliche Konkurrenztechnologien für HT-WP und deren Verteilung in den Antworten aus Interview-Fragebögen mit 16 Herstellern in der Schweiz

Quelle: (Zühlsdorf et al. 2024b)

Es gibt eine Vielzahl an Techniken, die Prozesswärme zwischen 100-300 °C bereitstellen können. Vor allem Elektrodenkessel oder die Verbrennung von Biomasse, Wasserstoff oder konventionellen fossilen Energieträgern werden in Abbildung 6 genannt. Dabei ist im Vergleich zur HT-WP die Technologiereife und erprobte Anwendung dieser Alternativtechniken zum Teil deutlich höher, vor allem wenn es eine Senktemperatur >200 °C zu erreichen gilt. Daher steht die HT-WP insbesondere in diesem Temperaturbereich in Konkurrenz zu Alternativtechniken bzw. wird die FuE der HT-WP die Konkurrenztechniken in diesem Temperaturbereich deutlich schwieriger einholen können.

Alternative Elektrifizierung: Elektrodenkessel

Elektrodenkessel können vor allem für Dampferzeugung eine bedeutende Konkurrenztechnik in hohen Temperaturbereichen und/oder in der Flexibilisierung des Energiebezugs darstellen. Bei HT-WP ist eine Flexibilisierung der Energienachfrage aufgrund der Systemträge im Vergleich zum Elektrodenkessel geringer. Vor allem der Verdichter ist ein limitierender Faktor, da die Mindestlast je nach Kompressortyp etwa 25-50 % der Nennleistung beträgt, im Vergleich zu 2-3 % beim Elektrodenkessel. Zusätzlich sind die Startzeiten bei Elektrodenkesseln aufgrund der niedrigeren thermischen Masse deutlich geringer. Herstellerangaben zufolge bewegt sich die Kaltstartzeit von Elektrodenkesseln im Bereich weniger Minuten¹¹, wohingegen die HT-WP¹² herstellerabhängig eher im Bereich > 15 min liegt. Zudem werden WP mit hohen Leistungen derzeit nicht auf schnellen Start/Stopp oder Lastwechsel ausgelegt. Durch passende Regelungsmethoden und Sekundärwassersysteme könnten die meisten industriellen WP jedoch schnelle Start/Stops ermöglichen, dies ist jedoch abhängig von der spezifischen WP-Konstruktion und den Systemanforderungen, da die WP-Parameter wie Temperaturhub und COP von schnellen Lastwechseln beeinflusst werden. (Fraunhofer ISI und IOB der RWTH Aachen 2023)

Der Elektrodenkessel zeichnet sich im Vergleich zu HT-WP insgesamt durch geringere Investitionskosten, eine bessere Rentabilität bei geringen Jahresstunden (vor allem <3000 h/a)

¹¹ <https://www.parat.no/en/products/industry/parat-ieh-high-voltage-electrode-boiler/> (zuletzt geprüft am 11.11.2025)

¹² <https://heaten.com/de/technologie> (zuletzt geprüft am 11.11.2025)

sowie bei niedrigen Strompreisen, eine bessere Flexibilität und einen höheren Reifegrad/TRL in höheren Temperaturbereichen (vor allem $>200\text{ }^{\circ}\text{C}$) aus. Jedoch wird im Gegenzug zur HT-WP eine 2–3-fache Menge an erneuerbarem Strom-Input für dieselbe Menge an Wärme-Output benötigt (siehe Abbildung 7). (Agora Industrie und FutureCamp 2022)

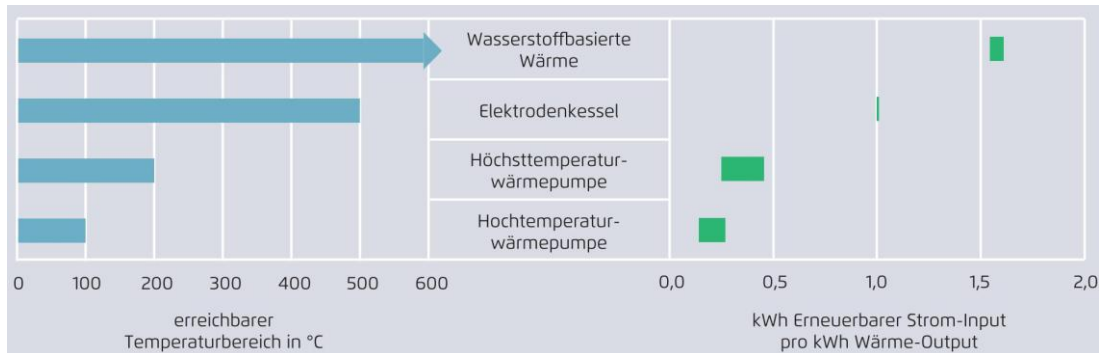


Abbildung 7: Erreichbare Temperaturbereiche und Strombedarfe verschiedener Technologien für klimaneutrale Prozesswärme¹³

Quelle: (Agora Industrie und FutureCamp 2022)

Brennstoffbasierte Alternativen: Biomasse und Wasserstoff

Biomasse wird bereits heute in verschiedenen Industriezweigen in der Prozesswärmebereitstellung genutzt, wie beispielsweise in der Papierindustrie mit der Verbrennung von biogenen Rest- und Abfallstoffen aus der Papierherstellung. Im Vergleich dazu ist Wasserstoff in der Wärmeerzeugung derzeit noch nicht etabliert. Dabei benötigt strombasierter grüner Wasserstoff in der Herstellung einen deutlich höheren Strombedarf im Vergleich zur direkten Elektrifizierung (vgl. Abbildung 6). Bei einer inländischen H_2 -Herstellung kann dies somit den Umbau des Stromsystems zusätzlich belasten, bei einem H_2 -Import den Stromnetzbau sogar zum Teil entlasten, dafür jedoch eine größere H_2 -Netzstruktur erfordern. Beim Biomasseeinsatz kann es in Zukunft zu Nutzungskonflikten und Engpässen kommen, da ein stofflicher Einsatz der Biomasse (z.B. als Kohlenstoffquelle) einer energetischen Verwertung vorzuziehen ist und andere Industriezweige deutlich höhere Preise dafür zahlen. Jedoch bieten Biomasse und Wasserstoff den Vorteil, dass sie fossile Energieträger leicht und in vielen Fällen ohne große Prozessänderungen in den meisten Temperaturbereichen ersetzen könnten. Daher werden sie vor allem bei möglichen hohen Einsatztemperaturen der HT-WP (besonders $>200\text{ }^{\circ}\text{C}$) eine Konkurrenz sein. (Agora Industrie und FutureCamp 2022).

Konventionelle Techniken: Dampfkessel und GuD KWK

Nicht zuletzt stehen HT-WP auch in Konkurrenz zu fossilen Energieträgern und konventionellen Techniken zur Prozesswärmeerzeugung. Dabei bieten WP bei niedrigen Temperaturen bereits heute eine klimafreundliche Wärmebereitstellung und können es mit konventionellen Dampfkesseln in der Wirtschaftlichkeit aufnehmen. In Gegensatz zu Dampfkesseln

¹³ Im Gegensatz zu der in dieser Analyse verwendeten Definition der HT-WP der IEA (Senktemperatur $>100\text{ }^{\circ}\text{C}$), wird die Hochtemperatur-WP in diesem Bericht für Temperaturen bis $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ definiert und $>100\text{ }^{\circ}\text{C}$ die Höchsttemperatur-WP als Begriff etabliert.

mit Wärmebereitstellungskosten von 68 €/MWh_{th}, stellt eine HT-WP eine MWh_{th} zwischen 100-200 °C für 70 € bereit¹⁴. Wärmekosten einer WP mit Nutztemperaturen <100 °C belaufen sich auf 48 €/MWh_{th}. Die angenommenen Strom- und Erdgaspreise sind in Abbildung 8 zu sehen¹⁵. So bleiben dank ihrer hohen Effizienz WP und HT-WP auch bei niedrigen Erdgas- und hohen Strompreisen wirtschaftlich, solange der Unterschied zwischen Erdgas und Strom nicht zu hoch wird. Im Vergleich zur konventionellen Gas-und-Dampf Kraft-Wärme-Koppelung (GuD KWK) mit 120 €/MWh_{th} zeigen Wärmepumpen ähnliche Kosten: 117 €/MWh_{th} für WP mit Temperaturen unter 100 °C und 140 €/MWh_{th} für HT-WP mit höheren Temperaturen. Hier wird auch die Substitution der wegfallenden KWK-Stromerzeugung durch Netzstrom mitberechnet, sodass die Kosten pro thermische Leistung der WP im Vergleich zum Dampfkessel höher ausfallen. (Agora Industrie und FutureCamp 2022)

Jedoch entlasten bestehende Subventionen die erdgasbasierten Dampfkessel und GuD KWK, was die Marktdiffusion von WP hemmt. Eigenstromerzeugung aus Erdgas bietet im Vergleich zum Stromfremdbezug steuerliche Vorteile bei besonders effizienten Erdgasanlagen und vermeidet Mehrkosten bei Bezug von Netzstrom wie im Fall der WP (Netzentgelte). Hohe Kapitalkosten und fehlende Erfahrungen mit Industrie-WP sind derzeit wesentliche Hindernisse für ihre rasche Diffusion. (Agora Industrie und FutureCamp 2022)

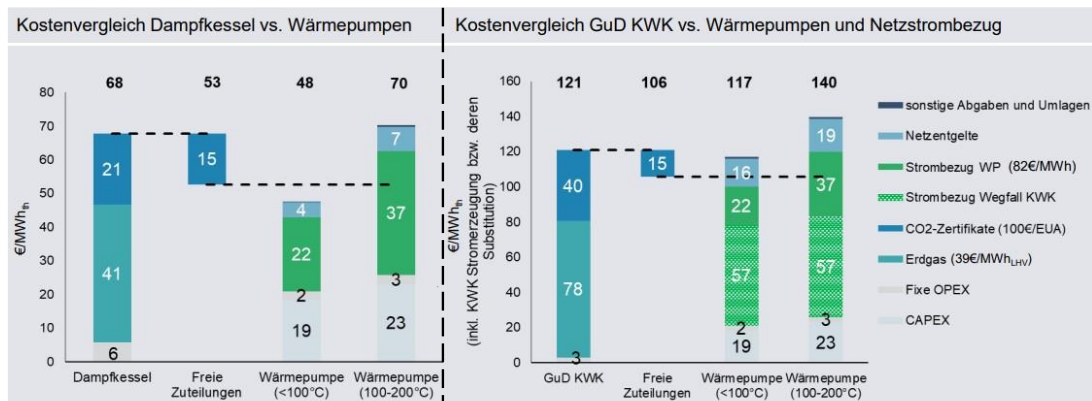


Abbildung 8: Kosten der Wärmebereitstellung von Wärmepumpen (WP und HT-WP) im Vergleich zu Dampfkessel und GuD KWK¹⁵

Quelle: (Agora Industrie und FutureCamp 2022)

Alternative Abwärmenutzung: Abgabe an Wärmenetze

Die Abgabe von Prozessabwärme an örtliche Nah- oder Fernwärmenetze kann ebenfalls in Konkurrenz zur Abwärmenutzung durch HT-WP stehen. Insbesondere bei Raumproblemen für WP-Aggregate oder speziellen infrastrukturellen Anforderungen wie Hygienestandards ist dies bei einem gleichzeitig hohen Wärmeabgabepreis naheliegend.

¹⁴ HT-WP sind derzeit noch nicht bis 200 °C in ihrer Breite verfügbar, sodass die angegebenen Kosten eher für den Bereich 100-150 °C zu sehen sind, während sie darüber höher ausfallen könnten.

¹⁵ Der Strompreis bezieht sich auf den projizierten durchschnittlichen Börsenpreis im Jahr 2030. Weitere Annahmen können im Transformationsrechner Power-2-Heat eingesehen und anpassen: <https://www.agora-industrie.de/daten-tools/transaktionskostenrechner-power-2-heat> (zuletzt geprüft am 11.11.2025)

3.5 Stand der Technik im internationalen FuE-Wettbewerb

Der Annex 58 hat weltweite Hersteller (in den am Annex beteiligten Ländern) mit ihren Technologien aufgeteilt nach Nutzttemperaturen und Leistungsspannbreite in folgender Abbildung 9 aufgetragen. Die deutschen Hersteller (in grün markiert, siehe Tabelle 1) decken dabei beide Parameter über ihre ganze Spannbreite ab, gleichzeitig haben sie viele globale Konkurrenten. Da in der Grafik nur die maximale Senkentemperatur gezeigt wird, ist der tatsächliche Nutztemperaturbereich ggf. verzerrt. Zudem basieren die gezeigten Werte auf eigenen Angaben der Hersteller, die nicht genauer überprüft wurden. Dabei sind Quelltemperatur und Temperaturhub zu beachten. Bei Spilling wird die WP-Technik für Dampfanwendungen mit TRL 9 angegeben für Quelltemperaturen $>120\text{ }^{\circ}\text{C}$ und möglichem Temperaturhub von $>100\text{ K}$. Der Annex hat nur eine Auswahl an Ländern und Herstellern analysiert, Unternehmen aus den USA und China fehlen. (Zühlsdorf et al. 2023)

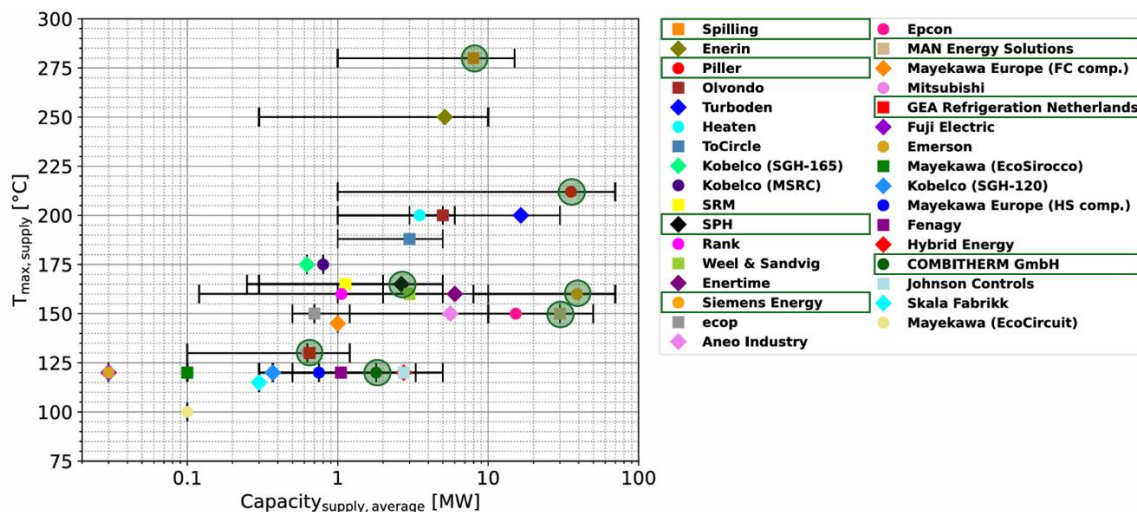


Abbildung 9: Globale Hersteller mit ihrer Technik als maximale Senkentemperatur für Nutztemperatur über die Leistung, deutsche Hersteller sind in grün markiert¹⁶

Quelle: (Zühlsdorf et al. 2023)

Bei Fokus auf TRL 8 gibt es laut Annex 58 insgesamt bereits Demonstrationen von mind. 25 großtechnischen (1-10 MW) industriellen WP zwischen $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Hersteller kommen aus verschiedenen Ländern, wobei die am stärksten vertretenen Länder innerhalb des Annex 58 in Tabelle 2 aufgeführt sind. Dabei folgt Norwegen nach Deutschland an zweiter Stelle, während auch Japan, Frankreich und Dänemark starke Herstellerlandschaften zeigen. Arpagaus identifiziert zudem Österreich, Niederlande, Schweiz, Korea und China als forschungsstarke Länder (Arpagaus 2019).

¹⁶ Die Maximaltemperatur und Leistung basieren auf eigenen Angaben der Hersteller, die vom Annex 58 nicht genauer überprüft wurden. Bei großen Leistungsspannen ist es fragwürdig, ob auch in den höheren Leistungen die Maximaltemperatur erreicht werden kann.

Tabelle 2: Globale Verteilung der Hersteller in ausgewählten Ländern

Land	Anzahl Hersteller	Unternehmen
Deutschland	8	Siemens Energy, COMBITHERM GmbH, Spilling Technologies GmbH, Piller, SPH - Sustainable Process Heat (startup), AGO Energie, Everllence (ehem. MAN Energy Solutions), GEA
Norwegen	7	Hybrid Energy AS, Skala Fabrikk AS, Enerin AS, Olvondo Technology AS, ToCircle Industries AS, Epcon evaporation system AS, Heaten AS
Japan	4	Fuji Electric, KOBELCO, Mayekawa, Mitsubishi Heavy Industries
Frankreich	3	Heatlift (vormals Enertime), Clauger, Equans Axima
Dänemark	2	CS TechCom, Weel & Sandvig
China	3	Shandong Zhangqiu Blower Co., Beijing Huayuan Taimeng Energy Saving Equipment Co., Kaeser Compressors Compression Technology (Suzhou) Co.
Multinationale Konzerne (Auswahl)		u.a. Johnson Controls, Trane, Carrier, Daikin Industries, Baker Hughes

Quelle: eigene Darstellung und Recherche, IREES, mit Informationen von (Zühlsdorf et al. 2023)

Eine detaillierte, ständig aktualisierte Datenbank für Groß- und Hochtemperaturwärmepumpen wurde von der Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geotechnologien IEG im Auftrag der LEA LandesEnergieAgentur Hessen GmbH entwickelt und ist unter <https://grosswaermepumpen-info.de/> zu finden.

Im Marktbericht von Global Market Insights¹⁷ (GMI) hatte der globale industrielle WP-Markt im Jahr 2022 eine Größe von 1,3 Mrd. USD und soll perspektivisch um 5,5 % pro Jahr zwischen 2024-2032 wachsen, um im Jahr 2032 2,2 Mrd. USD zu betragen. In Europa betrug der im Jahr 2022 435,8 Mrd. USD und somit etwa ein Drittel des globalen Marktes. Der europäische Markt wird für das Jahr 2032 auf 760 Mrd. USD geschätzt, also weiterhin ca. 1/3 des globalen Marktes.

McKinsey¹⁸ beziffert den industriellen WP-Markt für 2023 auf ca. 4 Mrd. USD an globalen Investitionen mit einer jährlichen Wachstumsrate von über 15 %, sodass der Markt bis zum Jahr 2030 je nach Szenario auf ca. 11-21 Mrd. USD wächst, wie in Abbildung 10 zu sehen. Dabei machte Europa im Jahr 2023 etwa 22,5 % (0,9 Mrd. USD) aus und wird bis 2030 auf einen Anteil von etwa 18,5 % (ca. 2-4 Mrd. USD) schrumpfen. Gleichzeitig wird der Anteil Chinas von derzeit 0,3 Mrd. USD (7,5 %) auf 5-8 Mrd. USD (38-45 %) anwachsen. Im

¹⁷ <https://www.gminsights.com/de/industry-analysis/industrial-heat-pump-market#:~:text=Markt%20f%C3%BCr%20industrielle%20W%C3%A4rmepumpen-Die%20Gr%C3%B6%C3%9Fe,von%202024%20bis%202032%20erweitert> (zuletzt geprüft am 11.11.2025)

¹⁸ <https://www.mckinsey.com/industries/industrials-and-electronics/our-insights/industrial-heat-pumps-five-considerations-for-future-growth> (zuletzt geprüft am 11.11.2025)

gesamten WP-Markt (inkl. nicht-industrieller Anwendungen) betrugen die Verkaufszahlen in der EU21 im Jahr 2022 2,8 Mio. und verzeichneten somit einen Zuwachs von 28 % im Vergleich zum Jahr 2021 (2,2 Mio.), während die Verkaufszahlen für 2023 auf 3,2 Mio. geschätzt werden (McKinsey 2023).

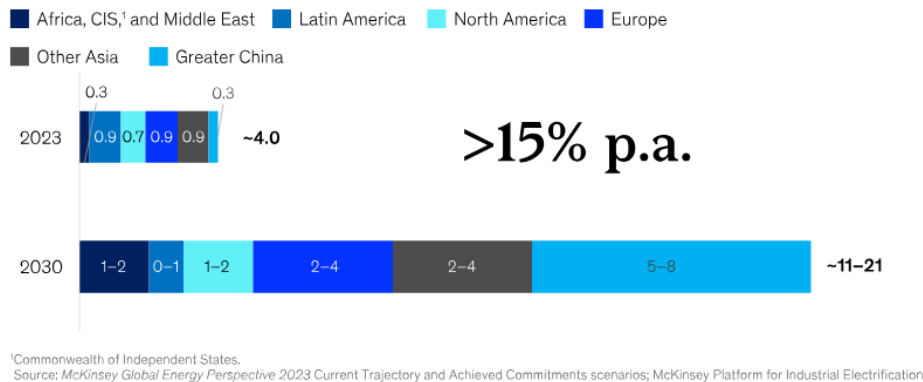


Abbildung 10: Globaler industrieller WP-Markt (Hardware) [in Mrd. USD]

Quelle: McKinsey & Company¹⁸

Als Treiber hinter dem Wachstum geben beide Unternehmen eine erhöhte Nachfrage nach Reduktion von CO₂-Ausstoß und Elektrifizierung an, gestärkt von staatlicher Unterstützung durch Regulierung und Anreize. GMI nennt zudem Energieeffizienz, Modernisierung der alternden Infrastruktur sowie steigende Abwärmenutzung und Energiebedarf als Treiber und geht auf folgende globale Trends ein. Digitale Tools wie IoT und Automatisierung erlauben eine bessere Überwachung, Planung und Kontrolle, auch von industriellen Wärme- und Kälteprozessen, was den Einsatz von WP erleichtert und fördert. Auch die wachsende globale Urbanisierung sowie Kommerzialisierung industrieller Produkte fördern die Nutzung industrieller WP (auch im Fernwärmesektor). Dadurch

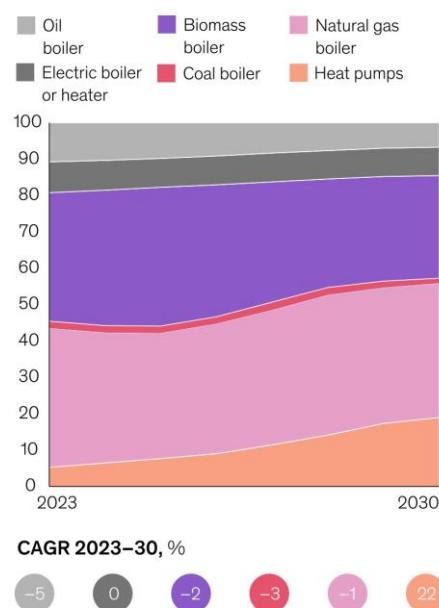


Abbildung 11: Technologiemarkt der Prozesswärmeerzeugung bis 200°C in EU-27+UK und ihre Wachstumsrate (CAGR)

Quelle: McKinsey & Company¹⁸

schätzt McKinsey¹⁸ den Anteil von industriellen WP in der Prozesswärme mit Temperaturen bis 200 °C (ohne Raumwärme und Warmwasser) in der EU-27+UK im Jahr 2030 auf 20 % ein, mit einem durchschnittlichen jährlichen Wachstum zwischen den Jahren 2023-2030 von 22 %, siehe Abbildung 11. Im Fernwärmesektor sollen WP bis zum Jahr 2030 15 % abdecken und gleichzeitig ein Drittel des industriellen WP-Marktes ausmachen. Dabei wird sich der Markt von kleineren Systemen bis 5 MW_{th} mit Temperaturen zwischen 80-100 °C zu größeren Systemen >5 MW_{th} und >100 °C bewegen.

Das Fraunhofer ISI geht je nach globalem Szenario der Energiewende von einem Investitionsbedarf für HT-WP >100 °C in den Jahren 2021-2030 von 23-63 Mrd. € aus, sodass die globale Leistung im Jahr 2030 zwischen 100-310 GW betragen kann.

Für das Jahrzehnt 2031-2040 beläuft sich der überschlagene Investitionsbedarf auf 29-120 Mrd. € und die geschätzte Installationsleistung auf 130-600 GW. Damit ergeben sich je nach Szenario jährliche Zuwachsraten von 8,1-12,6 %. (Hirzel 2017)

Die Abbildung 12 von GMI¹⁷ zeigt die Umsatzverteilung aller verfügbaren industriellen WP nach Leistungsgröße für das Jahr 2022. Der größte Anteil entfällt mit 46 % auf Systeme <500 kW, während Systeme >5 MW nur ca. 15 % ausmachen. Kleinere Systeme sind leichter zu skalieren und ihre Fertigung wird voraussichtlich ein höheres Wachstum erfahren. Sys-

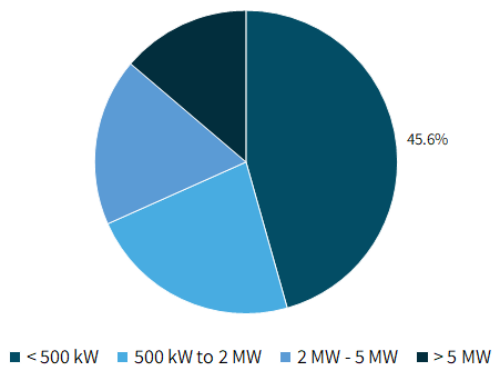


Abbildung 12: Umsatzbeteiligung industrieller WP im globalen Markt im Jahr 2022 nach Leistungsgröße

Quelle: GMI¹⁷

teme mit Leistungen zwischen 0,5-2 MW hatten im Jahr 2022 eine Bewertung von 285 Mio. USD und werden in ihrer Nachfrage ebenfalls deutlich steigen. Gleichzeitig können mehrere kleine WP mehr Flexibilität bezüglich Temperaturspannen, Einsatzbereichen und auch Einbau in bestehende Anlagen bieten. Große Systeme weisen bislang noch FuE-Lücken und höheren Kosten auf.

Als Anwenderbranchen werden ebenfalls dieselben wie in Kapitel 3.3 genannt. Gerade im Bereich bis 100 °C wird die Lebensmittel- und Getränkeindustrie eine wachsende Anwendung der WP auf-

zeigen, sowie die Papier- und Chemieindustrien. McKinsey identifiziert Deutschland, Frankreich, die nordischen Länder, Polen und UK als erste Länder, die den Einsatz der WP in Industrie und Fernwärme vorantreiben. Von GMI werden als wichtige Akteure unter anderem GEA Gruppe Aktiengesellschaft, MAN Energy Solutions, Siemens Energy, Johnson Controls und Atlas Copco identifiziert und somit viele Unternehmen, die auch in Deutschland tätig sind. Atlas Copco Energas und STRABAG Umwelttechnik haben beispielsweise im Jahr 2022 eine Zusammenarbeit bei Industrie- und Hochleistungs-WP mit thermischen Leistungen größer 5 MW vereinbart¹⁹. Durch die Zusammenarbeit wollen beide Unternehmen ihre Ressourcen bündeln, um dem wachsenden Markt begegnen zu können und Prozessabwärme oder Umweltwärme für die Erzeugung von Wärme oder Dampf in Industrie und Fernwärmenetzen zu nutzen.

Somit ist auf globaler Ebene ein starker Wettbewerb zu erwarten, bei dem vor allem außereuropäische Länder zukünftig HT-WP günstig in hoher Stückzahl produzieren können. Daher gilt es, Technik-Resilienz aufzubauen sowie den technischen Entwicklungsvorsprung zu bewahren und weiter auszubauen, ohne auf den internationalen Austausch und gegenseitiges Lernen im Rahmen geeigneter Formate, wie z.B. dem TCP HPT der IEA, zu verzichten.

¹⁹ https://strabag-umwelttechnik.com/databases/internet/_public/content.nsf/web/DE-STRABAGUMWELT-TECHNIK.COMN-NEWS-STRABAG%20Umwelttechnik%20und%20Atlas%20Copco%20Energas%20vereinbaren%20Zusammenarbeit%20im%20Bereich%20Industrie-%20und%20Hochleistungsw%C3%A4rmepumpen# (zuletzt geprüft am 11.11.2025)

3.6 Patent- und Publikationsanalysen

Bei den Patent- und Publikationsanalysen hat sich gezeigt, dass jeweils einzelne technische Aspekte von Wärmepumpen behandelt werden, aber nicht immer explizit die HT-Wärmepumpe als Stichwort erwähnt wird. Deshalb wurden bei den Patent- und Publikationsrecherchen Stichworte als Suchbegriffe zusammengestellt, die die Ergebnisse auf den industriellen HT-Bereich der Wärmepumpen einschränken²⁰. Ein Verlauf der weltweiten Patente zu HT-Wärmepumpen seit dem Jahr 2000 ist in Abbildung 13 zu sehen.

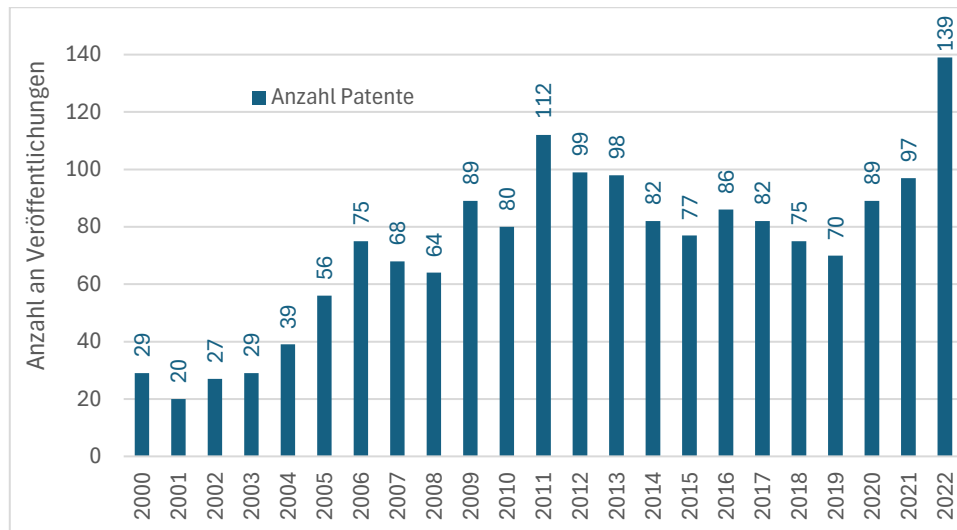


Abbildung 13: Anzahl der weltweiten Patente im Bereich der HT-WP seit dem Jahr 2000²⁰

Quelle: eigene Darstellung, IREES, Daten von Prof. Schmoch – Fraunhofer ISI

Der Verlauf der Patentzahlen entspricht dem typischen Verlauf des Technikzyklus mit den Phasen Entdeckung – Euphorie – Ernüchterung – Neuorientierung – Aufstieg – Diffusion. Die Entwicklung des Technikzyklus mit seinen sechs Phasen ist in Abbildung 14 dargestellt. Dabei kann das Aktivitätsniveau anhand von Patent- und Publikationszahlen ausgedrückt werden. In den ersten Phasen werden viele der Patente von wissenschaftlichen Einrichtungen angemeldet, in der Phase der Ernüchterung setzen sich jedoch einige der technischen Entdeckungen des Anfangs nicht durch, da sie nicht tragfähig sind. Bis zu diesem Punkt standen in der FuE einer Technik wissenschaftliche und technische Erkenntnisse im Fokus, während nachfolgend die Anwendung in den Mittelpunkt rückt. Mit der Neuorientierung wird der Fokus auf wenige Einzeltechniken gesetzt, die die besten Anwendungspotenziale in ihrem Umfeld zeigen. In dieser Phase ist die anwendungsorientierte FuE sehr wichtig. Danach steigt das Aktivitätsniveau insbesondere in der Industrie wieder an, indem die fokussierten Einzeltechniken in ihre Anwendungen kommen und anschließend in eine breitere Diffusion. (Fraunhofer ISI 2022; Schmoch 2007)

²⁰ Die Patent- und Publikationsanalysen wurden von Prof. Schmoch am Fraunhofer ISI im Unterauftrag durchgeführt. Die Suchstrategie der Patent- und Publikationsanalysen wird im Anhang genauer aufgezeigt. Patente konnten für das Jahr 2023 noch nicht ausgewertet werden.

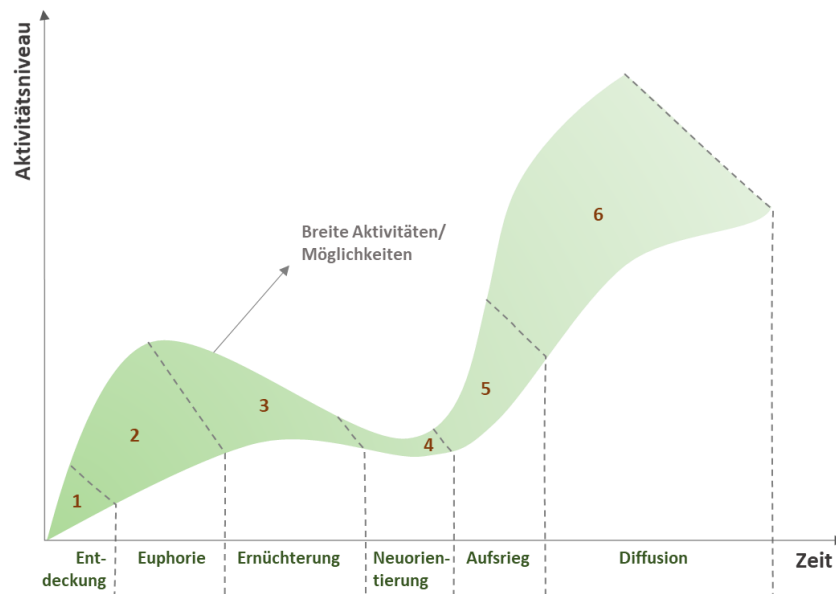


Abbildung 14: Der Technikzyklus und seine sechs verschiedenen Phasen

Quelle: eigene Darstellung, IREES, nach (Meyer-Krahmer und Dreher 2004)

Somit steigen die Patentanmeldungen zur HT-WP bis zum Jahr 2011 zuerst in den Phasen der Entdeckung und Euphorie an, sinken jedoch während der Ernüchterungsphase bis zum Jahr 2019 ab. Der Verlauf zeigt, wie die HT-WP wegen technischer Probleme und/oder zu hohen Kosten trotz mehrjähriger Forschung nicht am Markt ankommt. Als Konsequenz werden die industriellen FuE-Aufwendungen reduziert, während die wissenschaftliche FuE fortgeführt wird, da dort gewisse FuE-Kapazitäten aufgebaut wurden, die sich den Entwicklungen und dem Einfluss des Marktes entziehen.

Nach der Neuorientierung wachsen die Patentzahlen dann wieder bis im Jahr 2022 die Anmeldungen von 2011 sogar übertroffen werden. Der erneute Anstieg der Patentzahlen kann darauf zurückzuführen sein, dass mithilfe von technischen Durchbrüchen und der Konzentration auf einzelne Technikstränge die HT-WP am Markt wieder attraktiver wurde (z.B. Fokus auf natürliche Kältemittel und Anwendung in Lebensmittel- und Chemieindustrien). Somit befindet sich die HT-WP derzeit in der Phase des Aufstiegs.

Ein Verlauf der weltweiten Publikationen zu HT-Wärmepumpen seit dem Jahr 2000 ist in Abbildung 15 zu sehen. Parallel zu den Patenten steigen die Publikationszahlen zuerst stetig an, zeigen jedoch im Gegensatz dazu nur im Jahr 2022 einen kurzen Einbruch. Publikationen spiegeln eher die wissenschaftliche FuE wider, während Patente die Fortschritte in der industriellen FuE darstellen. Die hohe Anzahl der Publikationen zeigt somit das große Interesse an HT-WP.

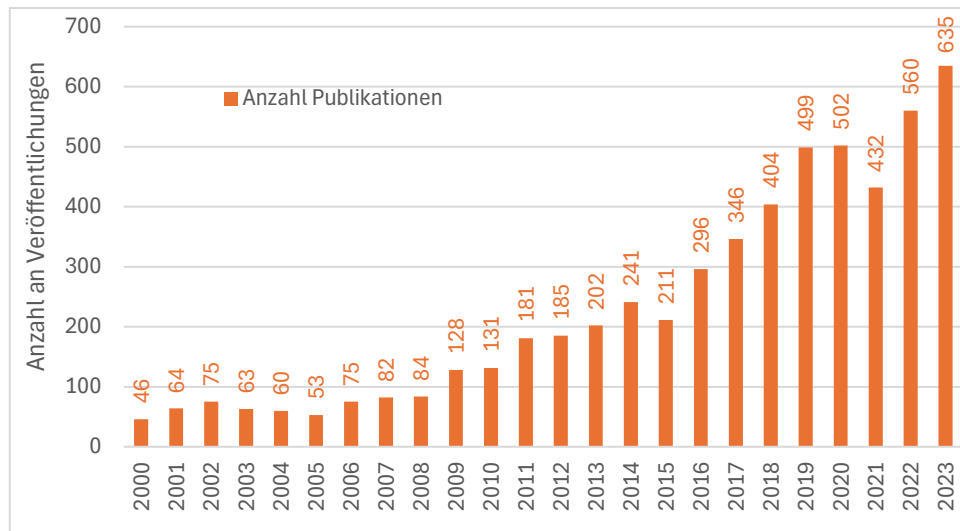


Abbildung 15: Weltweite Publikationen im Bereich der HT-WP seit dem Jahr 2000

Quelle: eigene Darstellung, IREES, Daten von Prof. Schmoch – Fraunhofer ISI

Bei einer genaueren Betrachtung der einzelnen Länder ist Deutschland auf Platz vier bei den Patenten und Platz drei bei den Publikationen, siehe Abbildung 16. Vor allem die USA und China schneiden in beiden Bereichen am stärksten ab. Auch die EU ist vor allem mit Deutschland, Italien, Frankreich und Dänemark stark vertreten. Die hohe Anzahl an Publikationen in China zeigt das starke Interesse in diesem Bereich. Dies ist jedoch nicht als Stärke in Relation zu den anderen Ländern zu interpretieren, dafür ist die Patentanalyse aussagekräftiger. Wenn bei den Publikationen alle europäischen Länder zusammen betrachtet werden, wird eine Summe von über 550 erzielt. Dies zeigt umso mehr, wie wichtig europäische Programme sind, um es im globalen Wettbewerb mit China und den USA aufzunehmen.

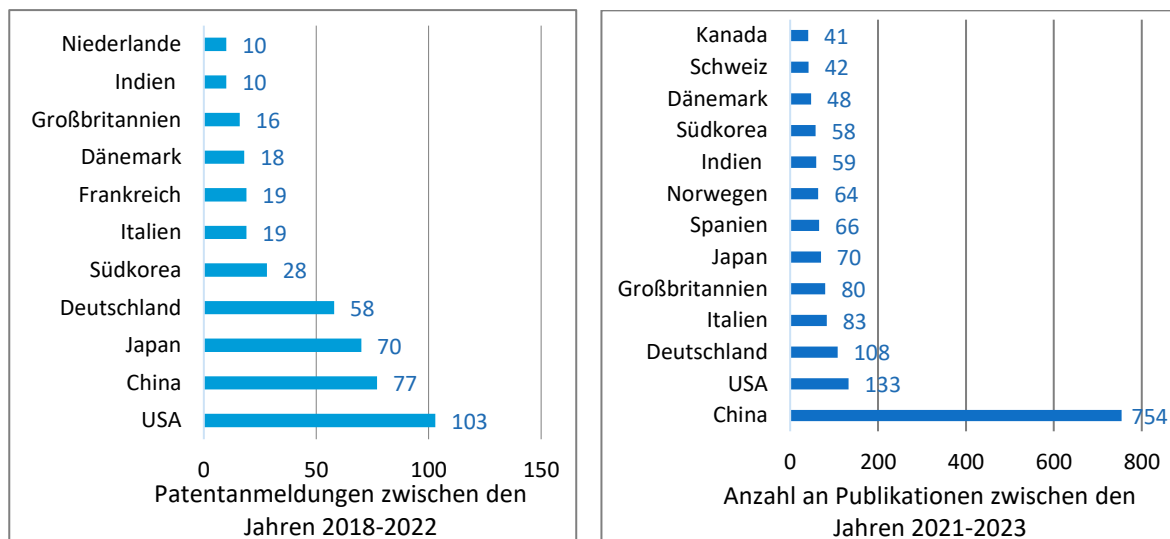


Abbildung 16: Patente (links) und Publikationen (rechts) in den jeweils am stärksten vertretenen Ländern, der Zeitraum der summierten Veröffentlichungen ist angegeben

Quelle: eigene Darstellung, IREES, Daten von Prof. Schmoch – Fraunhofer ISI

4 Relevanz in Forschung und Entwicklung

Zuerst wird ein allgemeiner Überblick über die anteilige Technologieförderung durch den Bund und auf europäischer Ebene gegeben, bevor die Förderung im Rahmen des Energieforschungsprogramms (EFP) dargestellt wird. Anschließend wird das Innovationssystem zu HT-WP in Deutschland aufgezeigt, mit einer Auswahl an wichtigen Akteuren.

4.1 FuE in Deutschland und der EU

Zu unterscheiden gilt zwischen länger zurückliegenden FuE-Phasen (in den 2000er Jahren) versus kurzfristig zurückliegenden (in den 2010er Jahren). Dafür werden die Projekte, die das Stichwort „Hochtemperatur-Wärmepumpe“ in ihrer Beschreibung enthalten aus der enArgus²¹ Projektdatenbank des BMW zu Hilfe gezogen. Dort sind die Verbünde als Einzelprojekte pro Verbundpartner hinterlegt. Insgesamt wurden seit 1990 76 Projekte gefördert, 75 vom BMW und eines vom BMBF. Aufgeteilt nach Jahrzehnten, wie in Abbildung 17 zu sehen, zeigt sich eine eher kurzfristig zurückliegende FuE-Phase mit einem großen Anstieg der Projektzahlen ab den 2010er Jahren. Dabei bekamen die meisten Projekte in Relation geringe Fördersummen unter 500 Tsd. €, während einige wenige mehrere Mio. € erhielten, sodass verschiedene Scale-ups der Technik in den Projekten zu erwarten sind, von Labormaßstab über Pilotanlagen bis hin zu Demonstrationsprojekten.

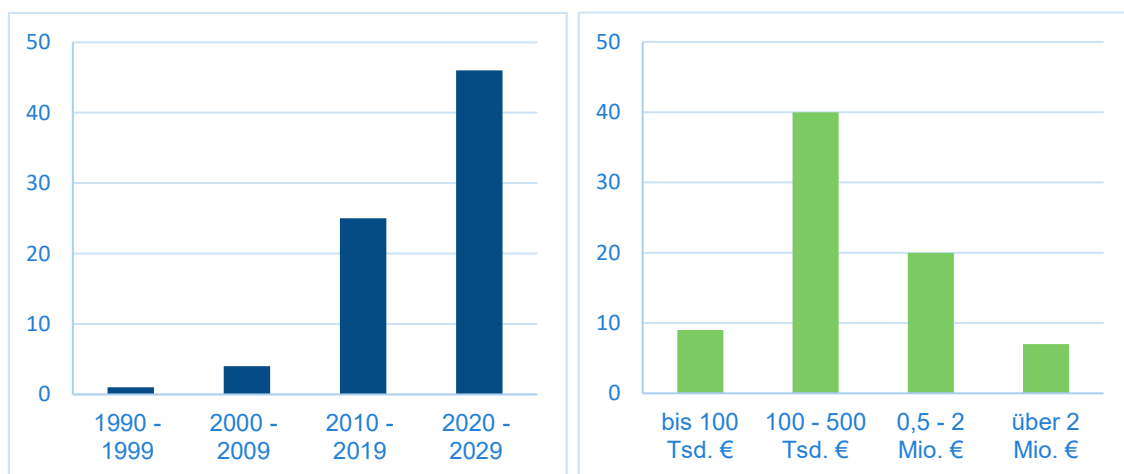


Abbildung 17: Anzahl der Förderprojekte zu HT-Wärmepumpen in der Projektdatenbank enArgus²¹ aufgeteilt nach Jahrzehnten (links) und nach Fördersummen (rechts)

Quelle: eigene Darstellung, IREES, Daten aus enArgus²¹ (Stand März 2024)

Gleichzeitig wurden in den Forschungsrahmenprogrammen der EU seit 1984 laut der Forschungsdatenbank CORDIS²² 169 Projekte zu HT-WP gefördert, wovon mit 105 Projekten

²¹ Projektdatenbank enArgus des BMWK rund um das Thema „Energieforschung“, Daten mit Stand März 2024: <https://www.enargus.de/>

²² Forschungsdatenbank CORDIS der EU-Kommission mit Projekten der Forschungsrahmenprogramme, zuletzt Horizon 2020 von 2014-2020 mit ca. 80 Mrd. € und aktuell Horizon Europe von 2021-2027 mit 95,5 Mrd. € Gesamtvolumen, Daten mit Stand Juni 2024: <https://cordis.europa.eu/projects/de>

62 % unter Beteiligung Deutschlands durchgeführt wurden. Auch auf globaler Ebene lässt sich anhand der Treffer bei Google Scholar²³ ein deutlicher Anstieg ab 2010 ablesen, mit einer 10-fachen Vergrößerung der Veröffentlichungen im Vergleich zum Jahrzehnt davor. Im Zeitraum 2020-2024 hat sich die Trefferzahl bereits verdoppelt im Vergleich zu den zehn Jahren davor. Damit zeigt sich ein großes globales Interesse an HT-WP, das sich in einer hohen Forschungsaktivität und ein Wachstum an Veröffentlichungen und Projekten niederschlägt. Die Aufteilung der EU-Projekte und Google Scholar Treffer über die Jahrzehnte ist in folgender Tabelle aufgeschlüsselt.

Tabelle 3: Übersicht der Projekte mit den Stichworten `high` `temperature` `heat` `pump` in ihrer Beschreibung aus der CORDIS²² Forschungsdatenbank der EU im Vergleich zu Google Scholar²³ Treffer zu `high temperature heat pump`

Start-Zeitraum	CORDIS EU-Forschungsdatenbank			Google Scholar
	EU-Projekte	Mit Beteiligung Deutschlands		Ungefähre Anzahl an Treffern
1984-2000	0	-	-	168
2000-2009	4	3	75 %	120
2010-2019	126	77	61 %	1.080
2020-2024	39	25	64 %	2.190
1984-2024	169	105	62 %	3.558

Quelle: Forschungsdatenbank CORDIS²² (Stand Juni 2024) und Google Scholar²³ (Stand August 2024)

Auch auf europäischer Ebene lässt sich ein Anstieg der Projekte ab den 2010er Jahren ablesen, insbesondere ab dem Jahr 2014 mit dem Start von Horizon 2020 als Rahmenprogramm (77 der 126 Projekte von 2010-2019). Gleichzeitig zeigt sich eine hohe Beteiligung Deutschlands an den Projekten, vor allem in der Anfangsphase in den Jahren 2000-2009 mit 75% und nachfolgend mit 61-64 %. Dadurch ist Deutschland als wichtiger Forschungspartner in der Entwicklung der HT-Wärmepumpe etabliert.

Es gab lange keine feste Definition zu dem Temperaturbereich der HT-WP und auch derzeit wird die IEA-Definition (HT-WP für Nutzwärme ab 100 °C) oft nicht eingesetzt. Daher adressieren einige WP-Projekte Gebäudewärme statt Industriewärme oder sind auf Temperaturbereiche deutlich unter 100 °C ausgelegt, auch wenn die Begriffsnutzung in ihrer Projektbeschreibung eine industrielle HT-WP suggeriert. Würde man somit die Projekttreffer auf die enge Definition der IEA eingrenzen, wird ein Großteil der Projekte aufgrund niedrigen Nutzwärmegrades und/oder nicht-industriellem Einsatz wegfallen. Daher wird im folgenden Unterkapitel der Fokus auf die Förderung im Rahmen des EFP gelegt und die Fokusprojekte diskutiert, die größtenteils von der IEA-Definition abgedeckt sind.

²³ Daten mit Stand 02.08.2024: <https://scholar.google.de/>

4.2 FuE im Rahmen des Energieforschungsprogramms

Im Rahmen des EFP zeigt die Darstellung der anteiligen Förderung der FuE-Arbeiten ähnliche Trends wie auf den deutschen und europäischen Ebenen: Die Fördermittelbeträge fallen eher klein aus und bewegen sich meist im Bereich von 100 bis 500 Tsd. Gleichzeitig ist eine steigende Anzahl an Projekten zu beobachten, wobei immer größere Verbünde entstehen. Allerdings gibt es auch einzelne Projektnehmer und kleine Mikroprojekte, die von diesen Fördermitteln profitieren.

Auch hier sind einige Projekte eher dem Gebäudebereich zuzuordnen oder haben Nutztemperaturen weit unter 100 °C. Eine Auswahl der Projekte, die gemäß der IEA-Definition den HT-WP zugeordnet werden können, reduziert die Projekte auf insgesamt 14. Eine tiefergehende Analyse dieser Projekte, basierend auf den veröffentlichten Projektberichten, liefert zusätzliche Einblicke in deren spezifische Merkmale und Ergebnisse. Dabei zeigt sich, dass sich einige FuE-Beteiligte im Laufe der Jahre an mehreren Projekten zusammen beteiligten. So konnten verschiedene Innovationsverbünde entstehen. Anfang der 2000er Jahre waren insbesondere FKW und das IfT-Hamburg zusammen aktiv. FKW führte zudem ein weiteres Projekt zur HT-Kompressionswärmepumpe mit Lösungskreislauf von 2013 bis 2017 durch. Anfang der 2010er Jahre traten thermea und GEA als bedeutende Akteure gemeinsam auf. In den 2020er Jahren kam es bisher zu keinen weiteren Überschneidungen.

Folgende Tabelle gibt eine Übersicht über sechs geförderte Hersteller aus insgesamt sieben abgeschlossenen EFP-Projekten zu HT-WP, ihre Fördersummen (FS) sowie ihren aktuellen Stand bzgl. WP-Serien im HT-Bereich. Dabei ist zu sehen, dass es bereits mit geringen Fördersummen zwischen 150-750 Tsd. € gelungen ist, eine spezifische Technik in die Anwendung zu überführen und langfristig neue Produktserien in den Markt zu bringen. Im Vergleich zu Tabelle 1 mit den im Annex 58 dargestellten deutschen Herstellern findet sich nur AGO Energie + Anlagen in beiden wieder. Dies zeigt, dass im EFP eher kleinere und mittlere Firmen im HT-WP Bereich gefördert wurden und Großkonzerne möglicherweise bevorzugen ihre eigenen Finanzmittel in die FuE von neuen Technologien zu investieren, mit denen sie flexibel und unabhängig ihre Projekte verfolgen können. Der Aufwand der Antragsstellung im EFP und insbesondere die Dauer bis zur Projektbewilligung und finalem Zuwendungsbescheid schreckt viele Firmen ab.

Zudem zeigt ein Auftragen der Projekte über die Zeit, dass es zu einer größeren Lücke in der Förderung der einzelnen Technologie zwischen 2004-2009 kam, da gerade in den 2000er Jahren die vorhandenen Förderbudgets im Effizienzbereich sehr gering ausfielen (Lösch et al. 2024). Somit konnte trotz des absehbaren Potenzials der industriellen WP, die Technologie aufgrund knapper Fördermittel nicht frühzeitiger gefördert werden. Andere Gründe für die Förderlücke könnten die entsprechenden EFP mit anderen Fokusthemen und Förderstrukturen sein.

Tabelle 4: Ausgewählte Hersteller aus abgeschlossenen EFP-Projekten mit Vorhabenbeginn in den Jahren 2000-2018 und ihr aktueller Stand (Juni 2024) bzgl. HT-WP

Hersteller	Projekttitel	Laufzeit	FS	Aktueller Stand
Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH (FKW)	Absorptions-Kompressions-WP für HT	02.2001 – 07.2003	172.155€	FKW wurde 2009 Teil der FH Hannover und 2020 aufgelöst (evtl. anderes Institut)
	Arbeitsfluid für HT-WP	07.2001 – 06.2003	131.184€	
Verum GmbH	Hochtemperatur-Wärmepumpe	09.2001 – 08.2003	255.208€	Verum wurde 2013 aufgelöst
Dürr thermea GmbH (heute: ENGIE)	Industrie-Hochtemperaturwärmepumpe mit NH3	09.2010 – 02.2014	250.201€	thermeco2-Wärmepumpenserie für HT-Bereich ²⁴
	Wärmepumpe: Ejektor	07.2012 – 10.2015	203.508€	
GEA Refrigeration Germany GmbH (GEA)	Industrie-Hochtemperaturwärmepumpe mit NH3	09.2010 – 12.2013	283.839€	WP-Serie GEA Grasso XHP mit GEA-Verdichtern ²⁵
STEFFEN HARTMANN RECYCLINGTECHNOLOGIEN GMBH (SHRT)	HT-Kompressions-Wärmepumpe mit Lösungskreislauf	11.2013 – 01.2017	746.043€	Angebot an industrieller Kühlung und WP-Technik ²⁶
AGO AG Energie + Anlagen (AGO)	HT Waermepumpe	10.2018 – 06.2022	483.109€	WP-Serien Calora ²⁷ (HT) & Congelo ²⁸
6 geförderte Hersteller	7 Projekte zu HT-WP und ihre Bestandteile	3 – 4 Jahre	150.000 – 750.000€	Mehrere WP-Serien

Quelle: eigene Darstellung, IREES, ausgewählte PtJ-Projektdaten zu HT-WP (Stand November 2023) sowie eigene Internet-Recherchen zum aktuellen Stand der Hersteller (Stand Juni 2024)

Gleichzeitig zeichneten sich die ersten drei Projekte zu HT-WP, die zwischen den Jahren 2001-2003 gefördert wurden, im weiteren Verlauf nicht als erfolgreich ab und die beteiligten Firmen wie FKW und Verum GmbH haben sich in den nachfolgenden Jahren aufgelöst. Dies zeigt, wie wichtig eine lückenlose und kontinuierliche Förderung einer einzelnen Technologie ist, um die TRL dieser voranzutreiben und sowohl Technologie als auch FuE-Beteiligte nachhaltig im Markt zu etablieren. Die negative Entwicklung der genannten Firmen könnte

²⁴ <https://www.engie-refrigeration.de/de/waerme/thermeco2-hochtemperaturwaermepumpen> (zuletzt geprüft am 11.11.2025)

²⁵ <https://www.gea.com/de/news/trade-press/2022/gea-at-chillventa-grasso-l-xhp-v-xhp/> (zuletzt geprüft am 11.11.2025)

²⁶ <https://www.steffenhartmann.info/de/das-unternehmen.html> (zuletzt geprüft am 11.11.2025)

²⁷ <https://www.ago-energie.de/thermotechnik/ago-caldora-industriewaermepumpe/> (zuletzt geprüft am 11.11.2025)

²⁸ <https://www.ago-energie.de/thermotechnik/ago-congelo-absorptionskaeltemaschine/> (zuletzt geprüft am 11.11.2025)

sich auch aus der nachfolgenden negativen Wirtschaftsentwicklung sowie geringen Gaspreisen und fehlendem Effizienzanreiz ergeben.

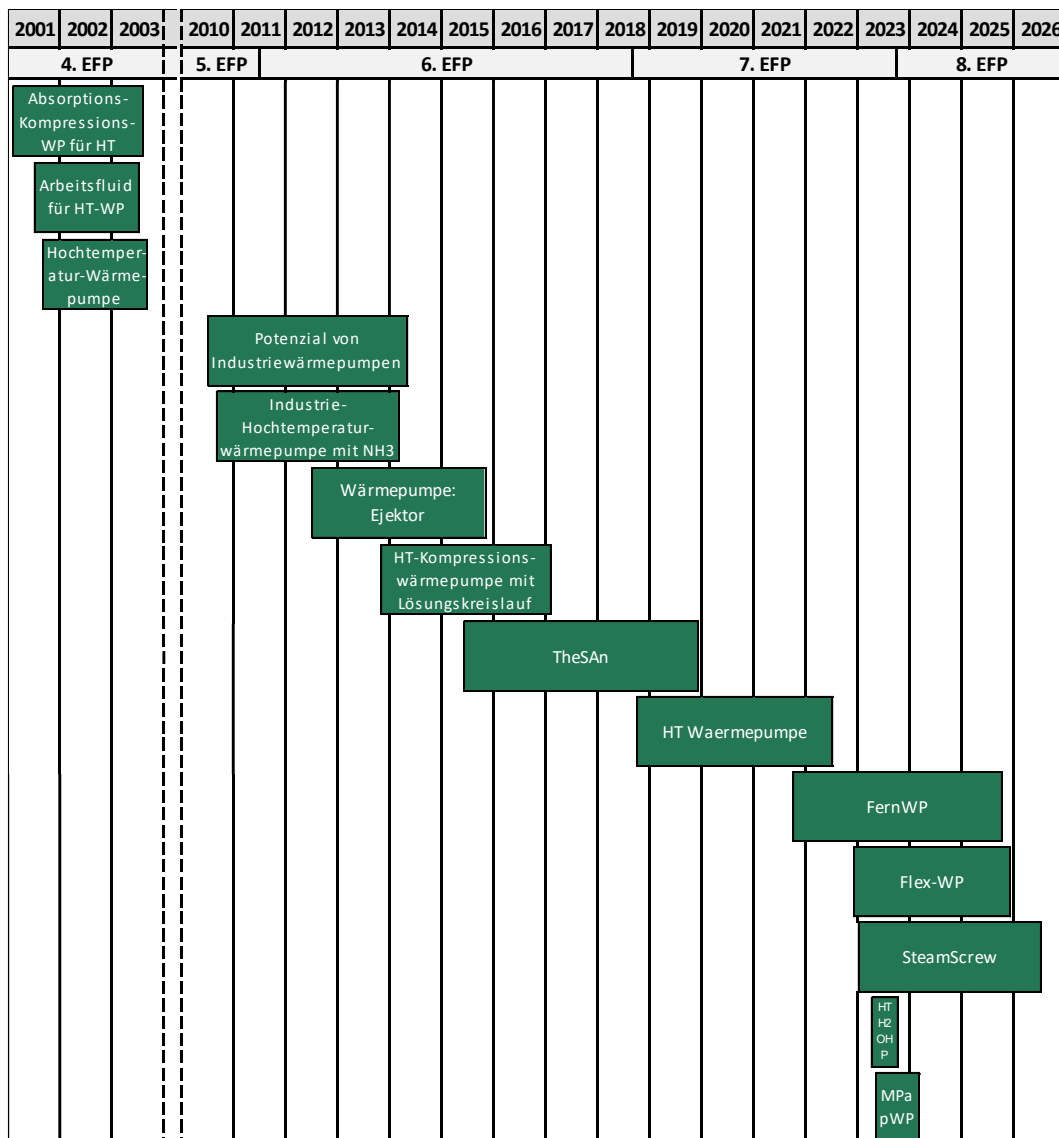


Abbildung 18: Übersicht & Zeitachse geförderter FuE-Projekte im EFP zu HT-WP

Quelle: eigene Darstellung, IREES, ausgewählte PtJ-Projektdaten zu HT-WP im EFP in Industrie und Gewerbe (Stand November 2023)

Hingegen war die Förderung Anfang der 2010er Jahre erfolgreich, sodass die beteiligten Firmen wie ENGIE (vormals thermea) und SHRT mittlerweile WP im höheren Temperaturbereich vermarkten. GEA hat auf Basis seiner etablierten Schrauben- und Kolbenverdichter ebenfalls WP-Systeme entwickelt. Zudem kamen von den wissenschaftlichen Projektpartnern einige Veröffentlichungen auf Basis der Projektergebnisse zustande, insbesondere der TU Braunschweig sowie der Universität Hannover. Ende der 2010er konnte AGO im Rahmen des EFP-Projekts *HT Waermepumpe* mehrere Patente anmelden und hat mittlerweile WP-Serien auf den Markt gebracht, von denen mehrere im Hochtemperaturbereich liegen und eine Senktemperatur von bis 150 °C erreichen.

In den 2000er und 2010ern geförderte Unternehmen sind mittlerweile erfolgreiche Hersteller im Wärmepumpenbereich und erschließen kontinuierlich immer höhere Prozesswärmebereiche. So wird durch die Energietechnologie HT-WP nicht nur ein immer größeres Effizienzpotenzial durch Abwärmenutzung erschlossen, sondern auch perspektivisch die Dekarbonisierung der Energieversorgung in Branchen mit Wärmebedarfen bis 200 °C ermöglicht.

Die Übersicht ausgewählter EFP-Projekte in Tabelle 5 zeigt die Entwicklung der Technik über die letzten zwei Jahrzehnte im Rahmen des EFP. Dabei ist ein stetiger Anstieg des Temperaturbereichs und der Leistungen abzulesen. Das laufende Projekt SteamScrew möchte bereits Senktemperaturen bis 200 °C erreichen. Zudem sind im Jahr 2024 die Projekte WinPro und IndHP2Chem gestartet, die beide die Integration von industriellen (HT-)WP in der Chemieindustrie erzielen möchten. Das neue Projekt E-Fryer möchte die Abwärme von industriellen Fritteusen mit integrierten HT-WP (COP 2,5) auf Prozesswärme von 190 °C für die Fritteusen aufwerten²⁹. Alles sind Verbundvorhaben aus Forschungsinstitutionen und Industrieunternehmen. Weitere Projekte setzen den Fokus auf Teilkomponenten der WP, wie das Verbundvorhaben HoVAG, in dem die Effizienz von Rohrbündelverdampfern für (HT-)WP großer Leistung erhöht werden soll. Zudem wird im Projekt CHASE die Kombination und Integration von HT-WP mit Latentwärmespeichern untersucht.

Tabelle 5: Verlauf der Projekte in Bezug auf Temperaturbereich, Temperaturhub, Leistung und COP

Ausgewählte Projekte	Laufzeit	Quell-T [°C]	Senk-T [°C]	T-Hub [K]	Leistung [kW]	COP	Quelle
Absorptions-Kompressions-WP für HT	02.2001-07.2003	42 °C	70 °C	28 K	27 kW	4,2	Abschlussbericht (FKW GmbH 2003)
Industrie-Hochtemperaturwärmepumpe mit NH ₃	09.2010-02.2014	31,6 °C	70,8 °C	39 K	430 kW	4,2	Abschlussbericht (Brauer et al. 2014)
HT-Kompressionswärmepumpe mit Lösungskreislauf	11.2013-01.2017	-	80-110 °C	-	100 kW	3-4	Abschlussbericht, genaue Daten vertraulich (Hartmann et al. 2017)
HT Wärmepumpe	10.2018-06.2022	-	bis 140 °C	-	ca. 1 MW	-	Abschlussbericht, weitere Werte geheim (Ramming 2022)
SteamScrew	01.2023-06.2026	80-120 °C	bis 200 °C	-	-	-	Ziel-Werte aus enArgus ³⁰
Mikroprojekt: HT-H ₂ O-HP	04.2023-09.2023	45-80 °C	200-250 °C	150-200 K	-	2-6	Ziel-Werte aus enArgus ³¹

Quelle: Abschlussberichte bei abgeschlossenen Projekten und enArgus bei laufenden Projekten

²⁹ <https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&q=%2201276595/1%22> (zuletzt geprüft am 11.11.2025)

³⁰ <https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&q=steamscrew&v=10&id=20290808> (zuletzt geprüft am 11.11.2025)

³¹ <https://www.enargus.de/detail/?id=26468524> (zuletzt geprüft am 11.11.2025)

4.3 Verankerung der Technik im 8. Energieforschungsprogramm

Im neuen 8. Energieforschungsprogramm (8. EFP) sowie in der zugehörigen Förderbekanntmachung wird die HT-WP, sowie die Industrie- und Groß-WP an vielen Stellen adressiert. Zudem ist sie Teil der Sprinterziele 2030 der Mission Wärmewende (BMWK 2023):

*„Bis 2030 werden in Industrieprozessen Hochtemperatur-Wärmepumpen genutzt, die Prozesswärme **über 300 °C** bereitstellen können.“*

- 8. Energieforschungsprogramm zur angewandten Energieforschung – Forschungsmissionen für die Energiewende (BMWK 2023)

Die *Mission Wärmewende 2045* geht vor allem im *Programmziel 2 - Wärme- und Kälteversorgung in Industrie und Gewerbe defossilisieren und effizienter machen* ausführlich auf Industrie-, Groß- und HT-WP für die niedrigen bis mittleren Temperaturbereiche und ihre FuE-Lücken für eine breite Anwendung ein. Dabei wird die Weiterentwicklung der HT-WP für höhere Nutztemperaturbereiche >200 °C explizit adressiert. Das 8. EFP soll zudem die FuE für variable Temperaturhübe, größere Leistungen und klima- und umweltfreundliche Kältemittel unterstützen sowie die Anwendung in Demonstrationsprojekten unter industriellen Bedingungen ermöglichen. So soll die HT-WP zu einer der Schlüsseltechniken des mittleren Temperaturbereichs >200 °C werden. Zudem soll der Hochlauf von Industrie- und Groß-WP bis 200 °C gestärkt werden, indem generalisierende Auslegungs- und Betriebskonzepten erarbeitet werden, die den individuellen Auslegungsaufwand minimieren sollen. (BMWK 2023)

Auch die Förderbekanntmachung (FBK) zum 8. EFP greift die HT-WP explizit als Technologie zur Energiebereitstellung unter Kapitel 2.1.4 *Wärmepumpen und Kältetechnik* auf, in dem die Bundesregierung die Elektrifizierung der Wärme für Gebäuden, Wärmenetzen und Industrie durch WP fördern möchte. Dabei sollen für die Industrie-WP neben effizienteren und günstigeren Anlagenkonzepten, höheren Senktemperaturen >200 °C auch Methoden zur vereinfachten Auslegung, Planung und Investitionsentscheidung erforscht werden, damit das oben genannte Sprinterziel erreicht werden kann. (BMWK 2024)

Zusätzlich wird in der FBK WP oft ein Dreiklang aus (i) defossilisierter Energiequelle (z.B. Abwärme, Solarthermie, Geothermie), (ii) Wärmeausnutzung und (iii) Temperaturanhebung durch WP und Wärmespeicher genannt. Eine klimaneutrale Wärmeversorgung wird nur mit allen drei Komponenten gelingen, sodass FuE von integrierter und kombinierter Wärmenutzung und -speicherung als Fokus erwähnt wird. Des Weiteren wird der Einsatz von WP 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 stärken. (BMWK 2024)

Das Anwendungs- und Entwicklungspotenzial von HT-WP für industrielle Anwendungen wurde somit im 8. EFP klar erkannt. Neben der Förderung des Gesamtkonzepts sind insbesondere die Weiterentwicklung essenzieller Komponenten wie Verdichter und Kältemittel sowie methodische Ansätze für eine breite Anwendung entscheidend. Um die ambitionierten Ziele bis 2030 zu erreichen, sind erhebliche zusätzliche FuE-Anstrengungen und eine langfristig verlässliche öffentliche Förderpolitik notwendig.

5 Energiewirtschaftliche Bedeutung und weitere Effekte

Die HT-WP ist eine strombasierte Technik, die fossil befeuerte Wärmetechniken ersetzen kann und so ein erhebliches THG-Minderungspotenzial hat. Dabei nutzt sie industrielle Abwärmeströme, diese ungenutzte Wärme kann jedoch aus einer Vielzahl von Energieträgern stammen, unter anderem fossiler Art. Der betroffene Endenergiebedarf in Deutschland sowie nationale und europäische Energieeinsparpotenziale und THG-Minderungspotenziale der betrachteten Technik werden im Folgenden kurz dargestellt.

Insgesamt belief sich im Jahr 2012 das technische Potenzial zur industriellen *Wärmebereitstellung* in der deutschen Industrie kumuliert bis zu einer Senktemperatur von 140 °C durch Wärmepumpen auf 600 PJ/a, wobei auf den Hochtemperaturbereich zwischen 100–140 °C knapp 190 PJ/a entfallen. Dabei liegen die größten Einsatzpotenziale in der Nahrungsmittelindustrie (84 PJ/a zwischen 100–140 °C) und der Chemieindustrie (85 PJ/a), wie in Tabelle 6 zu sehen. Auch *Trocknungsprozesse* in der Papierindustrie, der Metallverarbeitung, im Maschinenbau sowie in den Gummi-, Kunststoff- und Holzindustrien zeigen hohe Einsatzmöglichkeiten. (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015; Wolf et al. 2012)

Tabelle 6: Technisches Potenzial zur Wärmebereitstellung durch Wärmepumpen nach Wirtschaftszweig und Temperaturniveau (kumuliert bis 100 °C bzw. bis 140 °C und für den Bereich 100–140 °C)

Wirtschaftszweig	Endenergie [PJ]		
	< 100 °C	< 140 °C	100–140 °C
Ernährung und Tabak	61	145	84
Fahrzeugbau	40	40	0
Grundstoffchemie	47	132	85
Maschinenbau	50	53	3
Papiergewerbe	145	145	0
Sonstige Wirtschaftszweige	72	86	14
Gesamt	415	601	186

Quelle: (Öko-Institut e.V. und Fraunhofer ISI 2015; Wolf et al. 2012)

In einer Studie des Fraunhofer ISI von 2017 werden die thermische Ausgangsleistung, die bereitgestellte thermische Energiemenge und der vermiedene Primärenergieeinsatz durch den Einsatz effizienter industrieller WP mit Vorlauftemperaturen >100 °C und mind. 100 kW thermischer Leistung in den nächsten Jahrzehnten berechnet, abhängig von verschiedenen Szenarioräumen der Energiewende (DE_80 % vs. DE_95 %)³². Dabei können bei einem

³² Die Szenarienbereiche DE_80 % vs. DE_95 % gehen jeweils von einer Bandbreite von Szenarien aus, die die jeweilige Reduktionswelt in Bezug auf das 1,5 Grad Ziel für Deutschland darlegen. Dabei werden unterschiedliche Langfrist-Energieszenarien zugrunde gelegt, siehe Teilbericht 1 – Kriterienraster zur Bewertung der Technologien innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende von Viebahn et al., 2017: <https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/637d4589-75de-41e0-acdc-e77d335b5d7e/content>

weniger ambitionierten Szenario (DE_80 %) im Jahr 2030 2 GW thermische Ausgangsleistung für eine bereitgestellte thermische Energiemenge von 24,8 PJ installiert sein, sodass 5,5 PJ/a an Primärenergie durch den Ersatz fossiler Brenner vermieden werden³³, während es im Jahr 2040 bereits 3,3 GW an Leistung für 41,4 PJ Energie sind, womit 9,4 PJ/a Primärenergie vermieden werden. In einem ambitionierteren Szenario (DE_95 %) wären es sogar 6,4 GW Leistung für 80,6 PJ an Energie mit einer eingesparten Primärenergiemenge von 18,3 PJ/a im Jahr 2030, was auf 13,4 GW Leistung, 168,5 PJ Energiemenge und 40,4 PJ/a Primärenergieeinsparung im Jahr 2040 anwächst. Damit können 0,6-2,1 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 2030 und 1,1-5,2 Mio. t CO_{2äq} im Jahr 2040 durch den Ersatz von fossiler Brennertechnik eingespart werden³⁴. (Hirzel 2017)

Auf europäischer Ebene könnten HT-WP im Temperaturbereich von 100 °C-200 °C etwa 1.830 PJ/a und somit ca. 26 % des gesamten Prozesswärmebedarfs der Industrie abdecken. Da sie dabei vor allem Erdgas-nutzende Wärmebereitstellung ersetzt, beläuft sich die potenzielle CO₂-Reduzierung auf ungefähr 95 Mio. t/a. Die größten Wärmeeinsätze und somit THG-Minderungspotenziale liegen in den Sektoren Zellstoff und Papier, Lebensmittel und Getränke, Chemie, nichtmetallische Mineralien und Maschinenbau. (Sintef 2020)

Laut einer Studie von Marina et al. können Industrie-WP in der EU28 ein Marktpotenzial von 547 PJ/a bis 150 °C bzw. 641 PJ/a bis 200 °C abdecken, mit einer kumulativen Wärmeleistung von 20 GW bzw. 23 GW, wobei die Hälfte der WPs eine thermische Leistung unter 10 MW hat. Dabei wurde eine bottom-up Analyse durchgeführt, die sich auf Papier-, Chemie-, und Lebensmittelindustrien sowie Raffinerien konzentriert. Im Bereich bis 200 °C liegen die größten kumulativen Wärmeleistungen im Chemiesektor mit 9,1 GW und dem Papiersektor mit 7,9 GW. Durch Industrie-WP können 528 PJ/a an Endenergie eingespart werden, was bei einem vollständig dekarbonisiertem Stromsystem zu einer Reduktion von 52,6 Mt/a an CO₂ und von 724 PJ/a an fossilen Energien führt. Insgesamt können 73 % bis 150 °C bzw. 57 % bis 200 °C des Prozesswärmebedarf werden, wobei der Prozesswärmebedarf im Vergleich zu anderen Studien deutlich geringer eingeschätzt wird³⁵. (Marina et al. 2021)

³³ Der Primärenergiefaktor für konventionellen Strom, der nach und nach durch erneuerbaren Strom ersetzt wird, wurde für 2030 auf 2,75 und für 2040 auf 2,65 festgelegt. Durch die hohen Faktoren fällt der vermiedene Primärenergiebedarf durch WP klein aus. (Viebahn et al. 2017).

³⁴ Der Bereich der Einsparungen bewegt sich zwischen beiden Szenarioräumen. Als Referenz wurde ein Gas-Kessel zugrunde gelegt. Der Emissionsfaktor von konventionellem Strom zwischen 820-920 g CO₂/kWh (2030: 873 g | 2040: 838 g) wurde sowohl für die Energieeinsparungen als auch für den Strommehrverbrauch durch WP angesetzt worden. Bei einem zugrunde gelegten Gasheizsystem mit einem Emissionsfaktor von ca. 200 g CO₂/kWh, kommt es bei einer elektrisch betriebenen WP erst bei einem COP von 4 zu Emissionsminderungen. Somit fallen die CO₂-Einsparungen bei WP niedrig aus.

³⁵ Marina et al. berechnen 1123 PJ/a bis 200 °C an Prozesswärme in den vier genannten Industriesektoren in der EU28 im Vergleich zu 2733 PJ/a in einer Studie von Rehfeld et al. aus dem Jahr 2016 zur gesamten Industrie in der EU28+3 (Rehfeld et al. 2016).

Die HT-WP kann zukünftig eine steigende energiewirtschaftliche Rolle einnehmen, indem sie hilft Energieeinsparung durch Energieeffizienz hochzuskalieren. Ihre wachsenden Potenziale liegen in Zukunft in:

- Senkung von Lastspitzen und Flexibilisierung mithilfe zeitlicher Verlagerung des Bedarfs und/oder die Kopplung mit einem thermischen Speicher
- Modularität einiger Anlagenkonzepte ermöglicht einen flexiblen Ausbau sowie Steuerung im Betrieb für unterschiedliche und schwankende Anforderungen bezüglich Temperaturniveau und Wärmeleistung, insb. bei gestaffelten Wärmesenken mit abfallenden Wärmeanforderungen
- Möglichkeit der Kopplung an Energiespeicher und andere Wärmequellen wie Geothermie
- Kostensenkung bei Kopplung von Heizen und Kühlen
- Anerkennung und Erhöhung des wirtschaftlichen Werts der Abwärme
- Digitalisierung bietet eine flexible Nutzung verschiedener Wärmequellen sowie eine flexible Generation von Nutzwärme (sowie Nutzung des Wärmespeichers)

Die Dynamik des Energieeinsparpotentials von HT-WP wird in den 2040er Jahren eher stagnieren, da die potenziellen Anwendungen bereits in den 2030er größtenteils ausgeschöpft sein werden. Auch das THG-Minderungspotenzial wird bis dahin ausgeschöpft sein und ist bis zur Klimaneutralität im Jahr 2045 nur über die Stromerzeugung steuerbar. Zudem ist bei einer eher konstant bleibenden Bevölkerung mit eher regressivem Konsum und wachsender Circular Economy von wenig neuen Anwendungspotenzialen auszugehen. Dennoch gibt es solche in Entwicklungs- und Schwellenländern, die eine wachsende Industrie und somit steigenden Prozesswärmebedarf aufweisen. Gleichzeitig wird die Entwicklung der HT-WP für höhere Prozesswärmebereiche über 300 °C neue Potenziale erschließen können, wobei in diesem Temperaturbereich die Konkurrenztechniken wie der Elektrodenkessel und Alternativen wie die Wasserstoffbefeuerung schneller auf dem Markt kommen und somit das Anwendungspotenzial in den nächsten Jahren drastisch verringern werden. Je nach Lebensdauer der Konkurrenztechnik, kann sie beim nächsten Lebenszyklus durch eine HT-WP ersetzt werden, wenn die Kosten in der Zwischenzeit gesunken sind.

Generell ist bei Wärmepumpen der potenzielle Rückgang von Abwärmemengen zu beachten, sodass die Nutzungspotenziale für Wärmepumpen in Zukunft sinken könnten. Durch die Reduzierung der Abwärmemengen durch Temperaturniveausenkung, andere Effizienzgewinne sowie die Elektrifizierung von Prozessen könnten die vorhandenen Abwärmemengen zur weiteren Verwertung zukünftig deutlich sinken.

6 Funktionalität des Innovationssystem in Deutschland

Das Konzept des Technik-Innovationssystems zeigt auf, dass der Technologie- und Informationsfluss zwischen Menschen, Unternehmen und Institutionen der Schlüssel zu einem innovativen Prozess ist. Es umfasst die Interaktionen zwischen den erforderlichen Akteuren, um eine Idee in eine Technologie oder ein Verfahren auf dem Markt umzusetzen. (Carlsson und Stankiewicz 1991)

Das Innovationssystem der HT-WP ist in Tabelle 7 gezeigt. Die HT-WP hat den Eintritt in viele Erstanwendermärkte in Deutschland gefunden, nachdem ihre *Forschung und Entwicklung* durch BMW, BMBF und EU vorangetrieben wurde (vgl. Kapitel 3.1 und 3.2). Insbesondere durch das EFP wurde in Verbundprojekten mit Konsortien aus angewandten Forschungsinstituten, Herstellerunternehmen und potenziellen Anwendern eine Reihe von Pilotanlagen und ersten kommerziellen Anlagen gefördert. (vgl. Kapitel 3.2 und 3.3). Zudem hat der Bundesverband Wärmepumpen e.V. HT-WP in seinen Kompetenzbereich eingegliedert. Mittlerweile haben einige *Hersteller*, sowohl KMU als auch Großkonzerne, die Technologie in ihre Produktion aufgenommen, wie ENGIE und Siemens Energy, sodass zukünftig ein Kosten- und Entwicklungswettbewerb zu erwarten ist.

Durch die gestiegenen Energiepreise gibt es mehr Anreize für *Anwender*, am Standort anfallende Abwärme vor Ort zu nutzen, da Abwärme vermehrt wirtschaftlich nutzbar wird und HT-Wärmepumpen somit in Deutschland ein großes Marktpotenzial verleihen. Dennoch konnten bis ins Jahr 2023 erst 60 MW Leistung an Großwärmepumpen (WP mit mind. 500 kW pro Einheit) installiert werden, aufgrund von umfassenden Planungs- und Genehmigungsverfahren sowie Fehlanreizen wie durch das Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz (KWKG) und weiteren Gesetzen sowie höhere Abgaben auf Strom im Vergleich zu Erdgas³⁶. Diese Fehlbegünstigungen bremsen den Markthochlauf, jedoch könnten sie durch eine Reform der Förderlandschaft und durch gezielte Maßnahmen und Anreize beseitigt werden, um die Nachfrage und somit ebenfalls die Marktdiffusion zu erhöhen. (Agora Energiewende und Fraunhofer IEG 2023; Agora Industrie und FutureCamp 2022).

Der *Ordnungsrahmen* für die Diffusionsförderung durch Aufnahme in Policy-Kontexten ist angelaufen, u. a. in Form von Investitionsförderprogrammen des Bundes. Die Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft (EEW) zählt explizit Wärmepumpen als Fördergegenstände in Industrie und Gewerbe auf und die Bundesförderung für effiziente Wärmenetze (BEW) fördert Großwärmepumpen für die Fernwärme.

³⁶ KWK-Anlagen profitieren auch nach der Abschaffung der allgemeinen EEG-Umlage und den KWK- sowie Offshore-Umlagen für WP weiterhin von mehreren Steuerbefreiungen im Vergleich zu WP-Anlagen: Steuerentlastungen für in KWK-Anlagen eingesetztes Erdgas oder andere Brennstoffe (§53a EnStG), Befreiungstatbestände bei der Stromsteuer für mit KWK erzeugten Strom (§ 9 StromStV), Förderung für KWK-Strom für den Eigenverbrauch oder die allgemeine Netzversorgung (§ 7 KWKG), Eigenverbrauchsstrom wird von Netzentgelten und Netzzulagen weitgehend befreit und zum Teil für die vermiedene Netznutzung vergütet (§ 18 StromNEV), während hocheffiziente KWK-Anlagen vollständig von Energiesteuern befreit sind. (Agora Industrie und FutureCamp 2022).

Tabelle 7: Auswahl zentraler Akteure im Bereich HT-WP in ihrem Innovationssystem

Forschungsförderung und Diffusionsförderung (Auswahl) <ul style="list-style-type: none"> • BMW-Energieforschungsprogramm (EFP) mit Forschungsfeld zu Wärmepumpen- und Kältetechnik im Forschungsnetzwerk Energie in Industrie und Gewerbe (FNE IuG) • Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) für KMU bei der AIF • EU-Kommission Forschungsrahmenprogramm (Horizon 2020, jetzt Horizon Europe) • DFG-Forschungsförderung • Bundesförderprogramme für Energieeffizienz-Investitionen, z.B. für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft (EEW) und für effiziente Wärmenetze (BEW) 	
Wissenschaft und angewandte Forschung (Auswahl) <ul style="list-style-type: none"> • DLR-Institute für Technische Thermodynamik und für CO₂-arme Industrieprozesse • Fraunhofer-Institute für Energieinfrastrukturen und Geothermie (Fh IEG) und für Solare Energiesysteme (Fh ISE) • TU Dortmund, Universität Stuttgart, KIT Karlsruhe, RWTH Aachen • Hochschule Karlsruhe (HKA) 	
Hersteller von HT-WP (Auswahl) <p>Konzerne, Großunternehmen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Siemens Energy • Atlas Copco <p>Mittelgroße, spezialisierte Hersteller</p> <ul style="list-style-type: none"> • ENGIE • GEA Refrigeration Germany • AGO GmbH Energie + Anlagen 	Intermediäre (Auswahl) <ul style="list-style-type: none"> • Normung durch DIN und VDI-Richtlinien (z.B. DIN EN 378) • Contracting-Unternehmen wie Uniper, ENGIE, Iqony und ICS Cool Energy • Risikokapital-Unternehmen • Fortbildungs-Institutionen wie VDI
Anwender von HT-WP (Auswahl) <p>Industriebranchen und branchenspezifische Anwendungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nahrungsmittelindustrie (Sterilisieren, Trocknen, Pasteurisieren, Kochen, Eindampfen) • Papierindustrie (Bleichen, Kochen, Trocknen) • Chemieindustrie (Sieden, Aufkonzentrieren, Destillieren, Kochen) • Textilindustrie (Waschen, Trocknen, Färben) • Holzindustrie (Pressen, Trocknen) • Trocknungsprozesse in Metallverarbeitung, Gummi und Kunststoff sowie Maschinenbau 	

Quelle: eigene Darstellung, IREES

Auch *Intermediäre* wie Normungsgeber, Risikokapital- und Contracting-Unternehmen sind aktiv, befinden sich aber weiterhin im Aufbau, um höhere Temperaturbereiche abzudecken. Der VDI hat eine neue Richtlinie für Großwärmepumpen für Gewerbe, Industrie und Quartiere im Entwurf veröffentlicht (VDI 4646 E)³⁷. Zudem gibt es ein wachsendes Angebot an

³⁷ <https://www.vdi.de/news/detail/grosswaermepumpen-fuer-gewerbe-industrie-und-quartiere> (zuletzt geprüft am 11.11.2025)

Fortbildungen zu Industrie-WP z.B. beim VDI. Zudem wurde die Technik in die Inhalte von allgemeineren Industrieabwärme-Beratungen und -Weiterbildungen aufgenommen.

Gleichzeitig sind auch andere Industrieländer stark in der Entwicklung von WP-Technologien vertreten und bauen ihren HT-Bereich aus. Insbesondere Japan, Norwegen und Frankreich zeigen starke Herstellerlandschaften (siehe Kapitel 4.2). Somit ist auch auf globaler Ebene ein Wettbewerb zu erwarten. Dieser wird jedoch durch internationale Unterschiede in den Sicherheitsbestimmungen und Genehmigungsverfahren erschwert, vor allem aufgrund toxischer Kältemittel (ACEEE 2024). Daher sind internationale Übereinkommen sowie Vereinheitlichungen (z.B. zu Kältemitteln) essenziell für den Außenhandel und die globale Entwicklung der deutschen WP-Technologien.

Neben dem neuen 8. EFP (vgl. Kapitel 4.3) wird die HT-WP auch im kombinierten Förderprogramm *Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft* von BAFA und KfW im Rahmen der Förderung des *Modul 4: Energie- und ressourcenbezogene Optimierung von Anlagen und Prozessen – Premiumförderung und Dekarbonisierungsbonus*³⁸ gefördert. Somit wurde ihre Schlüsselrolle und ihr Potenzial für eine Dekarbonisierung der Prozesswärme erkannt. Daher gilt es eine steigende Zahl an Projekten zu fördern, die einerseits die Nutztemperaturen der HT-WP erhöhen und andererseits ihre Anwendung in weiteren Branchen ermöglichen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Zahl der Hersteller- und Anwenderunternehmen in Deutschland stetig ansteigt. Gleichzeitig wachsen auch die Intermediäre und der Ordnungsrahmen mit, während Wissenschaft und Forschung kontinuierlich neue Temperaturbereiche erreichen. Das Zusammenspiel der Akteure ist exemplarisch in Abbildung 19 aufgezeigt. Somit ist das Innovationssystem bereits aufgebaut und aktiv, befindet sich jedoch weiterhin in der Entwicklung, um zusätzliche Anwendungen und Temperaturen zu erschließen. Weiterhin ist es essenziell, Resilienz durch Technologieinnovationen aufzubauen und den technischen Entwicklungsvorsprung zu bewahren und weiter auszubauen, um im globalen Wettbewerb bestehen zu können.

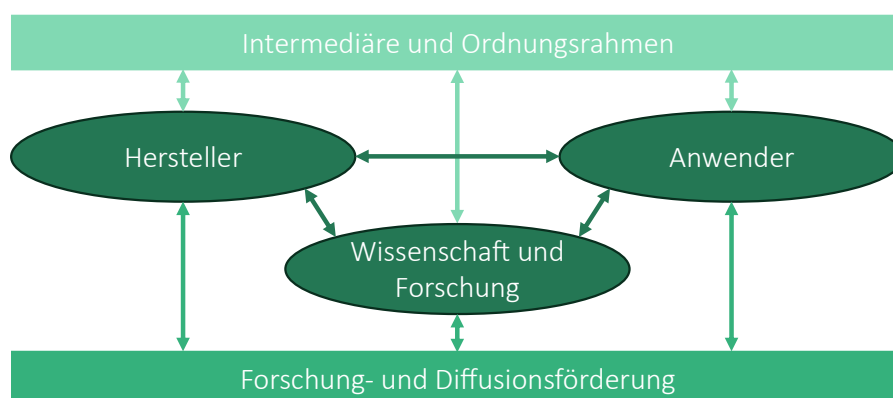


Abbildung 19: Vernetzung und Zusammenspiel der Akteure für Innovationsfortschritt

Quelle: eigene Darstellung, IREES

³⁸ https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Energieeffizienz_und_Prozesswaerme/Modul4_Energiebezogene_Optimierung_Premiumfoerderung/modul4_energiebezogene_optimierung_premiumfoerderung_node.html (zuletzt geprüft am 11.11.2025)

7 Erforderlicher FuE-Bedarf

Der erforderliche FuE-Bedarf bezieht sich zum einen auf die zu lösenden technischen Herausforderungen sowie auf die Steigerung der TRL in den Temperaturbereichen über 160 °C, um Pilot- und Demonstrationsprojekte zu realisieren. Dabei gilt es die technischen Eigenschaften (siehe Kapitel 3.1 und 3.2) zu verbessern, um die Anwendungspotenziale auszunutzen (siehe 3.3) und zu erhöhen und gleichzeitig den internationalen FuE-Wettbewerb (siehe 3.5) zu meistern. Dies wird abschließend in FuE-Entwicklungszielen aggregiert.

7.1 FuE-Bedarf für Pilot- und Demonstrationsprojekte

Eine Lösung der technischen Herausforderungen ist für die Anwendung von HT-WP essenziell, wobei sich die Herausforderungen vor allem auf den Verdichter, die Wahl des Kältemittels und die Auslegung der WP bzw. die Optimierung des Designs konzentrieren (Fleckl et al.; Hirzel 2017). Verdichter gelten als wichtigste Komponente von WP, da sie durch die Kompression des Kältemittels die anschließende Kondensation des Kältemittels und somit den Temperaturhub des Abwärmestroms ermöglichen. Bei der Kompression des Kältemittels wird externer Energieeintrag, meist in Form von Strom, benötigt, sodass der Verdichter zudem die Stellschraube für die Leistung sowie die Energieeffizienz des Gesamtsystems darstellt. Gleichzeitig setzt das Kältemittel mit seinen Eigenschaften die Grenzen des Anwendungsbereiches, siehe Abbildung 20, vor allem für die maximale Senkentemperatur durch den kritischen Temperaturpunkt³⁹.

Kältemittel	T _{krit} [°C]	p _{krit} [bar]	GWP [-]	Wärmequellen- und Wärmesenkentemperaturen [°C]																									
				-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
R-718 Wasser	373,9	220,6	0																										
R-601 Pentan	196,6	33,7	5																										
R-600 Butan	152,0	38,0	4																										
R-744 CO ₂	31,0	73,8	1																										
R-717 Ammoniak	132,3	113,3	0																										

Abbildung 20: Charakteristika ausgewählter Kältemittel und ihre Anwendungsbereiche³⁹

Quelle: eigene Darstellung, basierend auf (Zühlsdorf et al. 2023)

WP für industrielle Großanwendungen (>10 MW) unter 100 °C haben oft sehr lange Lieferzeiten von 16-24 Monaten. Dabei gilt es nicht nur die Herstellung zu standardisieren und zu beschleunigen, sondern auch die wichtigen Komponenten zu optimieren. Zum einen müssen die technischen Anforderungen verschiedener Anwendungen wie das Druckniveau oder auch die Temperaturbeständigkeit von Materialien wie Dichtungen und Schmierungen erfüllt werden. Zum anderen muss der Verdichter möglichst energieeffizient und beständig ausgelegt werden, insbesondere der Motor und seine Kühlung. Der Wirkungsgrad bzw.

³⁹ Die untere Grenze des Anwendungsbereichs eines Kältemittels bestimmt die minimale Quelltemperatur und ist durch die Siedetemperatur bei 1 bar definiert. Die obere Grenze legt die maximale Senkentemperatur fest und liegt 15 K unter der kritischen Temperatur für eine unterkritische Kondensation. Ausnahmen sind CO₂/R744 (transkritisch bis 120 °C) und Wasserdampf/R718 (Dampfkompression). (Zühlsdorf et al. 2023).

Gütegrad⁴⁰ als Effizienzkennwert einer Wärmepumpe zeigt weiterhin Verbesserungspotenzial auf: Ein Gütegrad von 60-70 % wird bereits von Siemens Energy mit Turboverdichtern erreicht. In der Literatur hingegen werden oft Werte 45-50 % als Stand der Technik für den Gütegrad genannt. (Arpagaus et al. 2024; Hirzel 2017)

Bei den Kältemitteln zeichnet sich langsam eine Tendenz zu natürlichen Mitteln ab, da synthetische Mittel auch mit wenig Umweltauswirkungen (HFOs) in zukünftigen EU-Verboten adressiert werden könnten (Arpagaus et al. 2024). Daher streben viele Hersteller an, ihre Systeme von synthetischen Kältemitteln mit HFO-Basis⁴¹ auf natürliche Kältemittel umzustellen. Unterdessen ist bei großen HT-WP bei höheren Temperaturen (>120 °C und >10 MW) das bevorzugte Kältemittel Wasser (R-718) (Zühlsdorf et al. 2023). Gleichzeitig müssen mit natürlichen Mitteln ebenfalls die wichtigen Aspekte Dichtigkeit und Brennbarkeit neben der THG-Neutralität und der Erfüllung aller (zukünftiger) Sicherheits- und Umweltstandards abgedeckt werden (Hirzel 2017). Dabei gibt es kein Kältemittel, dass für alle Anwendungen geeignet ist, weshalb Verdichter auf verschiedene Kältemittel ausgelegt werden können, um die Wahl des Kältemittels als Designelement für den konkreten Einsatz zu nutzen. Dennoch wird die breite Anwendung von Kältemitteln im internationalen Handel durch regionale Unterschiede in den Sicherheitsbestimmungen und Genehmigungsverfahren erschwert, vor allem im Bereich der toxischen Kältemittel (ACEEE 2024). Daher sind internationale Übereinkommen sowie eine Vereinheitlichung der Kältemittel essenziell für den Außenhandel der deutschen WP-Technologien.

Beim optimierten Design ist die gemeinsame Auslegung verschiedener WP-Komponenten wie Wärmetauscher (z.B. für die Direktnutzung von kondensierenden Abgasen) und Kältekreiskonfigurationen (z.B. Verwendung von Ejektoren⁴²) wichtig, sowie ihr Zusammenspiel in der Anlagenkonstruktion. Auch hier gilt es die Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Gesamtanlage zu erhöhen, sowie eine Verbesserung der Leistungszahl (COP) und eine Erhöhung des Temperaturhubes zu erreichen. Dabei ist das hydraulische Design für eine optimale Druck- und Temperaturnutzung im Gesamtsystem essenziell, vor allem in komplexeren Systemen wie mehrstufigen WP-Anlagen für hohe Temperaturspreizungen über 100K oder Hybridwärmepumpen mit einer Kombination aus Kompression und Sorption, sodass hohe Drücke und Kältemittelverlust vermieden werden. Bei der Prozessintegration und Optimierung der Steuerung können Flexibilisierungskonzepte wie Automatisierung, Integration in Lastmanagementsysteme, dynamisches Verhalten oder auch die Einbindung in den

⁴⁰ Der Gütegrad errechnet sich aus dem Verhältnis des realen COP zum Carnot-COP. Der Carnot-COP bezeichnet das Verhältnis aus Senktemperatur zu Temperaturhub (alles in K).

⁴¹ HFO (= Hydrofluorolefine) gelten als umweltschonende Alternativen zu klassischen Kühlmitteln aus Fluorkohlenwasserstoffen (FKW). FKW haben ein Treibhauspotenzial (GWP) von bis zu 14.800, während das GWP von HFO nur 0,1 % im Vergleich zu FKW beträgt. Jedoch können Verluste während des Produktionsprozesses über halogenierte Kohlenwasserstoffe zu klimaschädlichen Wirkungen führen.

⁴² Der Ejektor arbeitet als Hochdruckregelventil, indem er die Expansionsarbeit ausnutzt, um einen anderen Massenstrom anzusaugen. Dadurch wird die Gesamteffizienz der HT-WP gesteigert, die Komplexität jedoch erhöht.

Systemverbund (Bindeglied Wärmequelle - Wärmesenke) verfolgt werden. Dabei sind die Entwicklung von HT-WP für die Dampferzeugung sowie mehrstufige WP-Systeme besonders vielversprechend für eine breitere industrielle Nutzung. (Hirzel 2017)

Insgesamt gilt es neben neuen Senktemperaturen auch höhere Temperaturhübe und Leistungszahlen (COP) zu erreichen, sowie Einzelkomponenten zu verbessern und das Gesamtsystem zu optimieren. Gleichzeitig wird es aufgrund der Lebensdauer von HT-WP von 15 Jahren zum Ende der 2030er eine erste Austauschwelle von derzeit eingebauten WP-Anlagen gegen effizientere Systeme geben. Dadurch wird der Druck auf die Wiederverwendbarkeit und Recyclingfähigkeit von WP-Komponenten steigen.

7.2 Entwicklungsziele für FuE

Die laufende FuE setzt ihre Schwerpunkte auf der Verbesserung der Effizienz, der Optimierung kompakter Systeme, der Kostenreduktion und der Erhöhung der Betriebstemperaturen, siehe Abbildung 21. Die Bedarfe werden ebenfalls in einer Umfrage bei verschiedenen Stakeholdern zur Weiterentwicklung von Industrie- und Großwärmepumpen in der Schweiz genannt⁴³: Auf Seiten der Hersteller werden Temperaturbereich (58 %), Kostenreduktion (42 %) und Effizienz (27 %) mit Abstand als FuE-Schwerpunkte identifiziert, während auf Seiten der Forschungseinrichtungen Kältemittel (46 %), Temperaturbereich (19 %) und Komponentenoptimierung (15 %) am häufigsten genannt werden (Wolf et al. 2017).

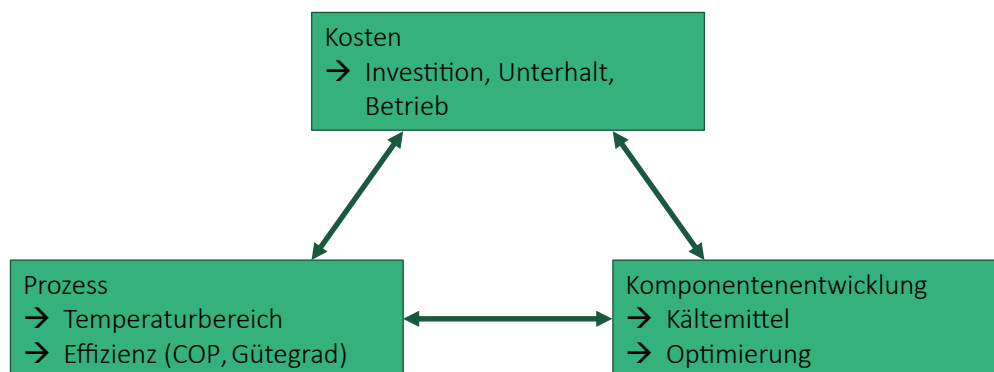


Abbildung 21: Darstellung der Schwerpunkte in der aktuellen FuE von HT-WP

Quelle: eigene Darstellung, IREES

Somit ist das relevanteste FuE-Ziel das Erhöhen des Temperaturbereichs und die Entwicklung von HT-WP mit Nutzttemperaturen über 200 °C bei möglichst hohem Temperaturhub von mind. 70 K und eine Steigerung der Leistungszahl von 20 % (Hirzel 2017). Dabei gilt es die Techniken im Labor- und Pilotmaßstab (siehe Kapitel 3.2) in ihrer Anwendung zu fördern. Das Energieforschungsprogramm (EFP) kann dabei eine wichtige Rolle spielen, da das 8. EFP

⁴³ Bei der Expertenbefragung durch Wolf et al nahmen 28 Stakeholder teil, davon sind 25 % Hersteller und 21 % aus der Wissenschaft. Für beide Seiten der FuE-Bedarfe (Hersteller und Forschung) gab es jeweils 26 Antworten. (Wolf et al. 2017).

die genannten Ziele ebenfalls verfolgt und als Sprinterziel die HT-WP mit 300 °C bis zum Jahr 2030 in industrieller Anwendung erklärt (siehe Kapitel 4.3).

Im EFP wird das Anwendungs- und Entwicklungspotenzial der HT-WP für industrielle Anwendungen erkannt. Zudem geht das 8. EFP und die zugehörige FBK nicht nur auf WP als Ganzes ein, sondern auch auf essenzielle Einzelkomponenten wie Kältemittel und Verdichter sowie auf methodische Konzepte, um eine möglichst einfache und breite Anwendung zu fördern.

Wie Kapitel 4.2 und Tabelle 5 aufzeigen, adressieren laufende Projekte höhere Temperaturhöbe und Senktemperaturen bis 200 °C und möchten die Integration von HT-WP in der Chemieindustrie sowie in der Lebensmittelbranche erreichen. Andere Projekte konzentrieren sich auf Teilkomponenten der WP oder untersuchen eine Kombination von HT-WP mit Wärmespeichern. Dabei wird in den meisten Projekten eine Reduktion der Betriebskosten durch Nutzung der Abwärme, Elektrifizierung oder Optimierung als Ziel genannt. Auch Modelle und digitale Zwillinge werden meist im Zusammenhang der Projekte erstellt. Somit werden die oben genannten FuE-Schwerpunkte bereits adressiert und ein Erreichen von 200 °C als Senktemperatur bis zum Jahr 2030 erscheint möglich.

Das Sprinterziel des 8. EFP, 300 °C als Senktemperatur bis zum Jahr 2030 in industriellen Demonstrationen zu erreichen, ist jedoch ambitionierter als die aktuelle FuE-Entwicklung. Dazu kommt ebenfalls eine Studie des Fraunhofer ISI, laut der marktreife HT-WP bis zum Jahr 2035 wahrscheinlich Temperaturen bis 300 °C erreichen werden und HT-WP-Systeme bis 200 °C mit knapp 40 MW existieren können (Fraunhofer ISI 2024). Das rechtzeitige Erreichen des Sprinterziels bis zum Jahr 2030 wird folglich nur mit erheblichen zusätzlichen FuE-Anstrengungen gelingen können. Daher müssten auch konkret für diesen Bereich entsprechende Fördermittel vorgehalten werden. Verlässlichkeit im Hinblick auf das Vorhandensein öffentlicher FuE-Förderung über ein individuelles Verbundvorhaben hinaus ist in diesem Kontext wichtig (Lösch et al. 2024).

8 Hemmnisse und fördernde Faktoren

Für eine erfolgreichen Diffusion der HT-WP gilt es bestehende Hemmnisse zu erkennen und gezielt zu lösen. Dabei existieren Hemmnisse sowohl in der Infrastruktur, der Wissensbasis und der Wirtschaftlichkeit. Hohe Kapitalkosten und fehlende Erfahrungen mit HT-WP sind wesentliche Hindernisse für eine rasche Diffusion. (Agora Industrie und FutureCamp 2022)

8.1 Hemmnisse in der Einführung und einer schnellen Marktdiffusion

Infrastrukturelle Hemmnisse

Die Anwendung von HT-WP erfolgt oft in Industrieprozessen mit bestehenden Strukturen, die bislang mit der Produktion wuchsen und ausgelegt wurden. Dabei treten neben technischen oft auch infrastrukturelle Hemmnisse wie Platzmangel sowie Hygiene- und Sicherheitsstandards (vor allem im Lebensmittel- und Pharmabereich) auf.

Die Integration von WP kann eine Rückwirkung auf den Prozess verursachen, sodass immer das Gesamtsystem betrachtet und optimiert werden muss. Dabei können zudem neue Anforderungen an bestehende Prozesse durch die Integration von HT-WP entstehen (z.B. die Anforderungen an die Dichtigkeit einer Trockenkammer verschiebt ihren Taupunkt). Dynamische Simulationsmethoden können die Prozessintegration von WP und mögliche Rückwirkungen gut abbilden und somit bei der Gesamtoptimierung des Systems sowie des Betriebs unterstützen. Daher werden ausgereifte Modelle für Betriebe in einem digitalisierten Umfeld (Industrie 4.0) eine wichtige Rolle spielen und sollten bereits jetzt in aktuelle FuE-Bemühungen mit eingegliedert werden. (Fleckl et al.)

Zudem müssen nicht nur Restriktionen bei der internen Infrastruktur überwunden werden, sondern auch externe in Bezug auf die Netzversorgung und die Emissionswirkung des Stromsystems. Klimaneutrale Prozesswärme muss auf einem defossilisiertem Stromsystem beruhen, dass nicht nur vollständig auf Erneuerbaren Energien beruht, sondern den zusätzlichen Strombedarf auch bedarfsgerecht abdecken kann. Für eine Elektrifizierung der Prozesswärme muss das Stromnetz sowie Netzanschlüsse ausgebaut werden, ohne dass der Stromsektor überlastet wird, siehe Abbildung 22. Der Vorteil der HT-WP liegt bislang bei ihren eher kleineren Leistungsgrößen, die nicht immer einen neuen Netzanschluss benötigen. Perspektivisch werden die eingesetzten Leistungen jedoch wachsen, sodass der Strom- und Netzbedarf ebenfalls steigt und die Randbedingungen des Integrationspunktes in das Gesamtenergiesystem mitgedacht werden müssen. (Agora Industrie und FutureCamp 2022)

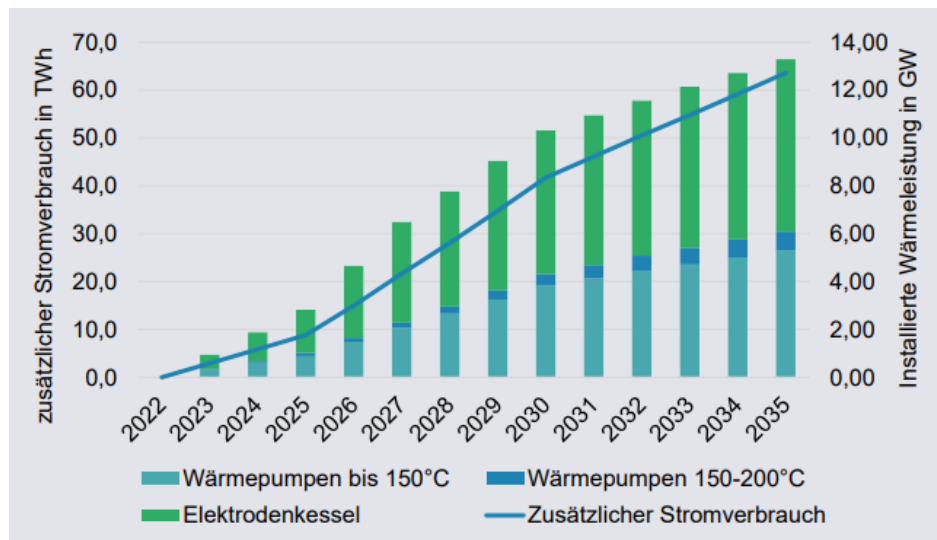


Abbildung 22: Installierte Leistung von elektrifizierten Wärmetechniken und ihr steigender Strombedarf über die Zeit bei einem ambitionierten Markthochlauf

Quelle: (Agora Industrie und FutureCamp 2022)

Wissensbasierte Hemmnisse

Neben technischen und infrastrukturellen Hemmnissen kann die Diffusion der HT-WP derzeit noch durch größere Wissenslücken gebremst werden. Die Integration in einer bestimmten Industriebranche erfordert Kenntnisse sowohl über die WP als auch über die betroffene Anwendung. Derzeit gibt es nur wenige Entscheidungsträger und technische Fachkräfte, die dieses kombinierte Wissen besitzen (Arpagaus 2020). Gleichzeitig fehlt vielen Anwendern das Verständnis über ihren Wärmebedarf, was die Identifizierung von möglichen Einsätzen von WP in ihren Systemen als zeitaufwendig gestaltet oder gar verhindert. Jedoch werden die Wissenslücken mit steigender Diffusion der WP abgebaut und es gilt, die Integration von HT-WP in neuen Branchen und Anwendungen zu fördern, um entsprechende Potenziale der Technik sowie zugehörige Fachkräfte aufzubauen.

Das nötige Wissen und Personal muss nicht nur in FuE und Anwendung aufgebaut, sondern über den ganzen Lebenszyklus einer WP erweitert werden. Somit muss neben Planung (Energieberatung, Ingenieurbüros, Consulting) und Herstellung das Wissen auch für die Montage, Inbetriebnahme sowie Wartung verbreitet werden, indem Fachkräfte dafür geschult und gefördert werden. Dabei muss das gesamte Innovationssystem zusammenspielen, da nicht nur Fortbildungsinstitutionen, FuE und Unternehmen gefragt sind, sondern entsprechendes Wissen auch bei Intermediären wie Normengebern und Kapitalgebern vorhanden sein muss, damit eine Technik in die Breite diffundieren kann. Durch Integrations-, Demonstrations- und Pilotprojekte kann die Erfahrung mit der Technik und das Vertrauen in sie aufgebaut werden.

Wirtschaftliche Hemmnisse

Für den erfolgreichen Markteintritt und die Diffusion von HT-WP sind erhebliche Kostensenkungen durch Skaleneffekte erforderlich. Dabei bieten WP bei niedrigen Temperaturen eine

klimafreundliche Wärmebereitstellung und sind bereits wirtschaftlicher als konventionelle Dampfkessel (siehe Kapitel 3.4). Jedoch existieren bislang nur wenige Pilot- und Demonstrationsprojekte, in denen die Zuverlässigkeit neuartiger HT-WP in einer industriellen Umgebung im bislang nicht etablierten Temperaturbereich $>160\text{ °C}$ langfristig nachgewiesen wurden. Eine begrenzte Anzahl von Demonstrationen über kurze Zeiträume reicht nicht aus, um eine neue Technik auf dem Markt einzuführen (Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe 2025). Für eine breite Marktdiffusion ist eine gute Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit entscheidend, damit die HT-WP so konsistent und kosteneffizient wie ein Gaskessel funktioniert und auch dementsprechend wahrgenommen wird. (Arpagaus et al. 2024)

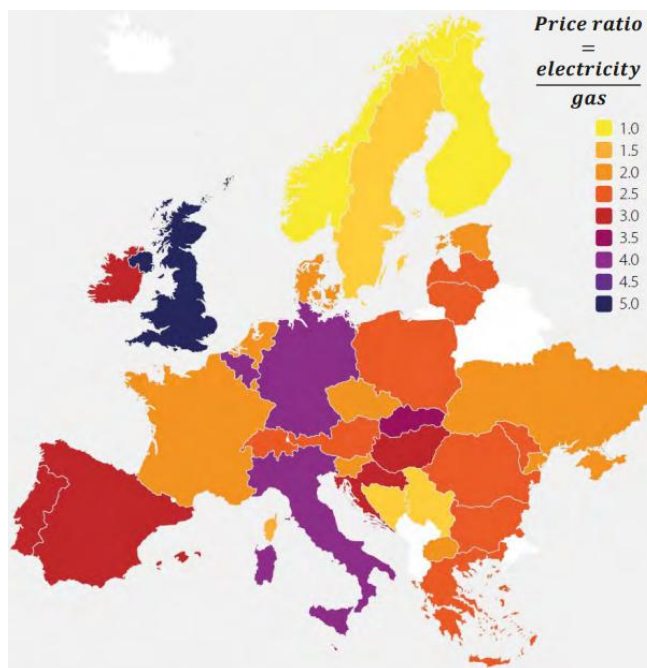


Abbildung 23: Vergleich des Strom- zu Gaspreisverhältnisses in verschiedenen Europäischen Ländern für kleinere industrielle Unternehmen⁴⁴

Quelle: (Sintef 2020)

In der Auslegung von HT-WP können Wärmequellen mit hohen Temperaturen effizienter, d.h. mit höheren Leistungszahlen (COP) genutzt werden, da der Temperaturhub geringer ist. Jedoch hängt die Marktattraktivität auch vom Kostenverhältnis zwischen Strom und Gas ab, wobei günstige Bedingungen in Ländern mit niedrigen Stromkosten herrschen, siehe Abbildung 23⁴⁴. Dort sind somit größere Temperaturhübe wirtschaftlich attraktiv. In der Schweiz ist zum Beispiel ein Temperaturhub von 70 K wirtschaftlich, während es in Deutschland eher 40-50 K sind (Arpagaus et al. 2024). Dies kann durch eine entsprechende Preispolitik (Strom- vs. Gaspreis) oder entsprechende Förderprogramme gesteuert werden.

Bislang waren oft lange Amortisationszeiten aufgrund von hohen Kapitalkosten oder durch ein ungünstiges Preisverhältnis zwischen Strompreis und Erdgas mit dem Einsatz von HT-WP verbunden. Zudem erschweren Unsicherheiten über die zukünftigen Entwicklungen von Energie- und CO₂-Preisen den Entscheidungsprozess bei der Einführung einer neuen Technik. Der finanzielle Nachteil von WP bezüglich Kapital- und Energiekosten wurde bei erforderlichen Nachrüstungen oder Neubauten zum Teil bereits aufgelöst, in bestehenden Anlagen ohne Nachrüstungsbedarf überwiegen jedoch noch oft die unsicheren Preisentwicklungen. (Agora Industrie und FutureCamp 2022)

⁴⁴ In der Abbildung werden viele Vereinfachungen für das Preisverhältnis getroffen: Durchschnittswertbildung, Strompreise zeitlich stark fluktuierend, unterschiedliche Beschaffungsstrategien und regionale Gegebenheiten, etc.

Die Wirtschaftlichkeit einer Industrie-WP hängt von den möglichen Betriebskosteneinsparungen ab, die mit Hilfe der Leistungszahl (COP) einer WP abgeschätzt werden. Ein höherer COP bedeutet einen geringeren Stromverbrauch, was im Vergleich mit den bestehenden Energiekosten die Einsparung ergibt. Dabei ist ein COP von über 2 (bzw. mind. 2 bei Dampf-anwendungen mit Dampf-Nachkompression) die derzeitige Untergrenze für einen wirtschaftlichen Einsatz einer industriellen WP. Dies zeigt wie technische und wirtschaftliche Elemente einer Technologie zusammenspielen und in ihrer Förderung zusammengedacht werden müssen. (Sintef 2020)

Verschiedene Industriezweige sind in ihren Hemmnissen sehr unterschiedlich, vor allem in ihrer Struktur (z.B. Wärmenetze, Temperaturen, Reinheitsanforderungen) und ihren Betriebskosten (z.B. Energiekosten machen in der Chemiebranche ca. 30 % aus, in der Lebensmittelbranche max. 5 %). Gleichzeitig erwarten alle Branchen von HT-WP eine hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit bei gleichzeitig geringen Amortisationszeiten.

Gleichzeitig fallen komplexe und langwierige Planungs- und Genehmigungsverfahren für industrielle WP an (ca. 1 Jahr für die Genehmigungsphase bei Groß-WP), um die Technik zum einen in die eigene sowie in die umgebende Infrastruktur eingliedern zu dürfen (z.B. Wasserentnahme, BImSchG, ...). Dabei haben Großindustrie und Industriecluster oft Vorteile durch bestehende Genehmigungen und Erfahrung mit komplexen Großprojekten (Arpagaus et al. 2024). Für kleine und mittelständige Betriebe fallen jedoch externe Beratungskosten und/oder längere Planungsphasen an, um die größeren wissensbasierten und wirtschaftlichen Hemmnisse zu überwinden. Dies gilt es durch eine gezielte Förderung auszugleichen.

Zusammenfassung

Zusammenfassend beziehen sich die Bedarfe an Politik und Normung vor allem auf eine stärkere Unterstützung des Wissensaustauschs, der Leitlinien und der Ausbildung von Fachkräften. Für ein Marktwachstum der HT-WP ist eine verstärkte Standardisierung und ein verbesserter Informationstransfer sowie die Schulung von qualifiziertem Personal essenziell.

In der Studie des IER zur *Systematischen Anwendung von Großwärmepumpen in der Schweizer Industrie* wurden verschiedene Experten zu den Hemmnissen für eine Verbreitung von industriellen WP befragt (siehe Fußnote 43 auf Seite 42). Dabei wurden vor allem die niedrigen Energiepreise für die fossilen Standardtechniken als Hemmnis genannt, wobei das Strom- zu Gaspreisverhältnis in der Schweiz besser abschneidet als in Deutschland (siehe Abbildung 23). Weitere Kernhemmnisse beziehen sich auf die Wirtschaftlichkeit (hohe Investitionskosten) und den fehlenden Wissens- und Akzeptanzstand der Technik.

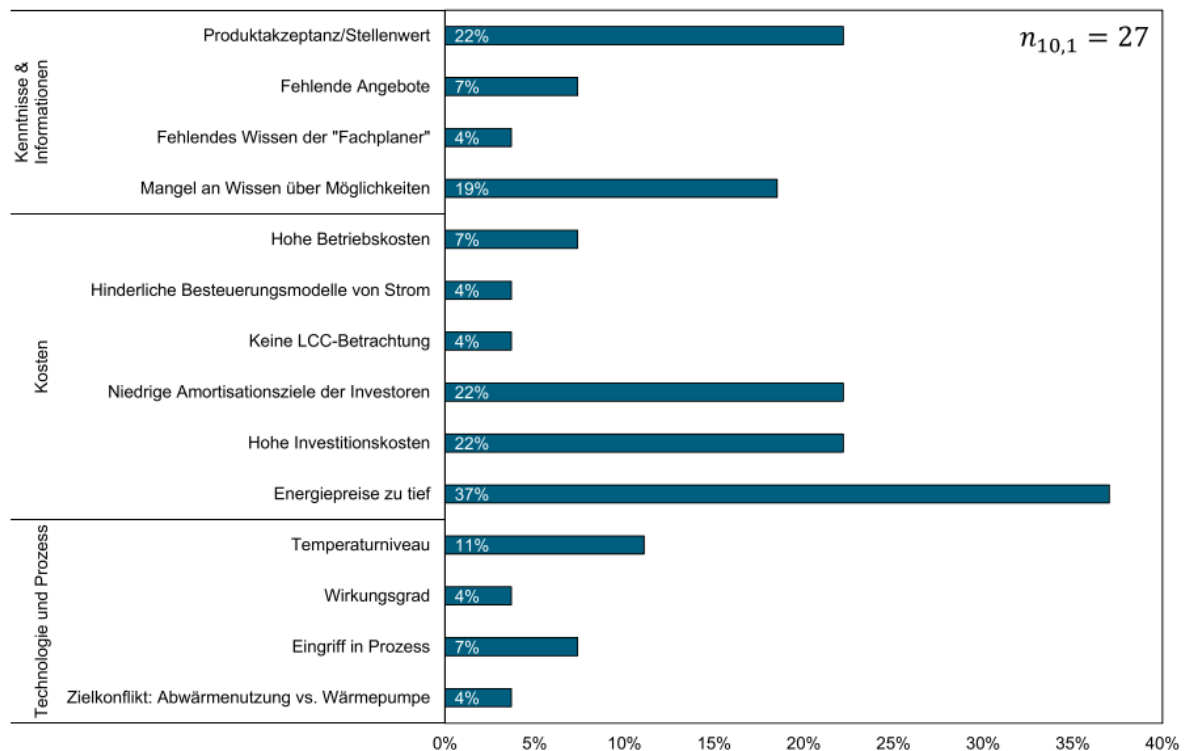


Abbildung 24: Antworten und ihre Verteilung auf die Frage „Was sehen Sie als die wesentlichen Hemmnisse für die Verbreitung von Wärmepumpen in der Industrie an?“ unter 27 Teilnehmern der Schweizer Umfrage von Wolf et al.

Quelle: (Wolf et al. 2017)

8.2 Ungenutzte fördernde Faktoren

Die Markteinführung und Diffusion von HT-WP kann durch bislang unzureichend genutzte Faktoren erheblich gefördert werden. Ein zentraler Ansatz besteht in der Durchführung gezielter und branchenorientierter Demonstrationsprojekte, die den Unternehmen konkrete Anwendungsmöglichkeiten und Vorteile der Technik aufzeigen. FuE-Projekte zu Einzeltechniken können mit Hilfe von Innovation und Transformation durch Pilotprojekte ihre eigene Nische aufbauen bzw. erweitern, und so Alleinstellungsmerkmale schaffen. Die Missionsstruktur im 8. EFP kann die transformative Ausgestaltung des EFP zudem stärken. (AIT, KMU Forschung, Kerlen Evaluation 2023)

Dabei hat sich die Projektförderung im Verbund von Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen (Hersteller und Anwender) als erfolgreiches Konzept erwiesen, um tragfähige Partnerschaften entstehen zu lassen (Prognos et al. 2014). Diese Kooperationen wären ohne eine entsprechende Projektfinanzierung nicht in derselben Tiefe zustande gekommen wären (EU Kom 2024). Diese Partnerschaften leisten oftmals einen zusätzlichen Beitrag für den Transfer in die Anwendung, um den wissenschaftlichen und innovativen Fortschritt gemeinsam in den Markt zu bringen (AIT, KMU Forschung, Kerlen Evaluation 2023). Auch zukünftig sollten Verbünde gefördert werden, die mittels anwendungsnaher FuE höhere Nutztemperaturbereiche und/oder neue Anwendungen sowie Branchen erschließen möchten, um die Marktdiffusion der Technologie zu erhöhen und ihre Effizienzpotenziale

auszunutzen. Eine wissenschaftliche Begleitung von Pilot- und Demonstrationsprojekten kann dazu beitragen, die Akzeptanz und Anwendung der WP-Technik in der Industrie zu steigern.

Ein weiterer Hebel liegt in der gezielten Vernetzung und Bündelung der Nachfrage durch Netzwerke, Verbände und Wirtschaftsvereinigungen, wie beispielsweise in Energieeffizienznetzwerken. Solche Zusammenschlüsse ermöglichen es Unternehmen, gemeinsam Druck auf den Markt auszuüben, die Nachfrage zu bündeln und Pilotprojekte im Verbund durchzuführen. Dadurch lassen sich Risiken und Kosten verteilen, während gleichzeitig Wissen verbreitet und das Diffusionspotenzial der Technik erhöht wird. Rechtzeitige Fortbildungsangebote können darüber hinaus die nötigen Anwendungskompetenzen auf- und somit wissensbasierte Hemmnisse abbauen.

Weitere Maßnahmen zur Wissensverbreitung sind industriespezifische Leitfäden, Normen und Informationskampagnen. Leitfäden können beispielweise Betriebe eine erste Einschätzung ermöglichen, ob und wie sich HT-WP in die für ihre Branche typischen Prozesse integrieren lassen. Dies ist vor allem im KMU-Bereich wichtig, um den teilweise niedrigeren Wissensstand im Vergleich zur Großindustrie auszugleichen.

9 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Für die Beseitigung von Hemmnissen muss das gesamte Innovationssystem zusammenspielen, insbesondere bei den wissensbasierten Hemmnissen, da nicht nur Fortbildungsinstitutionen, FuE und Unternehmen gefragt sind, sondern entsprechendes Wissen auch bei Intermediären wie normierenden Institutionen und Kapitalgebern vorhanden sein muss, damit eine Technik in die Breite diffundieren kann. Weitere Handlungsoptionen zur Überwindung der Hemmnisse umfassen politische und regulatorische Instrumente wie Förderprogramme oder Marktanreizmaßnahmen. Dabei gilt es die größeren wissensbasierten und wirtschaftlichen Hemmnisse von KMUs in den komplexen und langwierigen Planungs- und Genehmigungsverfahren für industrielle WP auszugleichen.

Eine gezielte Technikförderung ist essenziell, um eine nationale Herstellerlandschaft zu etablieren, die auch den internationalen Wettbewerb aktiv mitgestalten kann. Auf internationaler Ebene sind weiterhin Übereinkommen sowie Vereinheitlichungen wichtiger Regularien und Spezifikationen wesentlich für den Außenhandel und die globale Entwicklung der deutschen WP-Technologien. Gleichzeitig gilt es, Technik-Resilienz sowie einen technischen Entwicklungsvorsprung aufzubauen, ohne auf den internationalen Austausch und gegenseitiges Lernen, wie z.B. im TCP HPT der IEA, zu verzichten.

Auch zukünftig sollten Projektverbünde gefördert werden, die höhere Nutztemperaturbereiche und/oder neue Anwendungen sowie Branchen erschließen möchten, um die Marktdiffusion der Technologie zu erhöhen und ihre Effizienzpotenziale auszunutzen, sowie die ungenutzten fördernden Faktoren von Verbünden zu stärken. Neben der Förderung der HT-WP als Gesamtkonzept, ist auch die Weiterentwicklung essenzieller Komponenten wie Verdichter und Kältemittel erforderlich. Darüber hinaus ist die Förderung der erstmaligen Umsetzung der Technologie in der Industrie notwendig, um Demonstrations- und Pilotanwendungen zu ermöglichen und Erfahrungswissen im praktischen Betrieb aufzubauen. Ebenso bedarf es der Unterstützung bei der Anpassung und Weiterentwicklung industrieller Prozesse, damit die spezifischen Vorteile von Wärmepumpen, wie die Nutzung von Abwärme und die Erhöhung der Energieeffizienzsystematisch erschlossen und in bestehende Produktionsumgebungen integriert werden können.

Das 8. EFP formuliert als klares Sprinterziel, die HT-WP mit 300 °C bis zum Jahr 2030 in die industrielle Anwendung zu bringen (BMWK 2024). Dieses Ziel in den nächsten fünf Jahren zu erreichen, wird nur mit erheblichen zusätzlichen FuE-Anstrengungen gelingen können. Verlässlichkeit im Hinblick auf das Vorhandensein öffentlicher FuE-Förderung über ein individuelles Verbundvorhaben hinaus und den Zielen entsprechende Fördermitteltöpfe sind in diesem Kontext wichtig.

Abkürzungen

BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BEW	Bundesförderung für effiziente Wärmenetze
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung (D)
BMWE	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (D)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
COP	Coefficient of Performance
EEW	Bundesförderung für Energie- und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft
EFP	Energieforschungsprogramm
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-(Monomer)-Kautschuk
EU	Europäische Union
FKW	Fluorkohlenwasserstoffen
FS	Fördersumme
FQ	Förderquote
FuE	Forschung und Entwicklung
GWP	Treibhauspotenzial (Global Warming Potential)
HFO	Hydrofluorolefine
HPT	Heat Pumping Technologies (TCP der IEA)
HT	Hochtemperatur
HT-WP	Hochtemperatur-Wärmepumpe
IEA	Internationale Energieagentur
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau
KW/ kWh	Kilowatt/ Kilowattstunde (10 ³ Watt)
KWK	Kraftwärmekopplung
MW/ MWh	Megawatt/ Megawattstunde (10 ⁶ Watt)
PJ	Petajoule (10 ¹⁵ Joule)
PtJ	Projektträger Jülich
TCP	Technologie-Kollaborationsprogramm (der IEA)
th.	Thermisch
THG	Treibhausgas

TRL	Technologie-Reifegrad
USD	US-Dollar
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
WP	Wärmepumpe

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht der Methodik der Technikanalysen, angelehnt an die EDUAR&D-Methode	7
Abbildung 2: Komponenten einer Kompressions-Wärmepumpe und ihr Wärmekreislauf ...	9
Abbildung 3: Entwicklung der Temperatur- und Leistungsbereiche der HT-Wärmepumpe bis 2030.....	11
Abbildung 4: Temperaturniveaus industrieller Prozesse unterteilt nach Technologiereife der Wärmepumpe.....	14
Abbildung 5: Integrationskonzepte mit möglichen Temperaturbereichen.....	15
Abbildung 6: Mögliche Konkurrenztechnologien für HT-WP und deren Verteilung in den Antworten aus Interview-Fragebögen mit 16 Herstellern in der Schweiz	17
Abbildung 7: Erreichbare Temperaturbereiche und Strombedarfe verschiedener Technologien für klimaneutrale Prozesswärme.....	18
Abbildung 8: Kosten der Wärmebereitstellung von Wärmepumpen (WP und HT-WP) im Vergleich zu Dampfkessel und GuD KWK ¹⁵	19
Abbildung 9: Globale Hersteller mit ihrer Technik als maximale Senktemperatur für Nutztemperatur über die Leistung, deutsche Hersteller sind in grün markiert.....	20
Abbildung 10: Globaler industrieller WP-Markt (Hardware) [in Mrd. USD]	22
Abbildung 11: TechnologiemiX der Prozesswärmeerzeugung bis 200°C in EU-27+UK und ihre Wachstumsrate (CAGR)	22
Abbildung 12: Umsatzbeteiligung industrieller WP im globalen Markt im Jahr 2022 nach Leistungsgröße.....	23
Abbildung 13: Anzahl der weltweiten Patente im Bereich der HT-WP seit dem Jahr 2000.	24
Abbildung 14: Der Technikzyklus und seine sechs verschiedenen Phasen	25
Abbildung 15: Weltweite Publikationen im Bereich der HT-WP seit dem Jahr 2000.....	26
Abbildung 16: Patente (links) und Publikationen (rechts) in den jeweils am stärksten vertretenen Ländern, der Zeitraum der summierten Veröffentlichungen ist angegeben ...	26
Abbildung 17: Anzahl der Förderprojekte zu HT-Wärmepumpen in der Projektdatenbank enArgus ²¹ aufgeteilt nach Jahrzehnten (links) und nach Fördersummen (rechts).....	27
Abbildung 18: Übersicht & Zeitachse geförderter FuE-Projekte im EFP zu HT-WP	31
Abbildung 19: Vernetzung und Zusammenspiel der Akteure für Innovationsfortschritt.....	39
Abbildung 20: Charakteristika ausgewählter Kältemittel und ihre Anwendungsbereiche ³⁹	40
Abbildung 21: Darstellung der Schwerpunkte in der aktuellen FuE von HT-WP.....	42
Abbildung 22: Installierte Leistung von elektrifizierten Wärmetechniken und ihr steigender Strombedarf über die Zeit bei einem ambitionierten Markthochlauf	45
Abbildung 23: Vergleich des Strom- zu Gaspreisverhältnis in verschiedenen Europäischen Ländern für kleinere industrielle Unternehmen ⁴⁴	46
Abbildung 24: Antworten und ihre Verteilung auf die Frage „Was sehen Sie als die wesentlichen Hemmnisse für die Verbreitung von Wärmepumpen in der Industrie an?“ unter 27 Teilnehmern der Schweizer Umfrage von Wolf et al.	48

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Entwicklung von HT-WP durch ausgewählte deutsche Hersteller und ihre technischen FuE-Daten, das jeweilige Fact-Sheet zum Hersteller ist in der Fußnote verlinkt (alle mit Stand: 16.07.2024)	13
Tabelle 2: Globale Verteilung der Hersteller in ausgewählten Ländern.....	21
Tabelle 3: Übersicht der Projekte mit den Stichworten `high` `temperature` `heat` `pump` in ihrer Beschreibung aus der CORDIS ²² Forschungsdatenbank der EU im Vergleich zu Google Scholar Treffer zu `high temperature heat pump`	28
Tabelle 4: Ausgewählte Hersteller aus abgeschlossenen EFP-Projekten mit Vorhabenbeginn in den Jahren 2000-2018 und ihr aktueller Stand (Juni 2024) bzgl. HT-WP	30
Tabelle 5: Verlauf der Projekte in Bezug auf Temperaturbereich, Temperaturhub, Leistung und COP	32
Tabelle 6: Technisches Potenzial zur Wärmebereitstellung durch Wärmepumpen nach Wirtschaftszweig und Temperaturniveau (kumuliert bis 100 °C bzw. bis 140 °C und für den Bereich 100-140 °C)	34
Tabelle 7: Auswahl zentraler Akteure im Bereich HT-WP in ihrem Innovationssystem.....	38
Tabelle 8: Energieforschungsprogramme (EFP) der Bundesregierung seit 1977.....	55

Anhang

Energieforschungsprogramm

Tabelle 8: Energieforschungsprogramme (EFP) der Bundesregierung seit 1977

EFP	Federführung	Zeitraum	Programm	Förderbekanntmachung	Fördervolumen
1. EFP	Programm Energieforschung und Energietechnologien 1977 – 1980 (BMFT, BMWi, BMI)				
	BMFT	1977-1980	1977		
2. EFP	Zweites Programm Energieforschung und Energietechnologien (BMFT, BMWi, BMI, BM Bau, BML, BMZ)				
	BMFT	1981-1991	1981		
3. EFP	3. Programm Energieforschung und Energietechnologien (BMFT, BMWi, BMZ und BMU) ⁴⁵				
	BMFT	1991-1996	Feb. 1991		
4. EFP	4. Programm Energieforschung und Energietechnologien (BMBF, BML, BMZ, BMU)				
	BMBF	1996-2005	Jul. 1996		
5. EFP	Innovation und neue Energietechnologien - 5. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung (BMWA, BMU, BMVEL, BMBF)				
	Beschleunigung des Übergangs zu einer nachhaltigen Energieversorgung				
	BMWA	2005-2011	Jul. 2005	Ende 2005	Ca. 0,7 Mrd. €
6. EFP	Forschung für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung - 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung (BMWi, BMU, BMELV, BMBF)				
	Anwendungsorientierter Bereich, Abbildung der gesamten Energiekette				
	BMWi	2011-2018	Jul. 2011	Sep. 2011 Dez. 2014	Ca. 4 Mrd. €
7. EFP	Innovationen für die Energiewende - 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung (BMWi, BMBF, BMEL)				
	Ausrichtung auf Energiewende durch zukunftsweisende Energietechnologien, Fokus auf Technologie- und Innovationstransfer und Einführung der „Reallabore der Energiewende“				
	BMWi	2018-2023	Sep. 2018	Jun. 2021	Ca. 6,4 Mrd. €
8. EFP	8. Energieforschungsprogramm zur angewandten Energieforschung - Forschungsmissionen für die Energiewende				
	Missionsorientierte Innovationspolitik für die Energiewende mit Förderschwerpunkten Energiesystem, Wärmewende, Stromwende, Wasserstoff und Transfer				
	BMWE	laufend	Okt. 2023	Mai 2024	

Quelle: eigene Darstellung, IREES

⁴⁵ Eine Reihe von Projekten wurden im 3. EFP in Kooperationen mit BMWi, BMZ und BMU durchgeführt, ohne dass diese Bundesministerien im Vergleich zu den anderen EFP stärker beteiligt waren.

Die verschiedenen EFP wurden in Zusammenarbeit mehrerer Bundesministerien erstellt. Dabei wechselte die Federführung ab dem 4. EFP vom Forschungsministerium zum Wirtschaftsministerium. In den 5. Und 6. EFP wurden getrennte Programmschwerpunkte von den beteiligten Bundesministerien ausgewiesen. Im 7. EFP geschah dies gemeinsam ohne eine Schwerpunktsetzung einzelner Ministerien in Abgrenzung voneinander. Im 8. EFP werden keine Bundesministerien neben dem BMWF mit einer Beteiligung am Programm und seiner Ausgestaltung genannt.

Suchstrategie der Patent- und Publikationsanalysen

Die Patentrecherchen basieren auf Stichworten, die in der genutzten Datenbank *WPINDEX* gut recherchierbar sind, sowie der Patent-Klassifikationen der Patenthauptgruppe *F25B 30* (*Wärmepumpen*) in Kombination mit den Stichworten:

S (EP or WO)/PC

S L1 and (Heat pump? Or F25B0030/IPC) and ((high temperature or CO2 or Carbon dioxide or pentane or ammonia or butane or vapor or turbo or centrifugal or piston compressor or reciprocating or screw))

S L2 not (space heating or private space or resident or building? or apartment or flat or room)

Dabei wurde bei der Suchstrategie der HT-Bereich über die relevanten Kältemittel eingegrenzt, sowie der Industriefokus über eine Ausgrenzung der Gebäudewärme hergestellt. Bei Patenten werden die Recherchen auf der Basis von Transnationalen Patenten durchgeführt, das sind Anmeldungen entweder am *Europäischen Patentamt* und/oder bei der *Internationalen Patentorganisation (WIPO)*. Diese ermöglichen gute Ländervergleiche. Außerdem handelt es sich um eine Auswahl hochwertiger Patente.

Die Publikationsrecherchen in der Datenbank *Web of Science (WoS)* basieren ausschließlich auf Stichworten, da es keine geeigneten Klassifikationen gibt:

TS=(“Heat pump*” and (“high temperature” or CO2 or “Carbon dioxide” or pentane or ammonia or butane or vapor or industry* Or “process heat” or “waste heat” or turbo or centrifugal or “piston compressor” or reciprocating or screw)) Not TS=(“private space” or resident or building* or apartment or flat or room)

Literaturverzeichnis

ACEEE (2024): Consistent Refrigerant Policy Is Essential for Investment in Industrial Heat Pump Market Transformation. ACEEE Topic Brief. Unter Mitarbeit von ANDREW HOFFMEISTER, HELLEN CHEN, NEAL ELLIOTT.

Agora Energiewende; Fraunhofer IEG (2023): Roll-out von Großwärmepumpen in Deutschland. Strategien für den Markthochlauf in Wärmenetzen und Industrie. Unter Mitarbeit von U. Weiß und A. Kraus. Agora Energiewende; Fraunhofer IEG.

Agora Industrie; FutureCamp (2022): Power-2-Heat: Erdgaseinsparung und Klimaschutz in der Industrie. Unter Mitarbeit von P. Münnich, J. Metz, P. D. Hauser, A. Kohn und T. Mühlpointer. Agora Industrie; FutureCamp Climate GmbH.

AIT, KMU Forschung, Kerlen Evaluation (2023): Begleitevaluation der BMWK-Förderung im 7. Energieforschungsprogramm. Erster Zwischenbericht. Unter Mitarbeit von Michael Dinges, Christiane Kerlen, Peter Kaufmann. Hg. v. AIT - Austrian Institute of Technology. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).

Arpagaus, Cordin (2018): High Temperature Heat Pumps: Market Overview, State of the Art, Research Status, Refrigerants, and Application Potentials. NTB University of Applied Sciences of Technology Buchs, Switzerland. Purdue Conference. Purdue University, 09.06.2018. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Cordin-Arpagaus/publication/326847787_High_Temperature_Heat_Pumps_Market_Overview_State_of_the_Art_Research_Status_Refrigerants_and_Application_Potentials/links/5b69467a299bf14c6d94fd87/High-Temperature-Heat-Pumps-Market-Overview-State-of-the-Art-Research-Status-Refrigerants-and-Application-Potentials.pdf, zuletzt geprüft am 13.11.2024.

Arpagaus, Cordin (2019): Hochtemperatur-Wärmepumpen für industrielle Anwendungen. NTB - Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs. 4. Internationaler Grosswärmepumpen Kongress. Zürich, 08.05.2019.

Arpagaus, Cordin (2020): Hochtemperatur Wärmepumpen. Literaturstudie zum Stand der Technik, der Forschung, des Anwendungspotenzials und der Kältemittel. Institut für Energiesysteme (IES), NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs. Buchs, CH.

Arpagaus, Cordin; Biesl, Markus; Huettl, Christian (2024): VDI Web-Panel: Großwärmepumpen - Ein Baustein für die Dekarbonisierung der Industrie? Weitere Beteiligte: Eder, Stephan W. (VDI-Moderator). Webinar: VDI Verlag. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=-FFC-MGrcPA>, zuletzt geprüft am 29.08.2024.

Arpagaus, Cordin; Bless, Frédéric; Uhlmann, Michael; Schiffmann, Jürg; Bertsch, Stefan S. (2018): High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials. In: *Energy* 152, S. 985–1010. DOI: 10.1016/j.energy.2018.03.166.

BMWK (2023): 8. Energieforschungsprogramm zur angewandten Energieforschung – Forschungsmissionen für die Energiewende. Fundstelle: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).

BMWK (2024): Förderbekanntmachung zur angewandten Energieforschung im Rahmen des 8. Energieforschungsprogramms. Fundstelle: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Online verfügbar unter <https://www.energieforschung.de/energieforschungsprogramm/energieforschungsprogramm-des-bmwk>.

Brauer, L.; Wobst, E.; Schönfelder, R.; Sandkötter, W. (2014): Industrie-Hochtemperaturwärmepumpe mit NH₃. Abschlussbericht. Förderkennzeichen 0327502A/B. thermea. Energiesysteme; GEA Refrigeration Germany.

Carlsson, B.; Stankiewicz, R. (1991): On the Nature, Function and Composition of Technological Systems. In: *Journal of Evolutionary Economics*, S. 93–118.

EU Kom (2024): Ex-post-Bewertung des EU-Rahmenprogramms für Forschung und Innovation Horizon 2020. Begleitunterlage zur BERICHT DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DEN RAT. EUROPÄISCHE KOMMISSION.

FKW GmbH (2003): Entwicklung einer Absorptions-Kompressionswärmepumpe mit dem Stoffpaar Ammoniak / Wasser für die Anwendung als Hochtemperatur-Wärmepumpe. Abschlussbericht. Förderkennzeichen 0329832A. Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH (FKW).

Fleckl, T.; Wilk, V.; Lauermann, M.; Beck, M.; Drexler-Schmid, G.; Hofmann, R.: Wärmepumpen in der Prozessindustrie. Aktuelle Entwicklungen in der Forschung und Herausforderungen in der Anwendung. Hg. v. Austrian Institute of Technology (AIT).

Forschungsnetzwerk Industrie und Gewerbe (2025): Strategie und Forschungsroadmap des Forschungsnetzwerks Industrie und Gewerbe. Hg. v. IREES GmbH, RWTH Aachen (IOB), ETA-Solutions GmbH. Karlsruhe, Aachen, Bensheim.

Fraunhofer ISI (2022): Missionsorientierte Innovationspolitik für transformativen Wandel. Eine Toolbox für die Umsetzung und Wirkungsmessung. Unter Mitarbeit von Dr. Florian Wittmann, Dr. Ralf Lindner, Miriam Hufnagl, Dr. Florian Roth. Hg. v. Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung.

Fraunhofer ISI (2024): Direct electrification of industrial process heat. An assessment of technologies, potentials and future prospects for the EU. Study on behalf of Agora Industry. Unter Mitarbeit von M. Rehfeld, S. Bußmann, T. Fleiter und J. Rissmann. Hg. v. Agora Industry. Fraunhofer ISI; DENEFF; Energy Innovation.

Fraunhofer ISI; IOB der RWTH Aachen (2023): CO₂-neutrale Prozesswärmeerzeugung. Umbau des industriellen Anlagenparks im Rahmen der Energiewende: Ermittlung des aktuellen SdT und des weiteren Handlungsbedarfs zum Einsatz strombasierter Prozesswärmeanlagen. Unter Mitarbeit von Dr. Tobias Fleiter, Dr. Matthias Rehfeldt, Dr. Simon Hirzel, Lisa Neusel, Dr. Ali Aydemir, Dr. Christian Schwotzer, Felix Kaiser, Carsten Gondorf, Justin

Hauch, Jan Hof, Lukas Sankowski, Moritz Langhorst. Hg. v. Umweltbundesamt. Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung; Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik (IOB).

GZB (2017): Analyse des deutschen Wärmepumpenmarktes - Bestandsaufnahme und Trends. Unter Mitarbeit von H. Born, S. Schimpf-Willenbrink, H. Lange, G. Bussmann und R. Bracke. Hg. v. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW). Internationales Geothermiezentrum der Hochschule Bochum.

Hartmann, K.-H.; Schramm, O.; Kruse, H.; Kabelac, S. (2017): Hochtemperatur-Kompressionswärmepumpe mit Lösungskreislauf für industrielle Anwendungen mit dem natürlichen Stoffpaar Ammoniak/Wasser. Abschlussbericht. Förderkennzeichen 03ET1168A. Steffen Hartmann Recyclingtechnologien GmbH; Continental AG; Forschungszentrum für Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH (FKW); Institut für Thermodynamik der Leibniz-Universität Hannover.

Hirzel, Simon (2017): Technologiebericht 6.2 Energieeffiziente Querschnittstechnologien innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende. Technologien für die Energiewende. Teilbericht 2 an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Hg. v. Wuppertal Institut, ISI, IZES. Fraunhofer ISI.

Jochem, Eberhard (2009): Improving the efficiency of R&D and the market diffusion of energy technologies. Unter Mitarbeit von H. Bradke, F. Marscheider-Weidemann, O. Som, W. Mannsbart, C. Cremer, C. Dreher et al. Heidelberg: Physica-Verlag.

Lösch, Oliver; Decker, Alexandra; Friedrichsen, Nele; Jochem, Eberhard; Moog, Daniel; Schwotzer, Christian; Rothhöft, Katharina (2024): Zur Relevanz der öffentlichen Energieforschungsförderung, insbesondere für Industrie und Gewerbe. Kurzstudie im Rahmen des Verbundvorhabens EE4InG2. Hg. v. IREES GmbH, RWTH Aachen (IOB), ETA-Solutions GmbH. Karlsruhe, Aachen, Bensheim.

Marina, A.; Spoelstra, S.; Zondag, H. A.; Wemmers, A. K. (2021): An estimation of the European industrial heat pump market potential. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 139, S. 110545. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110545.

McKinsey (2023): Global Energy Perspective 2023. Executive Summary. Hg. v. McKinsey & Company. Energy Solutions.

Meyer-Krahmer, F.; Dreher, C. (2004): Neuere Betrachtungen zu Technikzyklen und Implikationen für die Fraunhofer Gesellschaft. In: *Forschungs- und Technologiemanagement: Potentiale nutzen – Zukunft gestalten.*, S. 27–35. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/370953862_Neuere_Betrachtungen_zu_Technikzyklen_und_Implikationen_fur_die_Fraunhofer_Gesellschaft, zuletzt geprüft am 17.02.2025.

Öko-Institut e.V.; Fraunhofer ISI (2015): Klimaschutzszenario 2050. 2. Endbericht. Unter Mitarbeit von J. Repenning, L. Emele, R. Blanck, S. Braungardt, W. Eichhammer und R. Elsland. Hg. v. Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.

Prognos; Deutsche WindGuard; IE Leipzig (2014): Evaluation der Forschungsförderung des Bundesumweltministeriums im Rahmen des 5. Energieforschungsprogramms. Zusammenfassung. Unter Mitarbeit von Dr. Stephan Heinrich, Friedrich Seefeldt, Gerhard Gerdes und Matthias Reichmuth. Hg. v. Prognos AG. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).

Ramming, K. (2022): HT Wärmepumpe: Entwicklung einer Hochtemperaturwärmepumpe für Temperaturen bis zu 160 °C auf Basis eines Kältekreisprozesses mit Lösungsumlauf. Abschlussbericht. Förderkennzeichen 03ET1588A. AGO AG Energie + Anlagen.

Rehfeld, M.; Rohde, C.; Fleiter, T.; Toro, F.; Reitze, F. (2016): A bottom-up estimation of heating and cooling demand in the European industry. ECEEE INDUSTRIAL SUMMER STUDY PROCEEDINGS. Fraunhofer ISI; IREES GmbH.

Schäfer, Bernhard; Toro Chacón, Felipe Andrés; Brinkmann, Thorsten; Drews, Anja; Jochem, Eberhard; Sauer, Jörg (2021): Bewertung von Energieeffizienztechnologien mit der Methodik EDUAR&D an zwei Beispielen. In: *Chemie Ingenieur Technik* 93 (8), S. 1247–1256. DOI: 10.1002/cite.202000251.

Schmoch, U. (2007): Double-boom cycles and the comeback of science-push and market-pull. In: *Research Policy* 36 (7), S. 1000–1015. DOI: 10.1016/j.respol.2006.11.008.

Sintef (2020): Strengthening Industrial Heat Pump Innovation - Decarbonizing Industrial Heat. Whitepaper. Unter Mitarbeit von Robert de Boer (TNO), Andrew Marina (TNO), Benjamin Zühlsdorf (DTI), Cordin Arpagaus (NTB), Michael Bantle (SINTEF), Veronika Wilk (AIT), Brian Elmegaard (DTU), José Corberán (UPValencia), Jessica Benson (RISE). Hg. v. Sintef. TNO, DTI, NTB, SINTEF, AIT, DTU, UP Valencia; RISE.

Viebahn, P.; Kobiela, G.; Soukup, O.; Wietschel, M.; Hirzel, S.; Horst, J.; Hildebrand, J. (2017): Technologien für die Energiewende. Teilbericht 1 - Kriterienraster zur Bewertung der Technologien innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende. an das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Wuppertal Institut, Fraunhofer ISI, IZES.

Wolf, Stefan; Flatau, Roman; Radgen, Peter; Blesl, Markus (2017): Systematische Anwendung von Großwärmepumpen in der Schweizer Industrie. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Universität Stuttgart.

Wolf, Stefan; Lambauer, Jochen; Blesl, Markus; Fahl, Ulrich; Voß, Alfred (2012): Industrial heat pumps in Germany: Potentials, technological development and market barriers. In: *ECEEE Industrial Summer Study*.

Zühlsdorf, B.; Lundsted Poulsen, J.; Armato, V.; Madsbøll, H.; Dusek, S.; Drexler-Schmid, G. et al. (2024a): Annex 58 High-Temperature Heat Pumps - Task 3 - Applications and Transition. Unter Mitarbeit von B. Zühlsdorf. Hg. v. Technology Collaboration Programme (TCP) Heat Pumping Technologies (HPT) by International Energy Agency (IEA). Heat Pump Centre; Danish Technology Institute.

Zühlsdorf, B.; Poulsen, J. L.; Dusek, S.; Wilk, V.; Krämer, D.; Rieberer, R. et al. (2023): Annex 58 High-Temperature Heat Pumps - Task 1 - Technologies. Unter Mitarbeit von Benjamin Zühlsdorf. Hg. v. Technology Collaboration Programme (TCP) Heat Pumping Technologies (HPT) by International Energy Agency (IEA). Heat Pump Centre; Danish Technology Institute.

Zühlsdorf, Benjamin; Nekså, Petter; Elmegaard, Brian (Hg.) (2024b): 4th High-Temperature Heat Pump Symposium. Copenhagen, 23.-24.01.2024. DTU Mechanical Engineering.