

Cordin Arpagaus, Dr. sc. techn., Senior Research Engineer
Frédéric Bless, Dr. sc., Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Stefan S. Bertsch, Prof. Ph.D., Institutsleiter, Institut für Energiesysteme, NTB Buchs
Jürg Schiffmann, Prof. Dr., Directeur, Laboratory for Applied Mechanical Design, EPFL

Wärmepumpen für die Industrie: Eine aktuelle Übersicht

Zusammenfassung

Industrielle Wärmepumpen mit Vorlauftemperaturen im Bereich von 100 bis 160 °C werden in den kommenden Jahren zunehmend kommerzialisiert und in industrielle Prozesse integriert, insbesondere für Anwendungen der Abwärmenutzung und Wärmerückgewinnung. Abwärme auf einem niedrigen Temperaturniveau kann effizient in nutzbare Prozesswärme umgewandelt werden. Mit dem Umstieg weg von fossilen Energieträgern und der Steigerung der Energieeffizienz können die CO₂-Emissionen drastisch reduziert werden.

Dieser Beitrag gibt eine aktuelle Übersicht zu verschiedenen industriellen Wärmepumpen, die bereits heute auf dem Markt erhältlich sind, sowie Hemmnisse am Markt. Bereits praktisch umgesetzte industrielle Anwendungen finden sich in verschiedenen Prozessen wie Trocknung, Verdampfung, Sterilisation, Pasteurisierung, Dampferzeugung, Papierherstellung, Lebensmittelzubereitung. Im Bereich der Technologieentwicklung von industriellen Wärmepumpen gibt es eine hohe Forschungsaktivität auf internationaler Ebene. Die Hauptforschungsziele sind die Erweiterung der Quellen- und Senkentemperaturen auf höhere Niveaus, die Verbesserung der Wärmepumpeneffizienz, die Erprobung neuer umweltfreundlicher Kältemittel, und insbesondere der Scale-up vom Labor- in den Industriemassstab.

Summary

Industrial heat pumps with supply temperatures in the range of 100 to 160 °C will be increasingly commercialised and integrated into industrial processes in the coming years, especially for applications of excess heat recovery. Excess heat at a low temperature level can be efficiently converted into usable process heat. By changing from fossil fuel systems to heat pump systems and increasing energy efficiency, CO₂ emissions can be drastically reduced.

This article provides an up-to-date overview of various industrial heat pumps that are already available on the market, as well as market barriers. Industrial applications that have already been implemented in practice can be found in various processes such as drying, evaporation, sterilisation, pasteurisation, steam generation, paper production, and food preparation. In the field of technology development of industrial heat pumps, there is a high level of research activity on an international level. The main research objectives are to increase heat source and heat sink temperatures to higher levels, improve heat pump efficiency, test new environmentally friendly refrigerants, and especially scale-up from laboratory to industrial scale.

Motivation und Einleitung

Das Thema *Wärmepumpen für die Industrie* ist sehr aktuell, insbesondere für Anwendungen der Abwärmenutzung und Wärmerückgewinnung. Mit dem Umstieg weg von fossilen Energieträgern und der Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz kann der CO₂-Footprint drastisch reduziert werden.

In der Regel fällt ein grosser Teil der in einem Prozess eingesetzten Wärme in Form von Abwärme an, z.B. als Kühlflüssigkeit, Abwasser, warme Druckluft von Kompressoren, oder feuchte Abluft (Bild 1). Aufgrund des relativ hohen Temperaturniveaus von etwa 20 °C bis circa 100 °C stellt industrielle Abwärme für Wärmepumpen aus energetischer Sicht eine besonders wertvolle Wärmequelle dar, die deutlich höher ist als typischerweise genutzte Wärmequellen von Heizungswärmepumpen wie Umgebungsluft, Erdwärme oder Grundwasser.

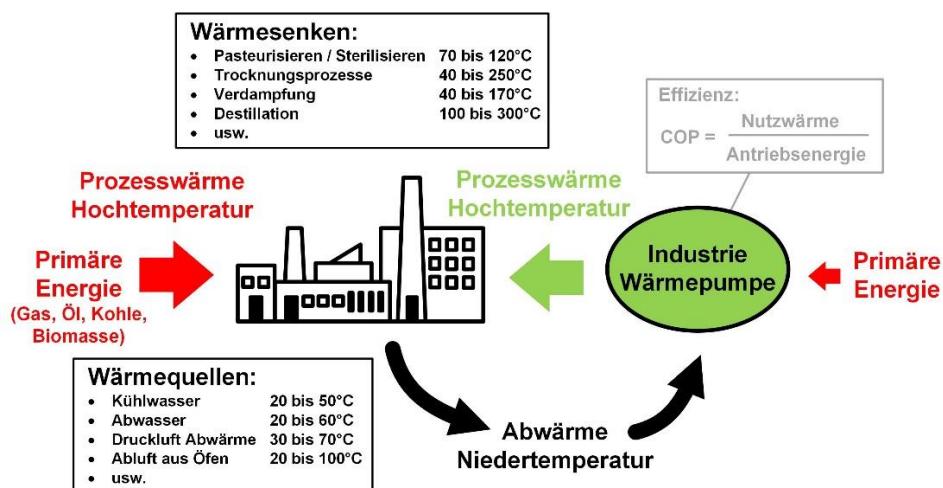


Bild 1: Schematische Darstellung des Prinzips der innerbetrieblichen Abwärmenutzung mittels industrieller Wärmepumpen (Graphik aus [1]).

Die Einteilung und Klassifizierung von Wärmepumpentechnologien führt über offene und geschlossene Systeme (Bild 2) [1], [2]. Elektrisch angetriebene Kompressionswärmepumpen mit einem geschlossenen Kältemittelkreislauf spielen hier als effiziente Wärmetransformatoren für Heiz- und Kühlauflagen eine Schlüsselrolle, da dieser Typ Wärmepumpe am weitesten verbreitet und in einer Vielzahl von Grössen für verschiedene Anwendungen erhältlich ist.

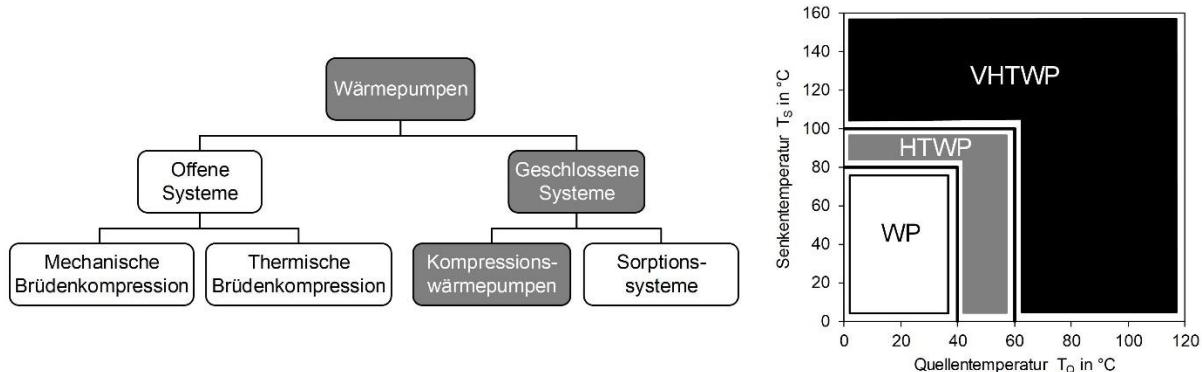


Bild 2: Klassifizierung von industriellen Wärmepumpen und Entwicklung der Temperaturniveaus. WP: konventionelle Wärmepumpen bis etwa 80 °C Senkentemperatur, HTWP: Hochtemperatur-Wärmepumpen (80 bis 100 °C), VHTWP: Höchsttemperatur-Wärmepumpen >100 °C. Zur Wärmerückgewinnung wird Abwärme als Wärmequelle eingesetzt (Graphiken aus [1], [2]).

Im Rahmen des Projektes *Annex 35/48 Industrial Heat Pumps* des IEA HPT TCP (Technology Collaboration Programme on Heat Pumping Technologies der Internationalen Energieagentur) wurde der Begriff *Industriewärmepumpe* mit «*Wärmepumpen für höhere Temperaturen von bis zu 150 °C im mittleren und hohen Leistungsbereich, die zur Wärmerückgewinnung und -aufbereitung in industriellen Prozessen, aber auch zum Heizen, Kühlen und Klimatisieren in industriellen und gewerblichen Gebäuden sowie Mehrfamilienhäuser und zur Fernwärme eingesetzt werden*» definiert [3]. Der Begriff *Hochtemperatur-Wärmepumpe* (HTWP) wird häufig in Verbindung mit industriellen Wärmepumpen verwendet [1], [2], [4], hauptsächlich bei der Nutzung von Abwärme in der Prozessindustrie für die innerbetriebliche ProzesswärmeverSORGUNG, da das Niveau der Nutztemperaturen und auch das Temperaturniveau der Wärmequelle deutlich höher liegen als bei konventionellen Wärmepumpen für Warmwasser oder Heizung im Wohnbereich. Das Bild 2 (rechts) veranschaulicht die Entwicklungserspektiven von industriellen Wärmepumpen zur Wärmerückgewinnung in Funktion der Quellen- und Senkentemperaturen. Das Temperaturniveau in konventionellen Wärmepumpen (WP) erreicht Senkentemperaturen bis etwa 80 °C. Darüber wird allgemein von einer industriellen HTWP gesprochen. Über 100 °C wird auch gerne der Begriff *Höchsttemperatur-Wärmepumpe* (VHTWP, engl. Very High Temperature Heat Pump) verwendet [5]. Thermodynamisch betrachtet ist 100 °C auch die Temperatur, bei welcher Wasser bei 1 bar verdampft und Anwendungen zur Dampferzeugung ermöglicht.

Industrieller Prozesswärmbedarf

Das theoretische Anwendungspotenzial für den Einsatz von Wärmepumpen in industriellen Prozessen lässt sich aus dem Wärmbedarf der einzelnen Industriezweige und den Temperaturniveaus der angewandten industriellen Prozesse abschätzen. Die Graphiken in Bild 3 zeigen die Verteilung des industriellen Wärmbedarfs in der Schweiz nach Branche und Temperaturniveau. Neben Raumwärme und Warmwasser besteht in der Industrie ein grosser Bedarf an Prozesswärme für die Herstellung, Verarbeitung und Veredlung von Produkten. Im Allgemeinen wird Prozesswärme oberhalb von etwa 80 °C zugeführt.

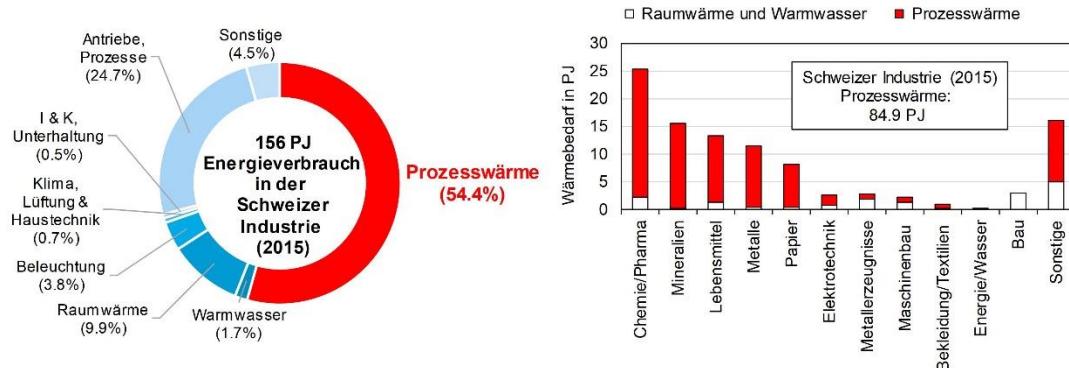


Bild 3: Industrieller Energieverbrauch in der Schweiz (2015) nach Verwendungszweck [6]. Wärmbedarf aufgeteilt nach Industriezweigen und Temperaturbereichen, der mit industriellen Wärmepumpen erreicht werden kann (Graphiken aus [1]).

Laut Bundesamt für Statistik [6] gehen in der Schweiz rund 19% des gesamten Endenergieverbrauchs an den Industriesektor (Stand 2015). Dies entspricht einer totalen Energiemenge von 156 PJ, also dem grössten Energieverbraucher (Bild 3, links). Der Energieverbrauch der Industrie lässt sich wiederum nach Verwendungszweck unterscheiden, wobei die Prozess-

wärme rund 54 % bzw. 84.9 PJ des gesamten Wärmebedarfs ausmacht. Die wichtigsten Potenziale für Prozesswärme liegen in den Bereichen Chemie/Pharma, Mineralien, Nahrung/Getränke, Metall und Papier (Bild 3, rechts).

In einer Europastudie haben Nellissen und Wolf [7] für industrielle Wärmepumpen ein technisches Potenzial von etwa 626 PJ (174 TWh) evaluiert bei Wärmesenkentemperatur bis 150 °C (Bild 4). Etwa 116 PJ oder 19 % des Potenzials liegen zwischen 100 und 150 °C und wurden für industrielle VHTWP als erreichbar erachtet. Der Temperaturbereich über 150 °C ist für die Wärmepumpentechnik aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von VHTWP-Produkten auf dem Markt nur beschränkt unzugänglich. Das grösste Potenzial für den Einsatz von VHTWP liegt in der Lebensmittel- und Tabakindustrie, der chemischen Industrie und der Papierindustrie, wo energieintensive Produktionsprozesse zu finden sind.

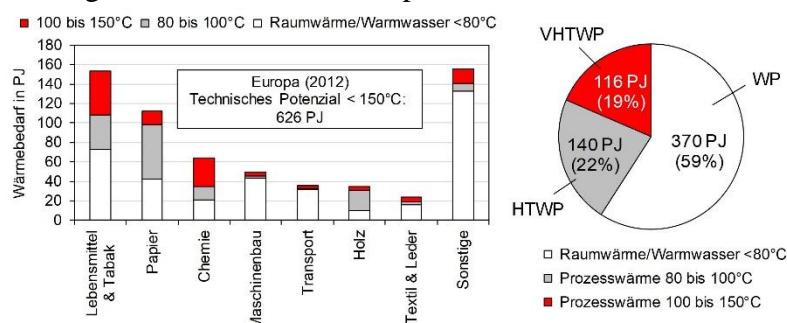


Bild 4: Technisches Potenzial der Prozesswärme in Europa, gegliedert nach Industriesektor, das mit industriellen Wärmepumpen erschlossen werden kann (basierend auf Eurostat-Daten von 33 EU-Mitgliedsländern aus dem Jahre 2012 [7]).

Bild 5 gibt einen Überblick über typische Prozesse in verschiedenen Industriezweigen, welche mittels industriellen Wärmepumpen bereitgestellt werden können. Die typischen Prozesstemperaturen liegen in Bereichen zwischen 20 und 200 °C. Die Betriebstemperaturen sind jeweils in Bandbreiten angegeben, da sie vom jeweils eingesetzten Verfahren abhängen. Zusätzlich sind die Temperaturbandbreiten entsprechend der verfügbaren Wärmepumpentechnik gekennzeichnet, welche den Technologie-Reifegrad von industriellen Wärmepumpen darstellt.

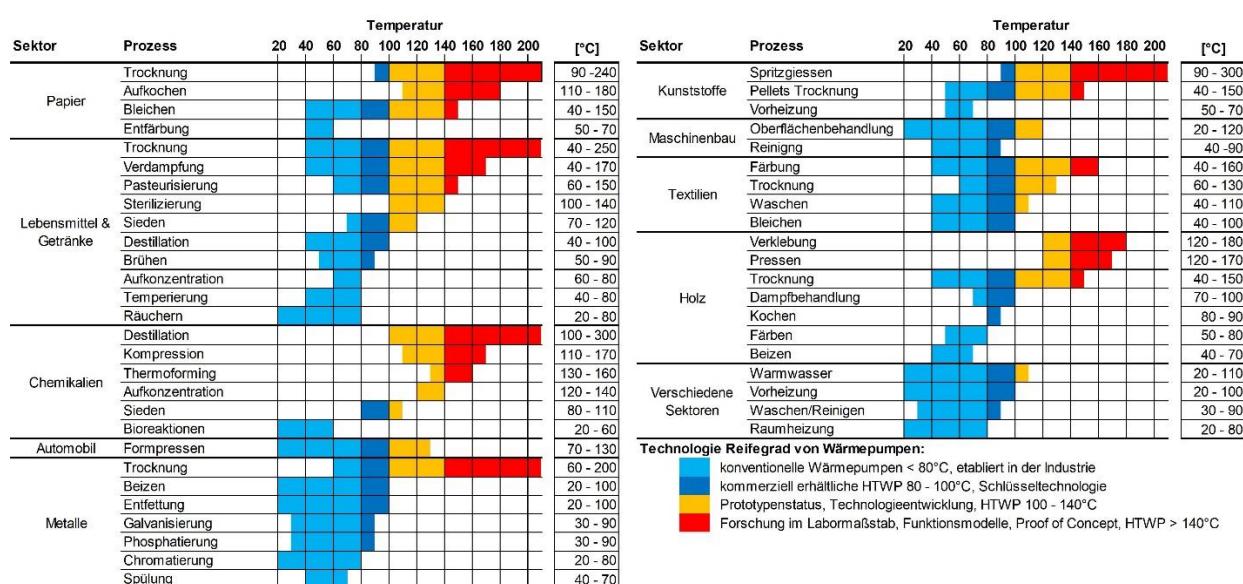


Bild 5: Industrieprozesse, gegliedert nach typischen Betriebstemperaturen zwischen 20 und 200 °C, welche mittels industriellen Wärmepumpen bereitgestellt werden können. Überlagert ist der Technologie-Reifegrad von industriellen Wärmepumpen [1].

Ein Grossteil der aufgeführten thermischen Produktionsprozesse mit Temperaturniveaus bis 100 °C kann bereits mit der heutigen Wärmepumpentechnik versorgt werden. Trotzdem erfolgt die Wärmebereitstellung dafür meist fossil mittels Gas, Öl oder Kohle. Im Temperaturbereich bis 100 °C gibt es viele Anwendungsmöglichkeiten wie Trocknen, Eindampfen, Destillieren, Sterilisieren, Pasteurisieren, Kochen, Pressen, Färben oder Bleichen.

Tendenziell befinden sich ab 100 °C VHTWP-Produkte in der Entwicklung, wobei es bereits vereinzelte Modelle von industriellen Wärmepumpen auf dem Markt gibt (siehe Bild 6). Ab etwa 140 °C sind mehrheitlich Laboranlagen in der Erforschung. Zur Erzeugung von Niederdruck-Prozessdampf besteht insbesondere industrielles Interesse, das Spektrum der Wärmenutzungstemperaturen von Kompressionswärmepumpen auf über 120 °C zu erweitern. Der erzeugte Dampf kann dann durch mehrstufige Brüden Kompression auf höhere Drücke erhöht werden.

Eine Marktstudie [8] im Jahre 2017 über die Anwendung von Grosswärmepumpen in der Schweizer Industrie ergab, dass die Bedeutung von industriellen Wärmepumpen in den nächsten 5 Jahren in grossem Umfang zunimmt, insbesondere in der Lebensmittel-, Chemie-, Pharma- und Papierindustrie. Die grösste Forschungslücke wurde in den Bereichen Kältemittel (mit niedrigem Treibhauspotenzial), erreichbarer Temperaturbereich, Komponentenoptimierung (z.B. temperaturbeständige Kompressoren), Kreislaufoptimierung und Demonstrationsprojekte identifiziert, während der höchste Entwicklungsbedarf bei der Erweiterung des Temperaturbereichs, der Kostensenkung (Investition, Wartung und Betrieb), der Effizienzsteigerung und der Bereitstellung von mehr (modularen) Standardprodukten festgestellt wurde.

Industrielle Wärmepumpen auf dem Markt

Das Angebot an Wärmepumpen mit hohen Heizleistungen und hohen Vorlauftemperaturen ist in den letzten Jahren stetig gewachsen. Eine Auswahl von über 26 Wärmepumpenprodukten von 15 Herstellern für den Einsatz in Industrie und Gewerbe, die in der Lage sind, mindestens 90 °C Wärme zu liefern sind in Bild 6 und Tabelle 1 aufgelistet.

Die Firmen Kobe Steel (Japan), Viking Heat Engine SA (Norwegen), Ochsner Energie Technik GmbH (Österreich), Frigopol (Österreich), Mayekawa (Japan), Hybrid Energy AS (Norwegen), Combitherm (Deutschland), ENGIE (ex-Dürr Thermea) (Deutschland), Frioetherm (Schweiz) und Oilon (Finnland) zeigen Pionierarbeit mit ihren Wärmepumpen im industriellen Massstab mit Senkentemperaturen über 100°C. Die Produkte Kobelco SGH 120/165, HeatBooster, IWWDSS, IWWDS, IWWHS, Eco Sirocco, HWW 245fa, thermeco2 und Chill-Heat stellen mit Vorlauftemperaturen von 100 bis 165 °C den industriellen Benchmark dar. Die Höhe der maximal erreichbaren Senktemperatur wird in erster Linie durch die Wahl des Kältemittels, die Auslegung des Kreislaufs und des Verdichtertyps bestimmt.

Bild 6 zeigt die Auswahl industrieller Wärmepumpen, sortiert nach deren maximaler Vorlauftemperatur, Heizleistung (logarithmisch aufgetragen), und Kompressortyp. Das Leistungsspektrum der angebotenen Wärmepumpen reicht von etwa 20 kW bis zu 20 MW. Durch Parallelbetrieb (z.B. TWIN-Schaltungen) werden die Heizleistungen angepasst. Als Kältemittel werden hauptsächlich R245fa (ÖKO1), R717 (Ammoniak, NH₃), R744 (CO₂), R134a, oder R1234ze(E) eingesetzt. Das neue HFO-Kältemittel R1336mzz(Z) kommt bei der Firma Viking Heat Engine erstmals zum Einsatz. Mit den neuen HFO-Kältemitteln erfüllen die Hersteller bereits heute Kältemittelanforderungen, die weit über 2020 hinaus gelten. Das Treibhauspotenzial (GWP Global Warming Potential) ist im einstelligen Bereich und damit natürlichen Kältemitteln fast gleichzusetzen.

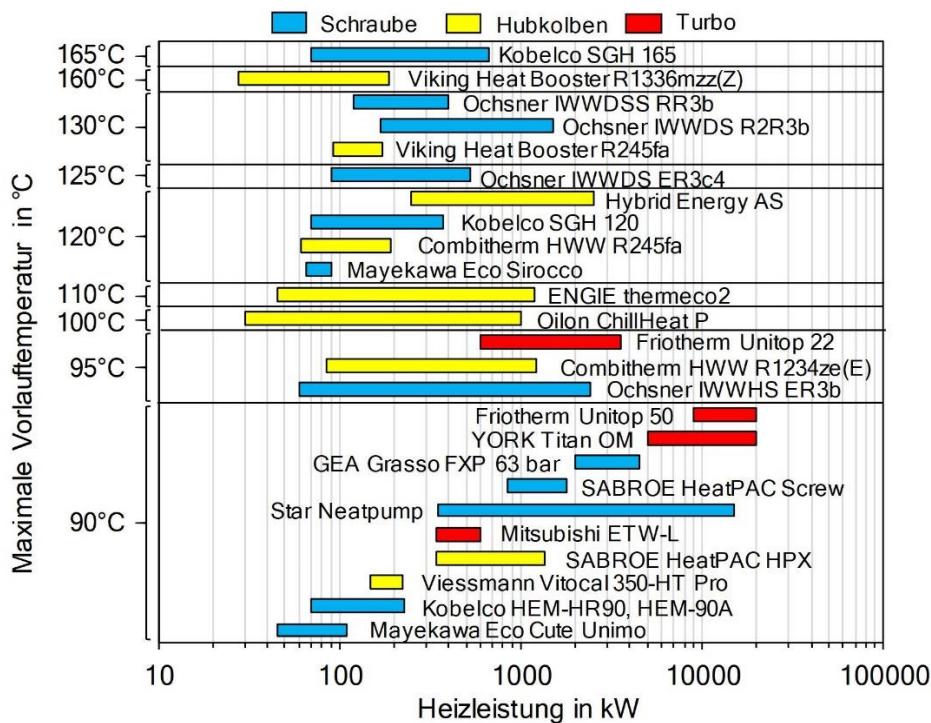


Bild 6: Auswahl an kommerziell erhältlichen industriellen Kompressionswärmepumpen, sortiert nach maximaler Vorlauftemperatur (Wärmesenkentemperatur) und Heizleistung. Die eingesetzten Verdichtertypen sind farblich gekennzeichnet (blau: Schrauben-, gelb: Hubkolben-, rot: Turbokompressoren) (Graphik adaptiert aus [1]).

Hersteller	Produkte	Kältemittel	Max. Vorlauftemperatur	Heizleistung	Kompressor Typ
Kobe Steel (Kobelco steam grow heat pump)	SGH 165	R134a/R245fa	165 °C	70 – 660 kW	Doppelschraube
	SGH 120	R245fa	120 °C	70 – 370 kW	
	HEM-HR90,-90A	R134a/R245fa	90 °C	70 – 230 kW	
Viking Heating Engines AS	HeatBooster S4	R1336mzz(Z) R245fa	160 °C 130 °C	28 – 188 kW 92 – 172 kW	Hubkolben (4 parallel)
	IWWDSS R2R3b	R134a/ÖKO1	130 °C	170 – 750 kW	
Ochsner	IWWDS ER3b	ÖKO1 (R245fa)	130 °C	120 – 400 kW	Schraube (TWIN bis 1,5 MW)
	IWWHS ER3b	ÖKO1 (R245fa oder R1233zd)	95 °C	60 – 640 kW	
Frigopol (& AIT)	HighButane 2.0	R600	130 °C	50 kW	Hubkolben
Hybrid Energy	Hybrid Heat Pump	R717 (NH ₃)	120 °C	0.25 – 2.5 MW	Hubkolben
Mayekawa	Eco Sirocco	R744 (CO ₂)	120 °C	65 – 90 kW	Schraube
	Eco Cute Unimo	R744 (CO ₂)	90 °C	45 – 110 kW	
Combitherm	HWW 245fa	R245fa	120 °C	62 – 252 kW	Hubkolben
	HWW R1234ze	R1234ze(E)	95 °C	85 – 1301 kW	
ENGIE (ex-Dürr thermeca)	Thermeco ₂ HHR	R744 (CO ₂)	110 °C	45 – 1'200 kW	Hubkolben (bis zu 6 parallel)
Oilon	ChillHeat P60 bis P450	R134a R1234ze(E)	100 °C	30 – 1'000 kW	Hubkolben (bis zu 6 parallel)
	Unitop 22	R1234ze(E)	95 °C	0.6 – 3.6 MW	
Frioetherm	Unitop 50	R134a	90 °C	9 – 20 MW	Turbo (zweistufig)
Star Refrigeration	Neatpump	R717 (NH ₃)	90 °C	0.35 – 15 MW	Schraube (Vilter VSSH 76 bar)
GEA Refrigeration	GEA Grasso FX P 63 bar	R717 (NH ₃)	90 °C	2 – 4.5 MW	Doppelschraube (63 bar)
Johnson Controls	HeatPAC HPX	R717 (NH ₃)	90 °C	326 – 1'324 kW	Hubkolben (60 bar)
	HeatPAC Screw Titan OM	R717 (NH ₃) R134a	90 °C	230 – 1'315 kW 5 – 20 MW	Schraube Turbo
Mitsubishi	ETW-L	R134a	90 °C	340 – 600 kW	Turbo (zweistufig)
Viessmann	Vitocal 350-HT Pro	R1234ze(E)	90 °C	148 – 390 kW	Hubkolben (2 bis 3 Stück parallel)

Tabelle 1: Auswahl an industriellen Kompressionswärmepumpen mit Vorlauftemperaturen von ≥ 90 °C (Graphik adaptiert aus [1]).

In der Regel kommen einstufige Kreislaufkonzepte zum Einsatz, die sich insbesondere im verwendeten Kältemittel und Verdichtertyp unterscheiden. Zum Einsatz kommen vor allem Schraubenverdichter (Ochsner, GEA, Kobelco), zweistufige Turbokompressoren (Friotherm, Mitsubishi) und mehrere parallel angeordnete Hubkolbenkompressoren (Viking Heat Engines, Combitherm, Viessmann, ENGIE, Oilon). Tendenziell beherrschen Hubkolbenverdichter kleinere Leistungen. Kreislaufoptimierungen werden durch den Einsatz eines internen Wärmeübertragers (Sicherstellung genügender Überhitzung), mit parallel geschalteten Verdichtern, Economiser-Kreisläufen mit Zwischeneinspritzung oder zweistufigen Kaskaden erreicht. Ochsner, Combitherm und Kobelco verwenden R245fa. Mayekawa und ENGIE setzen auf das natürliche Kältemittel CO₂. Durch den transkritischen CO₂-Kreislauf und den im Gaskühler vorhandenen Temperaturlgleit sind CO₂-Wärmepumpen aufgrund tiefer Rücklauftemperaturen besonders effizient bei der Warmwasserbereitung. Star Refrigeration, GEA Grasso und Johnson Controls setzen NH₃ ein mit entsprechend optimierten Verdichtern für hohe Drücke. Bild 7 stellt die experimentellen COP-Werte für verschiedene industrielle Wärmepumpen in Funktion des jeweiligen Temperaturhubs dar. Die COP-Werte liegen zwischen 1,6 und 5,8 bei einem Temperaturhub von 130 bis 25 K und nehmen mit höherem Temperaturhub tendenziell ab (gemäss Carnot-Beziehung). Die folgende Fit-Kurve (Gl. 1) beschreibt die angegebenen COP-Werte bei 45 % Gütegrad (Carnot-Effizienz, $\eta = \text{COP}/\text{COP}_{\text{Carnot}}$):

$$\text{COP}_H = 68.455 \cdot \Delta T_{\text{Hub}}^{-0.76} \quad (\text{Gl. 1})$$

Mit: COP_H : Leistungszahl im Heizungsfall

ΔT_{Hub} : Temperaturhub der Wärmepumpe von Quelle zu Senke in K

Der mittlere COP dieser Datenzusammensetzung liegt bei etwa 3,2 bei einem durchschnittlichen Temperaturhub von 61 K (Standardabweichung: ± 1.0 COP und ± 23 K). Außerdem sind die COP-Carnot-Kurven dargestellt (Annahme: 120 °C Vorlauftemperatur T_s). Die meisten experimentellen Daten liegen zwischen 40 und 60 % Gütegrad.

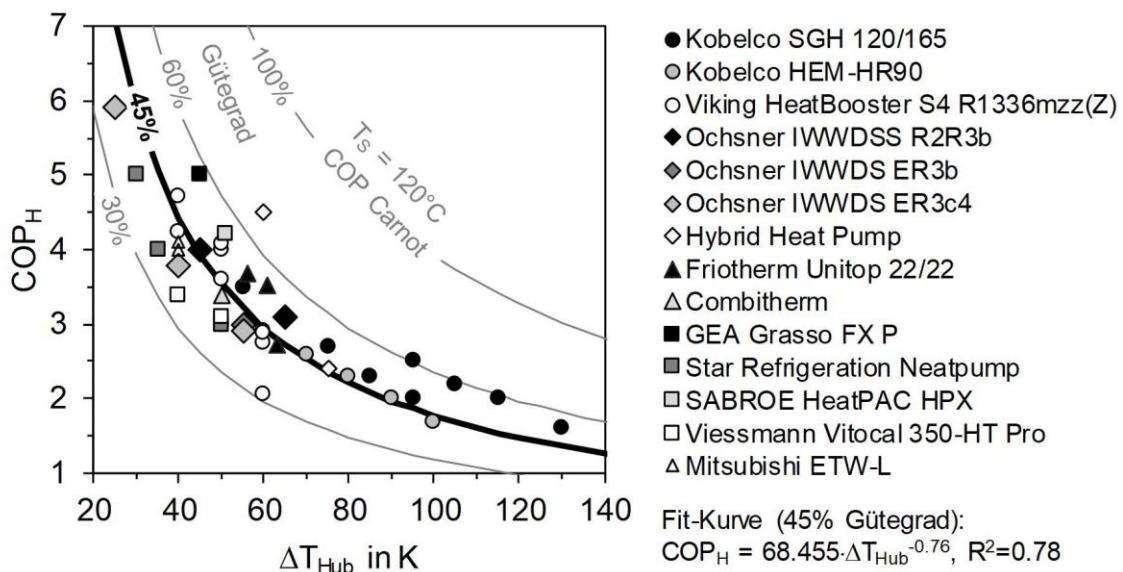


Bild 7: COP_H verschiedener industrieller Wärmepumpen in Abhängigkeit vom Temperaturhub. Durchschnittlicher COP_H = 3,2 ± 1,0, ΔT_{Hub} = 61 ± 23 K. Fit-Kurve (45% Gütegrad): COP_H = 68.455 · ΔT_{Hub}^{-0.76}, R² = 0,78 (Graphik aus [1]).

Positive Auswirkungen auf den COP haben ein geringerer Temperaturhub (< 50 K), ein Dauerbetrieb vorzugsweise unter Volllast und die gleichzeitige Nutzung von Wärme und Kälte aus der Wärmepumpe. Wird gleichzeitig auf der Wärmequellenseite auch eine Kühlwendung angeschlossen, erhöht sich der Nutzen der Wärmepumpe und der Gesamt-COP erhöht sich gemäss Gl. 2 um einen Faktor von etwa 1,5 bis 1,8 (bei 40 bis 90 K Temperaturhub).

$$\text{COP}_{\text{H+K}} = \text{COP}_{\text{H}} + \text{COP}_{\text{K}} = 2 \cdot \text{COP}_{\text{H}} - 1 \quad (\text{Gl. 2})$$

Mit: $\text{COP}_{\text{H+K}}$: Gesamt-COP (Heizen und Kühlen)

COP_{H} : COP Heizen

COP_{K} : COP Kühlen

Neue Wärmepumpen-Technologien

Des Weiteren gibt es neue, zukunftsträchtige Wärmepumpen-Technologien wie die Rotationswärmepumpe K7 von ECOP Technologies GmbH mit 400 bis 700 kW Heizleistung, oder die SPP HighLift Wärmepumpen von Olvono Technology AS mit einer typischen Heizleistung von 500 kW. Beide Technologien nutzen ein Arbeitsmedium, das während des gesamten Zyklus in der Gasphase verbleibt und eine hohe Temperaturflexibilität bietet.

Die SPP HighLift Wärmepumpe basiert auf dem Sterling-Kreislauf mit Helium (R704) und erreicht eine maximale Temperatur von 195 °C bei hohem Wirkungsgrad. Bei Abwärmennutzung bei 45 °C und Warmwasserbereitung bei 120 °C wird ein COP von 2,2 erreicht.

Die Rotationswärmepumpe K7 nutzt Fliehkräfte zur Verdichtung und anschliessenden Temperaturerhöhung, um einen effizienten Joule-Prozess zu realisieren. Im Vergleich zu einem konventionellen Zwei-Phasen-Zyklus ist die Wärmeübertragung an der Wärmesenke und –quelle sensibel und der Temperaturbereich des Prozesses kann je nach Anwendung eingestellt werden. Als Arbeitsgas wird ein natürliches Edelgasgemisch verwendet (GWP = 0), das Argon, Helium und Krypton enthält. Temperaturen bis 150 °C sind möglich. Detaillierte Berechnung in Kombination mit Messungen ergeben COPs von 5,5 bei 60 °C Wärmequelle (30 K Temperaturgleit) und 100 °C Senkentemperatur (40 K Temperaturgleit). Die Technologie der Rotations-Wärmepumpe eignet sich sehr gut für Trocknungsprozesse.

Verkaufte Wärmepumpen im Schweizer Markt

Bild 8 zeigt die Anzahl der verkauften Wärmepumpen auf dem Schweizer Markt in den letzten Jahren mit der Verteilung der Heizleistungsbereiche. Im Jahr 2017 wurden rund 20'000 neue Wärmepumpenanlagen installiert. Die Heizleistung der meisten dieser Anlagen war für den Wohnbereich bestimmt. Der Marktanteil der Wärmepumpen im Wohnungsmarkt (z.B. neue Einfamilienhäuser) liegt nach Angaben des BFE bei rund 80%.

Diese Zahlen zeigen, dass Haushaltswärmepumpen in der Schweiz gut etabliert sind. In grösserem Massstab, d.h. bei industriellen Wärmepumpen, werden jedoch andere Wärmeerzeugungssysteme mit fossilen Brennstoffen bevorzugt. Lediglich 89 bis 145 Wärmepumpenanlagen mit einer Heizleistung von mehr als 100 kW werden jährlich neu installiert. Trotz der eher geringen Stückzahlen stellen grosse Wärmepumpen ein wichtiges Energiepotenzial dar, und die Verkaufszahlen sind stabil.

Insgesamt entsprach die installierte Heizleistung von Industriewärmepumpen (>100 kW) in den letzten fünf Jahren durchschnittlich rund 36 MW pro Jahr. Bei spezifischen Investitions-

kosten (inkl. Installation) von etwa 480 bis 750 CHF/kW [8] entspricht dies einem potenziellen Investitionsvolumen von rund 17 bis 27 Mio. CHF für industrielle Wärmepumpen in der Schweiz. Leider liegen keine Marktdaten mit Informationen über das Temperaturniveau der industriellen Wärmepumpen vor. Auch ist die Anzahl der installierten Industriewärmepumpen europaweit weitgehend unbekannt, da von der EHPA (European Heat Pump Association) keine Verkaufszahlen veröffentlicht werden und es keine klare Unterscheidung der Hersteller zwischen Kälteanlagen und Wärmepumpen gibt.

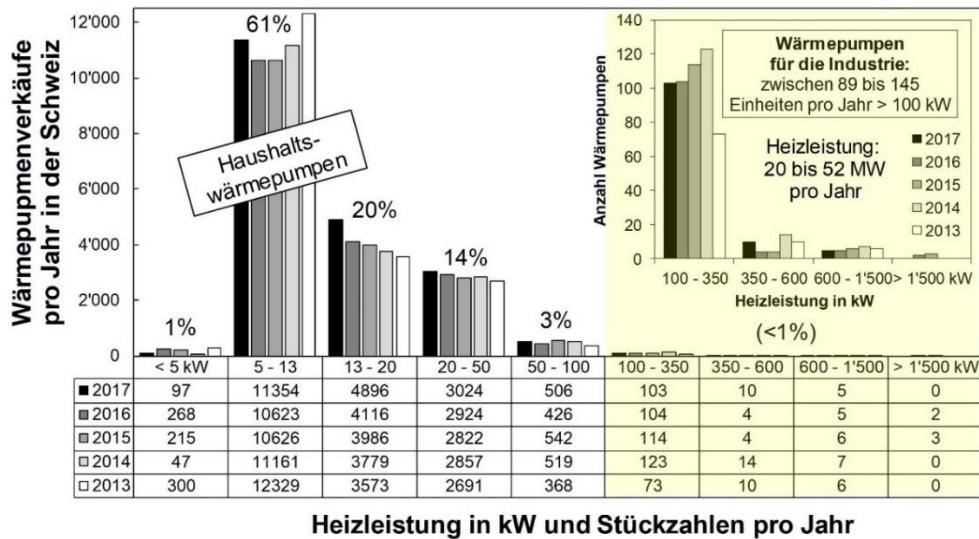


Bild 8: Jährliche Wärmepumpenverkäufe in der Schweiz (2013 bis 2017) in verschiedenen Leistungsklassen (Datenquelle: www.fws.ch).

Hemmisse für die weitere Verbreitung von industriellen Wärmepumpen

Trotz des grossen ökologischen Potenzials und den bereits kommerziell verfügbaren Wärmepumpenprodukten gibt es heute noch einige Hemmisse für die weitere Marktdurchdringung industrieller Wärmepumpen. Unter anderem werden folgende Gründe genannt [1]–[4], [8]:

- Geringer Bekanntheitsgrad der technischen Möglichkeiten und der wirtschaftlich realisierbaren Anwendungspotenziale von industriellen Wärmepumpen bei Anwendern, Beratern, Investoren, Anlagenplanern, Herstellern und Installateuren
- Mangelndes Wissen über die Integration von Wärmepumpen in bestehende industrielle Prozesse. Massgeschneiderte Designs führen zu einer kostenintensiven Integration
- Zu lange Amortisation Zeiten, die grösser sind als bei gas- oder ölbefeuerten Kesseln (gefordert sind ≤ 3 Jahre, zum Vergleich Prozesstechnik ≤ 2 Jahre, Gebäude/Heizung ≤ 6 bis 8 Jahre). Mit sinkenden Strom- und steigenden Gaspreisen werden geringere Amortisationszeiten erreicht.
- Konkurrierende Heizungstechnologien, welche hohe Temperaturen mit fossilen Brennstoffen zu niedrigen Energiepreisen erzeugen (hängt ab von Strom/Gas-Preis und CO₂-Steuer).
- Anforderungen im Bereich Wärmespeicherung, um den zeitlichen Versatz zwischen Bedarf und Angebot auszugleichen (z.B. WP für Bandlast, Gaskessel für Leistungsspitzen)
- Mangel an verfügbaren Kältemitteln im Hochtemperaturbereich mit niedrigem Treibhauspotenzial (GWP, engl. Global Warming Potential) und Ozonabbaupotenzial (ODP, engl. Ozone Depletion Potential) von Null
- Fehlen von Pilot- und Demonstrationssystemen, Schulungen und Veranstaltungen, welche die Verbreitung von Wärmepumpen-Wissen zusätzlich unterstützen

Eine grosse Hürde für die beschleunigte Marktdiffusion der Wärmepumpentechnologie im Industriebereich liegt in der Wirtschaftlichkeit. Zum einen sind grosse Wärmepumpen individuell und speziell entwickelt oder Produkte, die in kleinen Losgrössen hergestellt werden. Grössere Losgrössen würden die Produktivität aufgrund von Skaleneffekten erhöhen. Ein möglicher Weg wäre eine stärkere Modularisierung der Wärmepumpen, so dass einige Teile des Wärmepumpenkreises oder der hydraulischen Integration in grösseren Mengen produziert werden können. Steht beim Kunden genügend Bauraum zur Verfügung, können mehrere Standardwärmepumpen an ein grosses Wärmepumpensystem angeschlossen werden. Die zeitliche Verschiebung zwischen Wärmebereitstellung und Verfügbarkeit der Wärmesenke in industriellen Prozessen ist von entscheidender Bedeutung. Die Speicherung der produzierten Wärme kann dazu beitragen, den nicht zeitgleichen Bedarf und die Abwärmenutzung zu optimieren.

Eine weitere Hürde ist der Mangel an verfügbaren Verdichtern und Kältemitteln, was die Preise nochmals erhöht. Zu diesem Thema wurden in den letzten Jahren weltweit verstärkte Forschungsanstrengungen gestartet. Schliesslich ist es nicht immer einfach, eine Wärmepumpe in eine bestehende Anlage zu integrieren, da sie eine durchdachte Integration auf der Wärmesenken- und Wärmequellenseite erfordert. Um diese Hürde zu nehmen, müssen erfolgreiche Integrationen nachgewiesen und veröffentlicht werden.

Das IEA HPT TCP hat bereits mehrere Projekte zum Thema industrielle Wärmepumpen durchgeführt. Derzeit werden im IEA HPT Annex 48 Projekt (Industrielle Wärmepumpen, Phase 2) von 2016 bis 2019 Lösungswege erarbeitet, um bestehende Hemmnisse für die Markteinführung industrieller Wärmepumpen zu überwinden.

Die NTB Buchs nimmt dabei im Auftrag des BFE die Ländervertretung der Schweiz wahr und informiert die Schweizer Fachbranche über die aktuellen Ergebnisse. Das Hauptziel ist die Evaluation von nationalen Fallstudien von erfolgreichen Anwendungen von industriellen Wärmepumpen und die Aufbereitung der Informationen für die Schweizer Fachwelt.

Die im Rahmen des Swiss Competence Center for Energy Research Efficiency of Industrial Processes (SCCER EIP, www.sccer-eip.ch) erarbeiteten Forschungsresultate über HTWP werden im Projekt eingebracht.

Stand der Forschung

Im Bereich der Technologieentwicklung von industriellen Wärmepumpen laufen derzeit auf internationaler Ebene verschiedene experimentelle Forschungsprojekte mit Senkentemperaturen über 100 °C, um die Grenzen der erreichbaren COPs und Senkentemperaturen im Vergleich zu kommerziell erhältlichen Industriewärmepumpen auf ein höheres Niveau zu heben [1], [2] (siehe Tabelle 2). Die Entwicklung wird vor allem von Forschungsgruppen in Österreich, Frankreich, Deutschland, Japan, Norwegen, den Niederlanden, der Schweiz, Korea und China vorangetrieben.

Die meisten der untersuchten Wärmepumpenkreisläufe sind einstufig und enthalten teilweise einen internen Wärmeübertrager (IHX) und/oder einen Economiser-Zyklus mit Zwischeneinspritzung in den Kompressor. Vereinzelt gibt es auch experimentelle Beispiele von zweistufigen Zyklen und Studien mit zusätzlichen Unterkühlern/Wärmeübertrager für die kombinierte Warmwasserbereitung. Die Heizleistungen der Versuchsanlagen reichen von etwa 1,8 bis 12 kW, um die technische Machbarkeit im Labor zu demonstrieren. Grössere Prototypen können mehrere 100 kW Wärme erzeugen. Kolbenkompressoren werden hauptsächlich im Labormassstab eingesetzt. Die Bandbreiten der COPs liegen bei 120 °C Senkentemperatur und 30 K

Temperaturhub zwischen 5.7 bis 6.5 und zwischen 2,2 bis 2,8 bei 70 K Hub. Mit dem Kältemittel R1336mzz(Z) werden höchste Senkentemperaturen von fast 160 °C erreicht verwendet.

Organisation, Projektpartner	Bereiche der Wärmequellen- (grau) und -senken (schwarz) Temperaturen in °C	Max. Vorlauf-temperatur in °C	Heizleistung in kW	Zyklustyp	Kompressor	Kältemittel
Austrian Institute of Technology (AIT), Wien, Chemours, Bitzer, Österreich		160	12	einstufig mit IHX	Hubkolben	R1336mzz(Z)
Austrian Institute of Technology (AIT), Wien, Chemours, Bitzer, Österreich		150	12	einstufig	Hubkolben	R1336mzz(Z)
NTB Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs, SCCKER EIP, Schweiz		150	3 bis 10	einstufig mit zuschaltbarem IHX	Hubkolben	R1233zd(E)
PACO, Universität Lyon, EDF Electricité de France		145	300	Flash Tank	Doppel-Schraube	R718
Institut für Luft- und Kältetechnik (ILK), Dresden, Deutschland		140	12	einstufig	Hubkolben	HT 125
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Siemens AG, Deutschland		140	10	einstufig mit IHX	Hubkolben	LG6 (CF6)
Alter ECO, EDF Electricité de France		140	50 bis 200	einstufig mit IHX und Unterkühler	Doppel-Scroll	ECO3 (R245fa)
Tokyo Electric Power Company, Japan		135	150 bis 400	einstufig	Schraube	R601
Austrian Institute of Technology (AIT), Wien, Edtmayer, Ochsner, Österreich		130	250 bis 400	einstufig mit Economiser	Schraube	ÖKO1 (R245fa)
Tianjin Universität, China		130	16 bis 19	einstufig	Scroll	BY-5
Kyushu Universität, Fukuoka, Japan		125	1,8	einstufig	Doppel-Rotations-kompressor (zweistufig)	R1234ze(Z)
ECN, SmurfitKappa, IBK, Bronswerk, Niederlande		125	160	einstufig mit IHX und Unterkühler	Hubkolben	R600
Korea Institute of Energy Research, Daejeon, Südkorea		125	20 bis 40	einstufig mit Dampferzeugung	Hubkolben	R245fa/R718
GREE Electric Appliances, Zhuhai, China		120	6 bis 12	einstufig	Hubkolben	R245fa
Norwegian University of Science and Technology, SINTEF, Norwegen		115	20 bis 30	zweistufige Kaskade	Hubkolben	R600/R290
TU Graz, Österreich		110	20 bis 40	einstufig mit IHX	Hubkolben	R600
Tianjin University, China		110	44 bis 141	einstufig	Doppel-Scroll	BY-4
EDF Electricité de France, Johnson Controls		105	300 bis 500 900 bis 1'200	einstufig mit IHX und Economiser	Doppel-Schraube, Turbo	R245fa

Tabelle 2: Eine Auswahl an internationalen Forschungsprojekten im Bereich HTWP sortiert nach maximaler Vorlauftemperatur (Senke) mit weiteren Informationen zu Organisation, Projektpartner, Heizleistung, Wärmepumpenzyklus, Kompressortyp und Kältemittel [1], [2].

Die Hauptforschungsziele richten sich vor allem auf die folgenden Bereiche:

- Erweiterung der Grenzen der Quellen- und Senkentemperaturen auf höhere Werte
- Entwicklung und Erprobung neuer synthetischer HFO Kältemittel mit niedrigem GWP
- Einsatz natürlicher Kältemittel wie Kohlenwasserstoffe (R600, R601), CO₂ oder Wasser
- Steigerung der Effizienz von Wärmepumpen (z. B. durch mehrstufige Kreisläufe und die Kombination mit ölfreien Kompressoren)
- Entwicklung temperaturbeständiger Komponenten (z.B. Kompressoren, Ventile)
- Optimierungen und Entwicklung von Wärmepumpen-Systemen mit neuen Regelungsstrategien für höhere Temperaturen
- Scale-up von Funktionsmodellen in den industriellen Massstab (Demonstrationsprojekte)

Mit Verschärfung der F-Gase Verordnung dürfen bis 2022 nur noch Kältemittel mit einem niedrigen Treibauspotenzial (GWP < 150) in neuen Wärmepumpen für den gewerblichen Einsatz verwendet werden. Die treibhauswirksamen teilfluorierten Kohlenwasserstoffe (HFKW) R134a, R245fa und R365mfc (GWP von 1'430, 858 und 804) werden deshalb in den meisten Industrieländern einem *Phase-down* unterzogen (d.h. Reduktion von Produktion und Verbrauch). In der Schweiz sind die rechtlichen Grundlagen für Kältemittel in der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV) geregelt und industrielle Wärmepumpen mit Leistungen > 600 kW (Wärmequelle) sind vom HFKW-Verbot betroffen. Ersatzkältemittel mit niedrigem GWP werden zurzeit entwickelt und erforscht. Verschiedene Kältemittelhersteller

wie Chemours, ARKEMA, Honeywell, AGC Chemicals, Solvay, oder 3M arbeiten mit Hochdruck an der Entwicklung neuer synthetischer Kältemittel (4. Generation) mit verringertem Treibhauspotenzial (GWP).

Natürliche Kältemittel wie Wasser (R718), CO₂ (R744), Butan (R600) und Pentan (R601) sind vielversprechende umweltfreundliche Ersatzstoffe. Allerdings sind spezielle Ausführungen des Wärmepumpenzyklus mit mehrstufiger Verdichtung (z.B. Brüden Kompression) oder ausgeklügelte Sicherheitsmassnahmen aufgrund der Brennbarkeit (Sicherheitsklasse A3) nötig, was die Systemkosten erhöhen kann.

Verschiedene Hydrofluorolefine (HFO) und Hydrochlorfluorolefine (HCFO) wurden entwickelt, welche sehr niedrige GWPs aufweisen, nicht brennbar sind und ein grosses Potenzial für den Einsatz in industriellen Wärmepumpen haben. Die thermodynamischen Eigenschaften dieser synthetischen Kältemittel erlauben einen Wärmepumpenbetrieb bei Kondensationstemperaturen von 140 bis zu 160 °C. HFO-Kältemittel sind von der ChemRRV uneingeschränkt zugelassen, ebenso wie natürliche Kältemittel.

Speziell geeignet für HTWP sind die Kältemittel R1336mzz(Z), R1336mzz(E), R1233zd(E), R514A, R1234ze(Z), R1234ze(E) und R1224yd(Z). Simulationsstudien zeigen [1], [2], dass je nach Kältemittel ein Kompromiss zwischen COP (Effizienz) und VHC (volumetrische Wärmeleistung) gefunden werden muss. R1336mzz(Z) ist beispielsweise der nächste «Drop-in» Ersatzstoff für R365mfc, wobei R1224yd(Z), R1234ze(Z) und R1233zd(E) näher an R245fa liegen. Aber es fehlt noch an Forschung zu diesen Kältemitteln.

Hochtemperatur-Wärmepumpe im Labor der NTB Buchs

An der NTB Buchs wurde im Rahmen des SCCER EIP Projektes eine HTWP-Laboranlage entwickelt, welche es ermöglicht, verschiedene HFO- und HCFO-Kältemittel, wie R1336mzz(Z), R1233zd(E) und R1224yd(Z), bei Quellentemperaturen von 40 bis 80 °C und Senkentemperaturen von 80 bis 150 °C zu testen [9] (siehe Bild 9). Die Wärmepumpe erreicht eine Heizleistung von circa 5 bis 10 kW. Die Wärmesenke simuliert eine mögliche industrielle Anwendung (z.B. Dampferzeugung oder Trocknungsprozess) und die Quelle potenzielle Abwärme. Für den Versuchsaufbau wurden handelsübliche Standardkomponenten verwendet. Die HTWP ist einstufig aufgebaut und enthält einen drehzahlvariablen Hubkolbenverdichter, einen Ölabscheider und einen stufenlos zuschaltbaren internen Wärmeübertragers (IHX), um eine ausreichende Überhitzung des Kältemittels zu gewährleisten. Ein Expansionsventil steuert die Überhitzung (5 K) nach dem Verdampfer (vor dem IHX). In Anlehnung an die Norm DIN EN 14511 wurde eine Temperaturspreizung von 3 K auf der Quellenseite und 5 K auf der Senkenseite eingestellt. Bild 9 visualisiert das Prinzipschema. Dieser Wärmepumpenzyklus bietet eine einfache Konfiguration und erfordert nur eine minimale Anzahl von Gerätekomponenten.

Erste experimentelle Testergebnisse einer Parameterstudie mit dem handelsüblichen HCFO-Kältemittel R1233zd(E) sind in Bild 10 (A) bis (F) veranschaulicht. Im Referenzpunkt (W60/W110, 50 K Temperaturhub) wurde ein COP von 2.8 (ohne IHX) und 3.1 (mit IHX) gemessen (Bild 10 A). Die Messresultate zeigen, dass durch den Einsatz des IHX die Effizienz gegenüber einem einfachen Wärmepumpenkreislauf im Schnitt um etwa 15% erhöht werden kann [9]. Der COP steigt mit einem kleineren Temperaturhub gemäss der Carnot-Beziehung. Die leicht abnehmende COP-Kurve bei 70 K Hub ist ein Resultat des schmaleren Zweiphasengebietes für die Kondensation nahe der kritischen Temperatur sowie der steigenden Wärmeverluste des Systems durch natürliche Konvektion und Strahlung bei erhöhten Temperaturen.

Bild 10 (B) veranschaulicht die Heizleistung in Funktion der Wärmequellentemperatur bei konstantem Temperaturhub. Die Heizleistung nimmt stetig zu und beträgt bei Ref-Bedingungen circa 5.8 kW und steigt beim Betriebspunkt W80/W110 bis auf etwa 10 kW. An dieser Stelle erreicht der Wärmepumpen-Aufbau seine physikalischen Kapazitätsgrenzen.

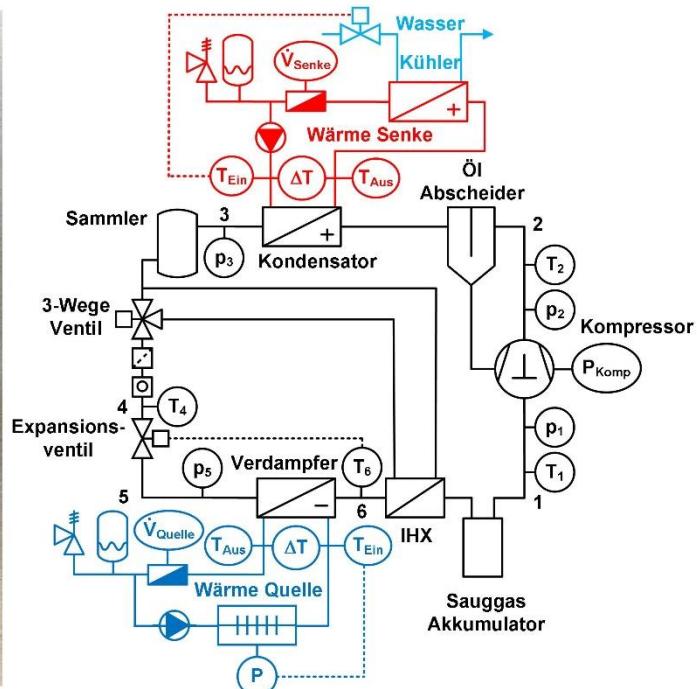
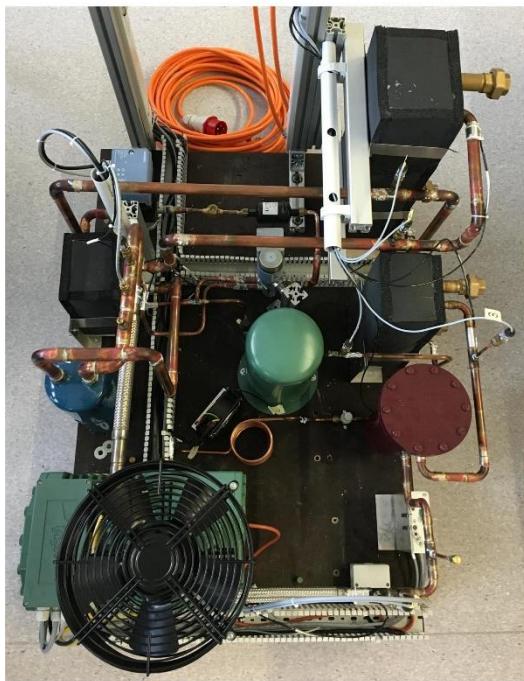


Bild 9: Experimenteller Aufbau und Prinzipschema der HTWP-Laboranlage für Senkentemperaturen bis 150 °C an der NTB Buchs (thermisch nicht isoliert) (Graphik aus [9]).

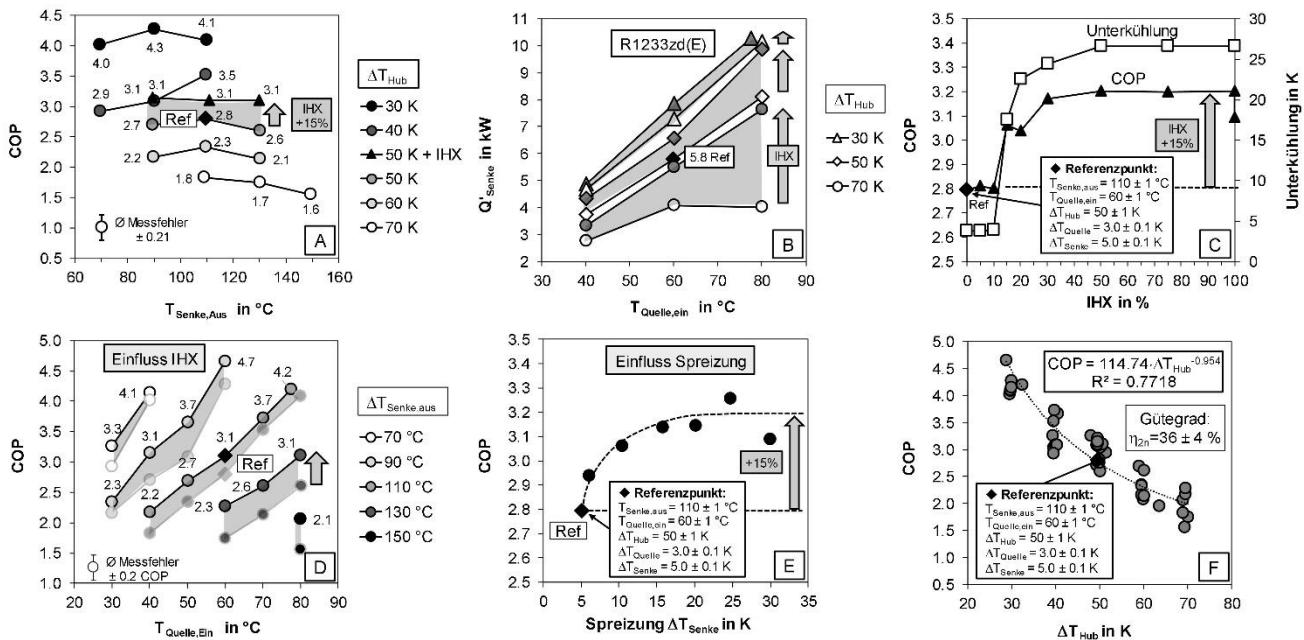


Bild 10: Experimentelle Resultate der untersuchten HTWP-Laboranlage mit Kältemittel R1233zd(E). (A) Betriebskennfeld des einfachen Wärmepumpenkreislaufs, (B) Heizleistung in Funktion der Quellentemperatur, (C) Einfluss des IHX auf den COP im Referenzpunkt (W60/W110), (D) Betriebskennfeld mit und ohne IHX, (E) Effizienzsteigerung durch Temperaturspreizung auf der Senke, (F) COP Messdaten vs. Temperaturhub (Quelle- zu Senkentemperatur) mit einem Gütegrad von 36 ± 4 % (Graphiken aus [9]).

Bild 10 (C) zeigt den Einfluss des IHX auf den COP über den gesamten Öffnungsgrad von 0 bis 100 % des 3-Wege-Ventils am Referenzpunkt. Der variabel zuschaltbare IHX führt zu einer zusätzlichen Flexibilität bei der Überhitzungsregelung für Kältemittel, die hohe Überhitzungsanforderungen erfordern (stark überhängendes nassdampfgebiet im Druck-Enthalpie-Diagramm). Bild 10 (D) illustriert das gesamte Betriebskennfeld der Wärmepumpe mit und ohne IHX bei gleichen experimentellen Temperaturbedingungen. Die Effizienzsteigerung durch den Einsatz des IHX ist klar ersichtlich. Bild 10 (E) zeigt den Einfluss einer höheren Senkenspreizung auf den COP als Beispiel für einen Aufwärmprozess. Mit steigendem Temperaturgleit von 5 auf 30 K (bei gleichbleibender Senkentemperatur) verbessert sich die Wärmeübertragung im Kondensator und erhöht den COP um circa 15 %. Bild 10 (F) stellt die ermittelten COPs der gesamten Messdaten in Funktion des jeweiligen Temperaturhubs dar. Die COP-Werte nehmen mit höherem Temperaturhub tendenziell ab (gemäß Carnot-Beziehung) und liegen auf einer Kurve mit $36 \pm 4\%$ Gütegrad.

Die experimentellen Messergebnisse sind vielversprechend, da die entwickelte HTWP-Laboranlage die Erprobung weiterer HFO- und HCFO-Kältemittel wie beispielsweise R1336mzz(Z) und R1224yd(E) in Zukunft ermöglicht. Die Grundfunktionalität des entwickelten HTWP-Systems konnte erbracht werden. Weitere Effizienzsteigerungen lassen sich durch die Reduzierung der Wärmeverluste bei erhöhten Temperaturen durch eine bessere Isolierung der Wärmepumpenkomponenten und -leitungen erreichen.

Schlussfolgerungen

Grosse Anwendungspotenziale für industrielle Wärmepumpen ergeben sich vor allem in der Lebensmittel-, Papier-, Metall- und Chemieindustrie. Bereits praktisch umgesetzte Anwendungsbeispiele zur Abwärmenutzung und Wärmerückgewinnung sind:

- Heisslufterzeugung und Luft-Vorwärmung für Trocknungsprozesse (Holz, Papier, Klärschlamm, Stärke, Ziegel, Tiernahrung) durch Abwärmenutzung
- Prozessdampferzeugung (Niederdruckdampf) für die Sterilisation und Pasteurisierung von Lebensmitteln (z.B. Milch) durch Nutzung von Kühlwasser oder feuchter Abluft
- Heisswassererzeugung für Wasch- und Reinigungsprozesse (Lebensmittel, Fleisch, Produktwäschen) in Kombination mit Kälteerzeugung
- Wärmerückgewinnung durch Rauchgaskondensation in Biomasseverbrennungen
- Fertigung von Spritzgussbauteile aus Kunststoffen (Erwärmung im Extruder und Abkühlung in der Spritzgussform)
- Nah- und Fernwärmenetze (z.B. von Stadtwerken und Kommunen)

Das Angebot von industriellen Wärmepumpen auf dem Markt mit grosser Leistung und hohen Vorlauftemperaturen ist in den vergangenen Jahren stetig gewachsen. Über 26 Hochtemperatur-Wärmepumpen (HTWP, Kompressionswärmepumpen) von 15 Herstellern wurden identifiziert mit Vorlauftemperaturen über 90°C. Der Dampferzeuger Kobelco SGH 165 von Kobe Steel (Japan) mit 165 °C, der HeatBooster von Viking Heat Engines AS (Norwegen) mit 160 °C, gefolgt von den Höchsttemperatur-Wärmepumpen (IWWDSS, IWWDS, IWWHS) von Ochsner (Österreich) mit 130 °C stellen den industriellen Benchmark dar. Die Produkte Eco Sirocco (Mayekawa), HWW 245fa (Combitherm), thermeco2 (ENGIE) und ChillHeat (Oilon) erreichen 100 bis 120 °C. Die experimentell gemessenen COP-Werte für die verschiedenen industriellen Wärmepumpen folgen in erster Näherung der Fit-Funktion $COP_H=68,455 \cdot \Delta T_{Hub}^{-0,76}$ (H: Heizen, ΔT_{Hub} Quelle zu Senke in K, bei 45% Gütegrad) und liegen zwischen 2,4 und 5,8 bei einem Temperaturhub von 95 bis 40 K. Die hohe internationale Forschungsaktivität und die Vielzahl laufender Demonstrationsprojekte deuten darauf hin,

dass industrielle Wärmepumpen mit Senkentemperaturen von 120 bis 160 °C in den kommenden Jahren verstärkt Marktreife erlangen werden. Dennoch liegt der Schwerpunkt dieser Forschungsprojekte noch immer auf der Technologieentwicklung, der automatisierten Steuerung und der Kostensenkung. Der Forschungsbedarf liegt insbesondere in:

- Erprobung neuer synthetischer HFO- und HCFO-Kältemittel mit GWP < 10
- Einsatz von natürlichen Kältemitteln wie R600, R601, CO₂, und H₂O
- Steigerung der Effizienz (z. B. durch mehrstufige Kreisläufe, mit ölfreien Kompressoren)
- Neue Regelungsstrategien und Scale-up

Im Rahmen des Projekts SCCER-EIP wurde an der NTB Buchs eine HTWP im Labor entwickelt. Die Grundfunktionalität wurde bei Wärmequellentemperaturen von 40 bis 80 °C und Senkentemperaturen zwischen 70 und 150 °C gezeigt. Im Bezugspunkt W60/W110 (50 K Temperaturhub) wurde mit dem handelsüblichen HCFO R1233zd(E) ein COP von 3,1 gemessen. Insbesondere erhöht der Einsatz eines internen Wärmetauschers den Wirkungsgrad im gesamten Betriebskennfeld um etwa 15% im Vergleich zu einem einfachen Wärmepumpenzyklus. Eine weitere COP-Steigerung von circa 15% wurde durch eine höhere Temperaturspreizung von 5 auf 30 K auf der Senkenseite erreicht. Zukünftige Arbeiten untersuchen die Eignung verschiedener HFO- und HCFO-Kältemittel mit niedrigem GWP für ihren Einsatz als Kältemittel in HTWP.

Danksagung

Dieses Forschungsprojekt ist Teil des Swiss Competence Center for Energy Research Efficiency of Industrial Processes (SCCER EIP) der Schweizer Innovationsagentur Innosuisse.

Quellen

- [1] C. Arpagaus, Hochtemperatur-Wärmepumpen: Marktübersicht, Stand der Technik und Anwendungspotenziale. Offenbach: VDE Verlag, 2018.
- [2] C. Arpagaus, F. Bless, M. Uhlmann, J. Schiffmann, und S. S. Bertsch, High Temperature Heat Pumps: Market Overview, State of the Art, Research Status, Refrigerants, and Application Potentials, *Energy*, 2018, 152, 985–1010.
- [3] R. M. Jakobs, Commercial and Industrial Heat Pump Application, IEA HPT Annex 35/48, 22. Tagung des BFE-Forschungsprogramms Wärmepumpen und Kälte, Burgdorf, 22. Juni 2016, 69–77.
- [4] N. Calame, F. Rognon, und O. Sari, High Temperature Heat Pumps for Industrial Processes, 23. Tagung des BFE-Forschungsprogramms Wärmepumpen und Kälte, Burgdorf, 14. Juni 2017, 1–17.
- [5] J.-L. Peureux, F. Sicard, and D. Bobelin, French industrial heat pump developments applied to heat recovery, 11th IEA Heat Pump Conference, Montréal, 12. Mai 2014.
- [6] A. Kemmler, S. Kreidelmeyer, P. Wüthrich, M. Keller, M. Jakob, and G. Catenazzi, Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000-2015 nach Verwendungszwecken, 2016, 1–96.
- [7] P. Nellissen und S. Wolf, Heat Pumps in Non-Domestic Applications in Europe: Potential for an Energy Revolution, 8th EHPA European Heat Pump Forum, Brüssel, 28. Mai 2015, 1–17.
- [8] S. Wolf, R. Flatau, und P. Radgen, Rahmenbedingungen für die Anwendung von Grosswärmepumpen in der Schweizer Industrie, 23. Tagung des BFE-Forschungsprogramms Wärmepumpen und Kälte, Burgdorf, 14. Juni 2017, 1–10.
- [9] C. Arpagaus et al., Hochtemperatur-Wärmepumpe mit HFO- und HCFO-Kältemitteln, *KI Kälte Luft Klimatechnik*, 12/2018, 45–53.