

Industriewärmepumpen in Österreich: Status Quo und Potentiale

Veronika WILK⁽¹⁾, Thomas FLECKL⁽¹⁾, Alexander ARNITZ⁽²⁾, René Rieberer⁽²⁾

(1) AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Giefinggasse 2, 1210 Wien,
0664 6207794, veronika.wilk@ait.ac.at, www.ait.ac.at,
0664 2351917, thomas.fleckl@ait.ac.at, www.ait.ac.at

(2) Institut für Wärmetechnik, TU Graz, Inffeldgasse 25B, 8010 Graz
0316 873 7801, alexander.arnitz@tugraz.at
0316 873 7302, rene.rieverer@tugraz.at

Kurzfassung:

Die österreichische Industrie ist mit rund 27% des Jahresendenergieverbrauchs nach dem Verkehrssektor der zweitgrößte Energieverbraucher, der, um die internationalen Klimaschutzziele zu erreichen, auf lange Frist mit erneuerbarer Energie versorgt werden soll. Wärmepumpen für industrielle Anwendungen werden als ein zentrales Element in der zukünftigen Energieinfrastruktur gesehen und können einen wichtigen Beitrag zur Effizienzsteigerung industrieller Prozesse und zur Vermeidung von CO₂-Emissionen leisten. Dieser Beitrag behandelt den Status Quo der Industriewärmepumpen in Österreich und gibt einen Überblick über die Anwendungsmöglichkeiten.

Es wurden Beispiele für industrielle Wärmepumpen in Österreich recherchiert und Expertengespräche mit Herstellern und Industrieunternehmen geführt. Zusätzlich wurden Verkaufsstatistiken, Daten der Statistik Austria, die Österreichische Technologieroadmap für Wärmepumpen, sowie Studien und Forschungsprojekte ausgewertet.

Es wurden rund 70 Wärmepumpeninstallationen in österreichischen Industriebetrieben erhoben und analysiert. Am häufigsten werden Wärmepumpen derzeit in der Lebensmittelindustrie eingesetzt. Die gängigste Wärmequelle dieser Industriewärmepumpen ist die Abwärme aus gekühlten Prozessen und Abwärmeströme (Abluft, Abwasser), denen noch Wärme entzogen werden kann. Außerdem wird die Abwärme von Kältemaschinen, Druckluftanlagen sowie von Rauchgaskondensationsanlagen genutzt. Am häufigsten werden die Industriewärmepumpen zur Beheizung von Gebäuden eingesetzt (rund 50%) oder um Fernwärme einzuspeisen (ca. 30%). Prozesswärmebereitstellung kommt in rund 16% der Fälle vor. Im Rahmen dieses Beitrags werden ausgewählte Beispiele industrieller Wärmepumpeninstallationen in der Lebensmittel- und Metallindustrie sowie in Kraftwerken vorgestellt.

Trotz marktverfügbarer und ausgereifter Wärmepumpen unterschiedlicher Leistungsklassen und hohem technischen Potential nimmt die Verbreitung der Wärmepumpen in der Industrie nur langsam zu. Effizienzsteigerung und die Vermeidung von CO₂-Emissionen können zukünftig wichtige Treiber zur weiteren Verbreitung darstellen.

Keywords: Abwärmenutzung, Effizienzsteigerung, Industrie

1 Einleitung

Effiziente Energienutzung in industriellen Prozessen kann einen wesentlichen Beitrag zu Erreichung der Klimaziele leisten. Besondere Bedeutung kommt dabei der Nutzung von Abwärme zu. Forman et al. [1] haben errechnet, dass im Jahr 2016 weltweit 106 EJ in der Industrie verbraucht wurden. Davon wurden 52 EJ oder 49% genutzt, 54 EJ sind aber in Form von Abwärme verloren gegangen. Die Verluste sind zu rund zwei Drittel auf Abwärme in Abgasen und Abwasser, sowie zu einem Drittel auf Strahlung, Reibung, Widerstand, etc. zurückzuführen. Die Abwärme fällt auf verschiedenen Temperaturniveaus an, 42% mit unter 100°C, 20% zwischen 100 und 299°C und 38% der Abwärme mit über 300°C.

Wärmepumpen für industrielle Anwendungen ermöglichen die Nutzbarmachung von Niedertemperaturabwärme und werden daher als ein zentrales Element in der zukünftigen Energieinfrastruktur gesehen. So können sie einen wichtigen Beitrag zur Effizienzsteigerung industrieller Prozesse und zur Vermeidung von CO₂-Emissionen leisten [2], [3].

Dieser Beitrag behandelt den Status Quo der Industriewärmepumpen in Österreich und gibt einen Überblick über die Anwendungsmöglichkeiten und Potentiale.

2 Industriewärmepumpen in Österreich: Status Quo

Zur Darstellung der aktuellen Situation wurden Beispiele für industrielle Wärmepumpen in Österreich recherchiert und Expertengespräche mit Herstellern und Industrieunternehmen geführt. Zusätzlich wurden Verkaufsstatistiken, Daten der Statistik Austria, die Österreichische Technologieroadmap für Wärmepumpen [3], sowie Studien und Forschungsprojekte ausgewertet. Diese Arbeiten wurde im Rahmen der österreichischen Beteiligung am IEA HPT Annex 48 Industriewärmepumpen, Phase 2 durchgeführt.

Der österreichische Wärmepumpenmarkt wird von Heizungswärmepumpen dominiert, wobei der Großteil der Anlagen Heizleistungen von bis zu 20 kW aufweist. Industriewärmepumpen machen einen sehr kleinen Teil aus. Sie werden seit 2012 separat nach folgender Definition erhoben: Wärmepumpen im großen Leistungsbereich, die in der Regel projektspezifisch für industrielle und gewerbliche Zwecke geplant, gefertigt und installiert. Die Entwicklung des Inlandsmarktes ist in Abbildung 1 dargestellt. [4]

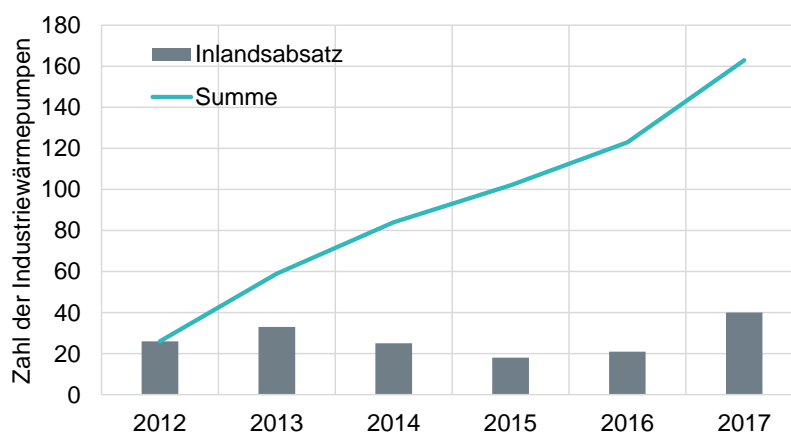


Abbildung 1: Inlandsmarkt für Industriewärmepumpen, [4]

2.1 Statistische Auswertung der Fallstudien

Es wurden 64 Beispiele für Industriewärmepumpen in Österreich erhoben. Dabei wurden jene Anlagen berücksichtigt, die wärmequellen- und/oder senkenseitig in einen industriellen oder gewerblichen Prozess eingebunden sind. Die Beispiele stammen aus verschiedenen Branchen, deren gute Eignung für Wärmepumpen bereits bekannt ist, wie der Lebensmittelindustrie (17 Beispiele), Energieversorger (11 Beispiele) und der metallverarbeitenden Industrie (10 Beispiele). Abbildung 2 gibt einen Überblick über die verschiedenen Sektoren.

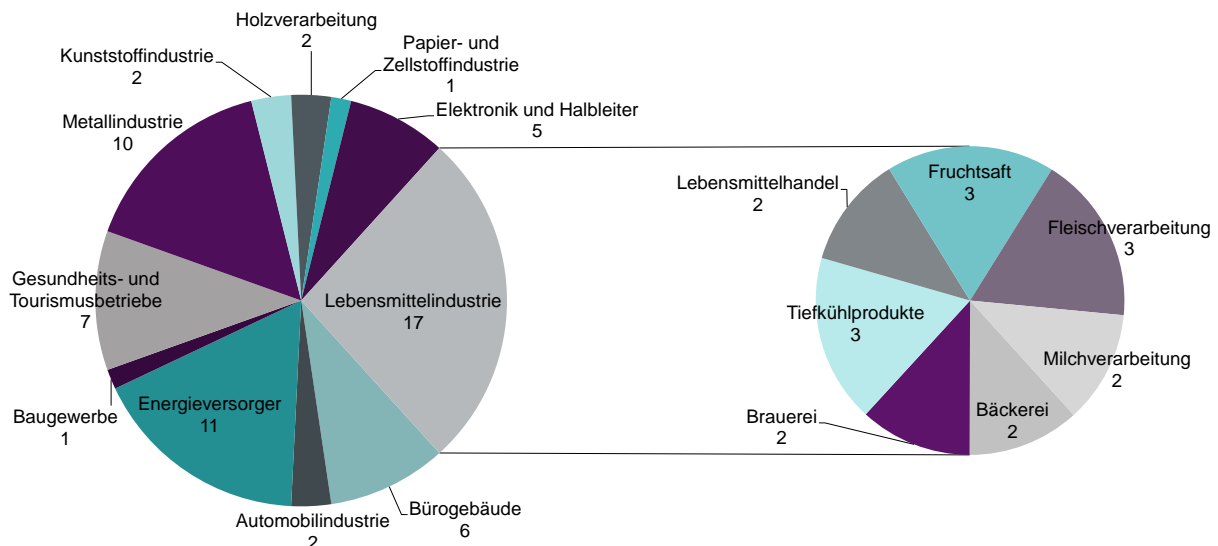


Abbildung 2: Verteilung der Industriewärmepumpen auf Branchen, in Anlehnung an [5]

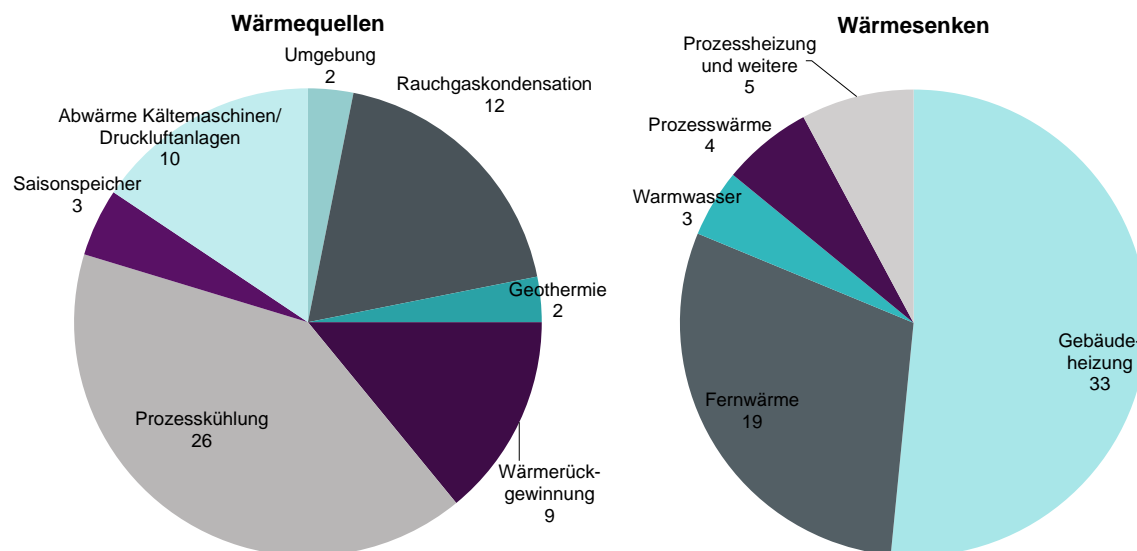


Abbildung 3: Wärmequellen und -senken für Industriewärmepumpen, in Anlehnung an [5]

Es werden verschiedene Wärmequellen genutzt. Die gebräuchlichsten Wärmequellen sind Prozesse, die gekühlt werden müssen, und Abwärmeströme, denen noch Wärme entzogen werden kann. Darüber hinaus wird die Abwärme von Kältemaschinen und Druckluftanlagen

sowie die Rauchgaskondensation genutzt (Abbildung 3 links). Industrielle Wärmepumpen werden am häufigsten zur Beheizung von Gebäuden (33 Beispiele) oder zur Bereitstellung von Fernwärme (19 Beispiele) eingesetzt. Wärmebereitstellung für Prozesse erfolgt in 9 Beispielen (Abbildung 3 rechts).

In den erfassten Beispielen werden zu 88% Kompressionswärmepumpen und zu 9% Absorptionswärmepumpen eingesetzt, in 3% der Fälle sind es sowohl Absorptions- als auch Kompressionswärmepumpen. Abbildung 4 gibt einen Überblick über die Leistungszahlen (COP, Coefficient of Performance), die zu den Kompressionswärmepumpen berichtet wurden.

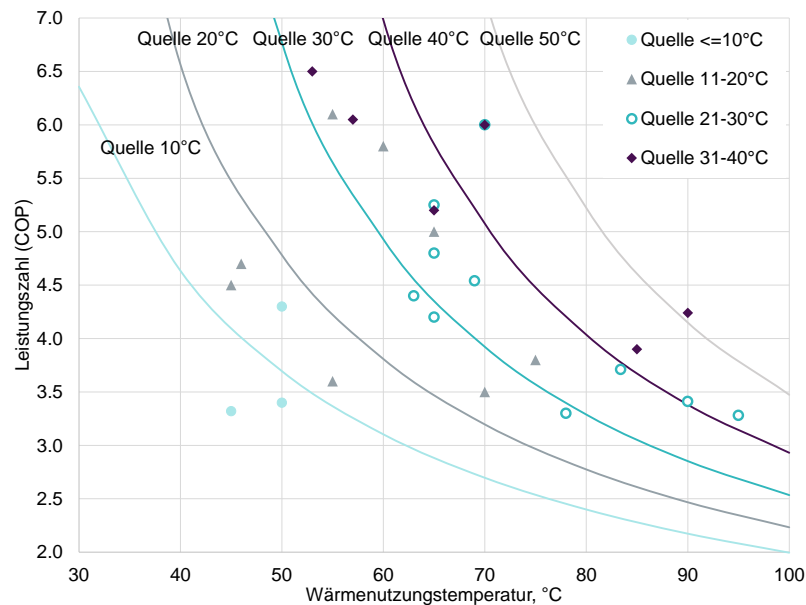


Abbildung 4: Leistungszahlen für Kompressionswärmepumpen (27 Datenpunkte)

Dabei handelt es sich um den Heiz-COP (Verhältnis von abgegebener Wärme zu aufgenommener elektrischer Energie), der unterschiedlich erfasst wurde. Es sind 27 Datenpunkte vorhanden, darunter sind sowohl Leistungsdaten aus den Datenblättern der Hersteller, Angaben der Betreiber zur Auslegung der Wärmepumpe sowie Monitoringergebnisse. Die verschiedenen Farben stehen für unterschiedliche Quellenaustrittstemperaturen. Die Linien dienen zur Orientierung und zeigen den Verlauf des COP in Abhängigkeit von der Wärmenutzungstemperatur (Senkenaustrittstemperatur) für verschiedene Quellenaustrittstemperaturen (10, 20, 30, 40 und 50°C). Es handelt sich dabei um eine fiktive Wärmepumpe mit einem konstanten Carnot-Gütegrad von 0,5 mit einem Pinch von 2 K im Verdampfer und Kondensator (siehe unten). Der Großteil der erhobenen COPs liegt im Bereich von 3,5-5,5 (ca. 70%), das Minimum beträgt 3,3 und das Maximum 6,5.

Auf Basis des COPs kann man mögliche CO₂- und Kosteneinsparungen im Vergleich zur Wärmebereitstellung mit einem Gaskessel berechnen. Wärmepumpen mit einem COP von 3,5-5,5 sparen 70-81% der CO₂-Emissionen. Es können 33-58% der laufenden Energiekosten gespart werden, wenn man von Strompreisen für Nicht-Haushaltskunden, die

20-70 GWh/a abnehmen, ausgeht. Werden mehr als 150 GWh/a bezogen, können die Einsparungen im Bereich von 59-74% liegen.¹

Der Carnot-Gütegrad einer Wärmepumpe beschreibt, wie nahe die Leistungszahl des realen Kreisprozesses an die maximal mögliche Leistungszahl des idealen Carnot-Kreisprozesses herankommt und ist das Verhältnis der realen zur idealen Leistungszahl. Die Leistungszahl des idealen Carnotprozesses hängt nur von der Verdampfungs- und Kondensationstemperatur ab. Um die Verdampfungs- und Kondensationstemperaturen für die Beispiele abzuschätzen, wird davon ausgegangen, dass die Verdampfungstemperatur 2 K geringer als die Quellenaustrittstemperatur und die Kondensationstemperatur 2 K höher als die Senkenaustrittstemperatur ist. In Abbildung 5 werden die so ermittelten Carnot-Gütegrade über dem Temperaturhub (Senkenaustrittstemperatur – Quellenaustrittstemperatur) aufgetragen. Die meisten Daten sind zu Wärmepumpen mit R134a (11 Datenpunkte) und zu Ammoniak-Wärmepumpen ($\text{NH}_3 = \text{R717}$, 6 Datenpunkte) verfügbar. Die Carnot-Gütegrade liegen überwiegend zwischen 0,4 und 0,7. Für die Ammoniakanlagen wurden tendenziell höhere Werte zwischen 0,7 und 0,8 errechnet. Wolf et al. [9] geben typische Carnot-Gütegrade für Wasser/Wasser-Wärmepumpen mit 0,45-0,5 an. Die auffallend hohen Carnot-Gütegrade der Ammoniakanlagen können zum einen damit begründet werden, dass Ammoniak ein Kältemittel mit guten thermodynamischen Eigenschaften ist, dessen Kreisprozess dem thermodynamischen Optimum näher kommt als andere Kältemittel. Zum anderen berücksichtigt die Abschätzung der Kondensationstemperatur das Enthitzen des Kältemittels im Kondensator nicht. Dadurch ist die tatsächliche Kondensationstemperatur geringer als angenommen. Damit steigt die Leistungszahl des idealen Kreisprozesses und der Gütegrad ist geringer als der geschätzte Wert.

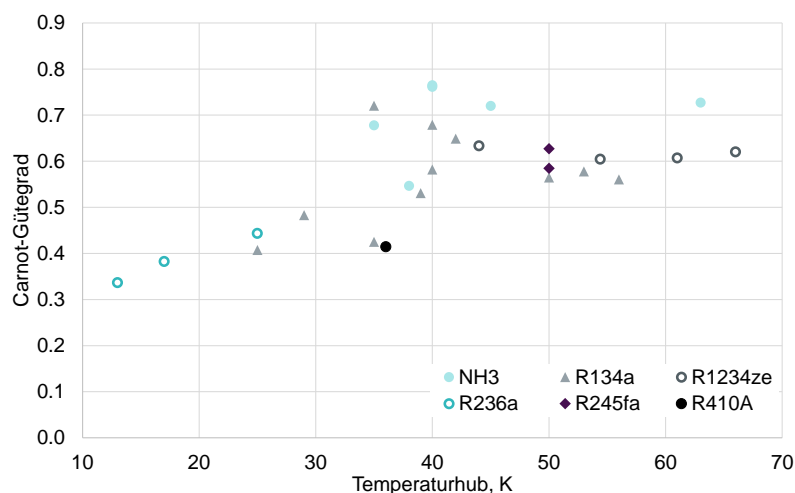


Abbildung 5: Gütegrad für Kompressionswärmepumpen (27 Datenpunkte)

Abbildung 6 zeigt die Beispiele sortiert nach dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme (61 Beispiele), die Branchen, in denen Wärmepumpen am häufigsten zum Einsatz kommen

¹ Wirkungsgrad des Gaskessels 90%, CO₂-Emissionen der Stromerzeugung 276 g/kWh [6], CO₂-Emissionen für Erdgas 236 g/kWh [6], Energiepreise für das erste Halbjahr 2017: Strompreis für Nicht-Haushaltskunden mit 20-70 GWh/a 8,8 ct/kWh [7], Strompreis für Nicht-Haushaltskunden >150GWh/a im Jahr 2017 5,4 ct/kWh [7] Gaspreis für Industriekunden 3,4 ct/kWh [8]

– Lebensmittelindustrie, Energieversorger, Metallverarbeitung – sind farblich markiert. Nach 2012 wurden zahlreiche Anlagen in Betrieb genommen. Das macht deutlich, dass die Verbreitung von industriellen Wärmepumpen in Österreich zunimmt und dass auch mehr Informationen zu diesen Anlagen veröffentlicht werden - entweder von Herstellern in Form von Referenzen, von Betreibern, die ihre Systeme auf Fachkonferenzen präsentieren, oder von Plattformen wie "klimaaktiv" [10], wo Energieeffizienzprojekte vorgestellt und ausgezeichnet werden.

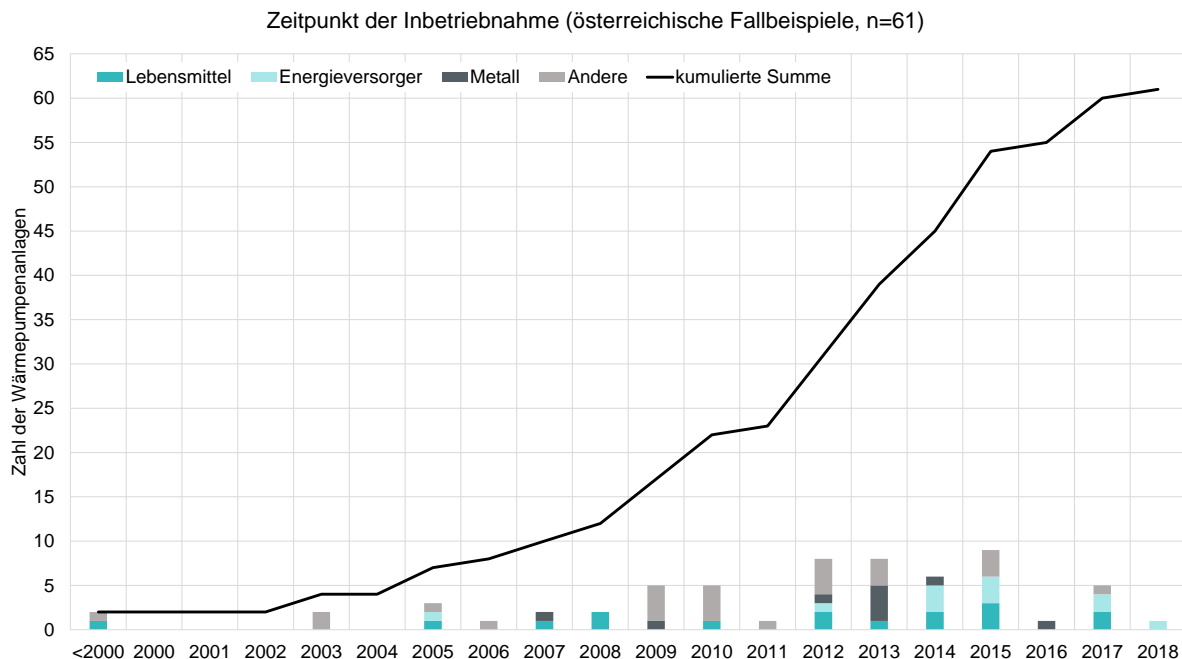


Abbildung 6: Zeitpunkt der Inbetriebnahme

2.2 Anwendungsbeispiele

Im Folgenden werden drei Industrierärmepumpen exemplarisch detaillierter vorgestellt. Sie unterscheiden sich in der Anlagengröße, der Wärmenutzung und der Branche und zeigen damit auch die Vielfalt der möglichen Anwendungen.

2.2.1 Metallverarbeitung und Fernwärmebereitstellung

Die Nutzung der im Stahl- und Walzwerk Marienhütte in Graz anfallenden Prozessabwärme für Fernwärmezwecke ist der Kern der Kooperation zwischen dem Energiedienstleister und Fernwärmenetzbetreiber Energie Graz GmbH & Co KG und dem Stahl- und Walzwerk Marienhütte GmbH. Diese Kooperation begann bereits 1992 mit der direkten Nutzung von Prozessabwärme bei einer Temperatur von bis zu 100°C und wurde daraufhin laufend erweitert. Durch die Errichtung einer Pufferspeicheranlage im Jahr 2011 konnte die direkte Einspeisung von Prozessabwärme in das Fernwärmenetz auf 60 GWh/Jahr gesteigert werden (das sind ca. 5 % der im Jahr 2017 erzeugten Fernwärme in Graz). Um diese Kooperation weiter auszubauen, errichtete die Energie Graz im Jahr 2015 eine Energiezentrale auf dem Betriebsgelände der Marienhütte und bereits im Mai 2016 konnten dort zwei Wärmepumpen mit einer Gesamtleistung von bis zu 11,5 MW in Betrieb genommen werden. Diese Wärmepumpen nutzen Prozessabwärme als Wärmequelle, welche aufgrund der niedrigen Temperatur sonst nicht für die Fernwärmeversorgung genutzt

werden kann, und liefern seit der Inbetriebnahme Wärme in das Grazer Fernwärmenetz. Im Jahr 2017 wurde mit der Vorbereitung für die Errichtung des neuen Niedertemperatur-Fernwärmenetzes im Stadtteil Reininghaus begonnen und ein erster Teil der modular erweiterbaren, thermischen Wasserspeicher samt Speicherkreislauf errichtet. Die Wärmespeicher wurden in einen bestehenden, nicht mehr genutzten Getreidesilo integriert („Lechthaler Silo“).

Abbildung 7 zeigt ein vereinfachtes Schema der hydraulischen Anbindung der in der Energiezentrale installierten Wärmepumpen. Die Wärmepumpen nutzen Wärme aus dem Walzwasserwirtschafts-Kreislauf (WaWi-Kreislauf) als Wärmequelle. Es handelt sich dabei um einen offenen Kühlkreislauf, der Kühlwasser für die Walzstraße mit 29°C bereitstellt. Die Anbindung zu den Verdampfern der Wärmepumpen erfolgt über einen eigenen Verdampferkreislauf (MH-SK-Kreislauf), der mit zwei Trennwärmetauschern (WT2) vom WaWi-Kreislauf getrennt ist. Die Kondensatoren der Wärmepumpen werden entweder direkt mit dem Wasser des bestehenden Fernwärmenetzes (FW-Kreislauf) oder mit dem Wasser des neu zu errichtenden Niedertemperatur-Fernwärmenetzes (NT-RH-Kreislauf) durchströmt. Des Weiteren sind in Abbildung 7 der Speicher-Kreislauf, sowie der Wärmetauscher (WT5) zur Übertragung von Wärme zwischen den beiden Fernwärmenetzen dargestellt.

Die Trennung des Verdampfer-Kreislaufes vom WaWi-Kreislauf der Marienhütte gewährleistet, dass die innerbetrieblichen Kühlkreise auch während der Durchführung von Arbeiten auf der Seite des Fernwärmenetzes in Betrieb bleiben können. Wenn die Wärmeabnahme durch das Fernwärmenetz unterbrochen ist, wird die Prozessabwärme über die vorhandenen Kühltürme abgeführt. Durch dieses Konzept der Einbindung besteht keine Gefahr für den Produktionsprozess und im Wärmepumpenbetrieb werden die Kosten für die erforderliche Wärmeabfuhr über die Kühltürme minimiert.

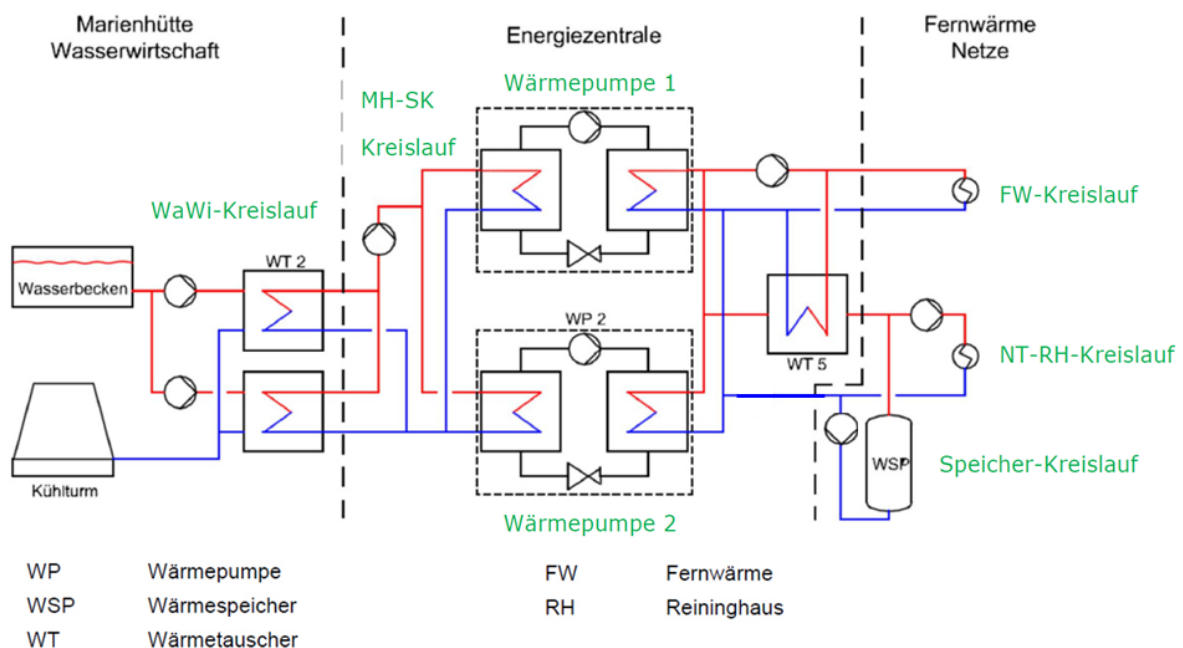


Abbildung 7: Hydraulische Anbindung der Wärmepumpen am Standort der Energiezentrale an den WaWi-Kühlkreislauf des Stahl- und Walzwerks sowie die Anbindung an das bestehende und das neu zu errichtende Fernwärmenetz Graz (vereinfachte Darstellung) [11]

Die Verdampfer der beiden Wärmepumpen sind parallel angeordnet und werden über die beiden parallel angeordneten Trennwärmetauscher (WT2) mit Wärme (2 x 3,9 MW) versorgt. Dabei bewegen sich die Verdampfer-Eintrittstemperaturen im Bereich von 32-35°C und die Verdampfer-Austrittstemperaturen im Bereich von 25-29°C. Der Volumenstrom der Umwälzpumpen und eine Beimischarmatur, welche in Abbildung 7 nicht dargestellt ist, können zur Beeinflussung der Temperatur im Verdampferkreislauf verwendet werden.

Um die Wärme der Kondensatoren in das bestehende Fernwärmenetz einzuspeisen, sind Einspeisepumpen erforderlich, die gegen den Netzdruck arbeiten. Der Druck beträgt im Vorlauf des bestehenden Fernwärmenetzes ca. 10,5 bar und im Rücklauf ca. 4 bar. Bei Einspeisung in das neu zu errichtende Niedertemperatur-Fernwärmenetz wird der Durchfluss durch die Kondensatoren direkt durch die Fernwärmenetzpumpen erbracht. Zusätzlich ist eine Speicherladepumpe zur Beladung der modularen Wasserspeicher installiert.

Bei den Wärmepumpen handelt es sich um zwei Großwärmepumpen vom Typ Unitop der Firma Friothers. Eine Wärmepumpe hat Abmessungen von 8,2/3,7/3,3 m (L/B/H), ein Gewicht von ca. 30 Tonnen und wird mit dem Kältemittel R1234ze (GWP Wert kleiner 1; vgl. [12]), betrieben. In einer Wärmepumpe sind zwei Turboverdichter verbaut, welche sowohl parallel als auch seriell durchströmt werden können. Das Umschalten zwischen parallelem und seriellen Betrieb erfolgt im Stillstand. Die maximale Nutzttemperatur am Kondensatoraustritt beträgt 95°C und wird im seriellen Betrieb erreicht. Bei seriellen Betrieb der Turboverdichter und Wärmesenktemperatures am Kondensator von ca. 63/90°C kann eine Wärmeleistung von 3,3 MW bereitgestellt werden. Bei parallelem Betrieb der Turboverdichter und Temperaturen am Kondensator von ca. 43/69°C erhöht sich die mögliche Wärmeleistung auf 5,75 MW. Die Temperaturen am Verdampfer betragen im Serienbetrieb ca. 33,8/29°C und im Parallelbetrieb 33/25°C. Die Wärmepumpen können auch als Kältemaschinen genutzt werden, um ein mögliches Kältenetz zu versorgen.

Die Leistungsregelung der Wärmepumpen erfolgt über die Verdichterdrehzahl, Leitschaufelstellungen und die Verdampfungstemperatur. Bei parallelem Betrieb der Verdichter ist eine Reduzierung der Leistung durch Drehzahländerung auf bis zu 30% möglich. Bei seriellen Betrieb kann die Leistung durch Drehzahländerung auf bis zu 60% reduziert werden.

Der Betrieb der Wärmepumpen soll soweit als möglich ganzjährig erfolgen. Bei der Einspeisung in das bestehende Fernwärmenetz ist jedoch zu beachten, dass die Wärmepumpen bis 95°C Vorlauftemperatur bereitstellen können, bei höheren Netzvorlauf-temperaturen werden die Wärmepumpen ausgeschaltet. Beim neuen Niedertemperatur-Fernwärmenetz Reininghaus ist eine maximale Vorlauftemperatur von 72°C vorgesehen, wodurch ein ganzjähriger Betrieb der Wärmepumpen bei paralleler Durchströmung der Turboverdichter möglich wird.

2.2.2 Biomasseheizwerk und Fernwärmebereitstellung

Im Biomasseheizkraftwerk Klagenfurt-Ost werden ein biomassebefeuerter Dampfturbinenkreislauf, ein Wärmetauscher zur direkten Rauchgaskondensation und eine Absorptionswärmepumpe zur zusätzlichen Rauchgaskondensation für die Wärmeversorgung des Fernwärmenetzes eingesetzt. Das Biomasseheizkraftwerk Klagenfurt-Ost ist eines von drei Biomasseheizkraftwerken, die 90% des Wärmebedarfs für das Fernwärmenetz

Klagenfurt bereitstellen und von der Bio-Energie Kärnten (Bioenergiezentrum GmbH) betrieben werden.

Die Absorptionswärmepumpe wurde von der Firma EBARA (China) hergestellt und in zwei Teilen zu je 70 Tonnen geliefert. Die Absorptionswärmepumpe verwendet $H_2O/LiBr$ als Arbeitspaar und erreicht eine Heizleistung von ca. 20 MW und einer Effizienz, welche durch das Verhältnis von im Absorber und Kondensator abgeführter Wärme zur im Generator zugeführten Wärme definiert ist, von rund $COP_H = 1,77$ bei Wärmequellentemperaturen von ca. $45/35^\circ C$ (Ein-/Austritt Verdampfer), Wärmesenktemperaturen von ca. $60/70^\circ C$ (Eintritt Absorber/ Austritt Kondensator) und Antriebstemperaturen von ca. $130/120^\circ C$ (Ein-/Austritt Generator).

Der Verdampfer der Absorptionswärmepumpe ist mit einem zusätzlichen Hydraulikkreislauf mit dem Wärmetauscher zur Rauchgaskondensation verbunden. Der Volumenstrom in diesem Hydraulikkreislauf liegt zwischen $800\text{ m}^3/h$ und $1000\text{ m}^3/h$ und die übertragene Heizleistung beträgt ca. 7-8 MW.

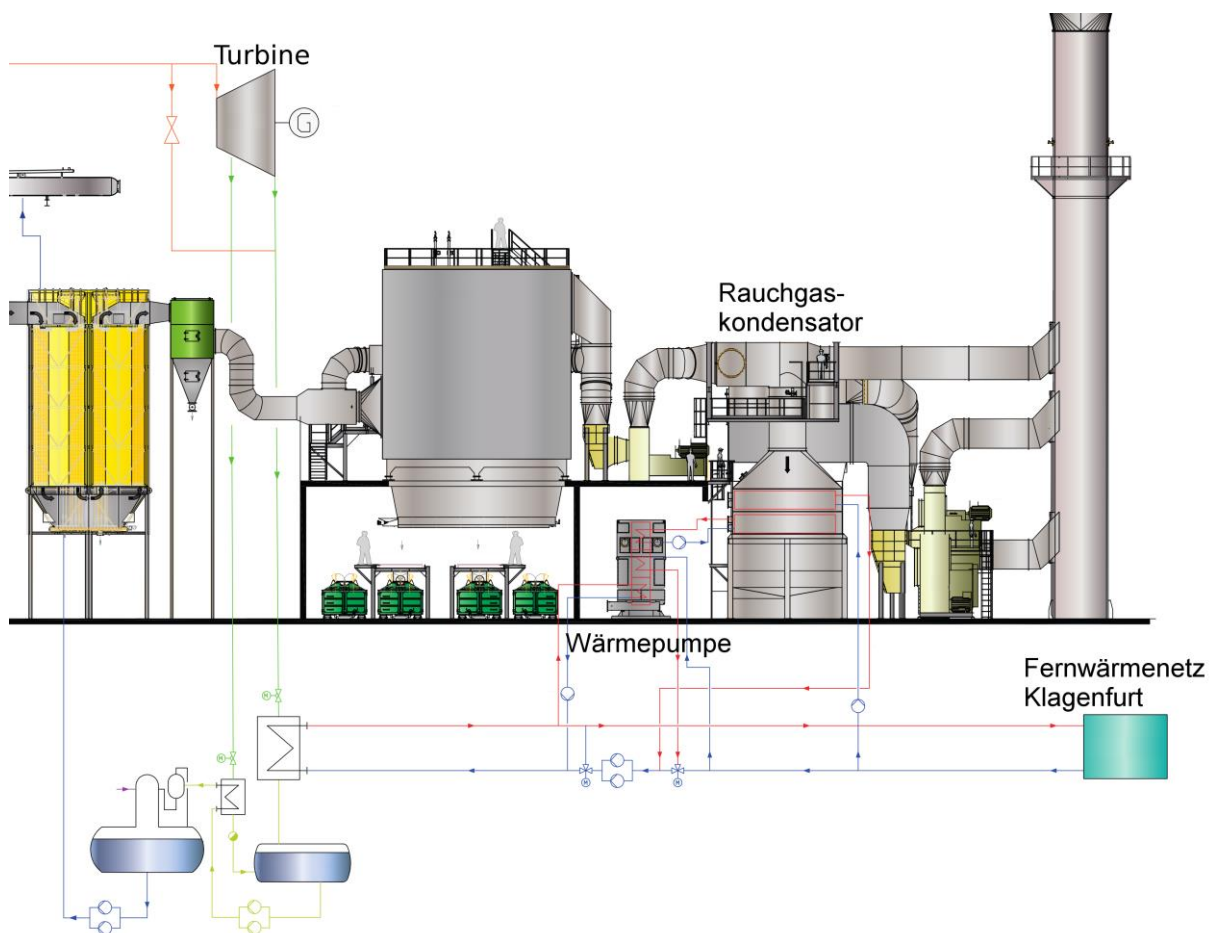


Abbildung 8: Hydraulisches Schema des Biomassekraftwerks Klagenfurt-Ost mit einem Teil des Dampfkreislaufs und dem Anschluss an das Fernwärmenetz [13]

Die Wärmetauscher des Biomasseheizkraftwerks Klagenfurt-Ost sind in der folgenden Reihenfolge mit das Fernwärmenetz verbunden (vgl. Abbildung 8): Aus dem Rücklauf des Fernwärmenetzes wird ein Volumenstrom von ca. $60-100\text{ m}^3/h$ bei einer Temperatur von ca. $60^\circ C$ durch eine zusätzliche Pumpe gefördert und durch direkte Rauchgaskondensation auf eine Temperatur von ca. $65^\circ C$ erwärmt (ca. 2,5-3 MW). Darüber hinaus wird ein variabler

Volumenstrom, der über ein Dreiwegeventil eingestellt werden kann, durch den Absorber und Kondensator der Absorptionswärmepumpe mit einer Heizleistung bis zu 20 MW erwärmt. Dieser Volumenstrom wird in der Regel so hoch wie möglich eingestellt, um die beste Effizienz der Absorptionswärmepumpe zu erreichen. Die maximal mögliche Wärmenutzungstemperatur der Absorptionswärmepumpe beträgt 77°C.

Nach der parallelen Erwärmung des Rücklaufs durch den Wärmetauscher zur direkten Rauchgaskondensation und durch den Absorber und Kondensator der Wärmepumpe wird der Rücklauf durch den Kondensator des Dampfkreislaufs weiter erwärmt, um die gewünschte Vorlauftemperatur des Fernwärmenetzes zu erreichen.

Die optimale Antriebstemperatur für die Absorptionswärmepumpe beträgt am Eintritt in den Generator ca. 130°C und die minimal mögliche Antriebstemperatur der Absorptionswärmepumpe ca. 110°C. Der Volumenstrom des Antriebskreises wird so eingestellt, dass eine Temperaturdifferenz am Generator von ca. 10 K erreicht wird. Mit dem Vorlaufwasser des Fernwärmenetzes als Antriebsquelle und der minimal möglichen Antriebstemperatur ist ein Betrieb der Absorptionswärmepumpe nur möglich, wenn die Vorlauftemperatur des Fernwärmenetzes höher oder gleich 110°C ist. Dies ist in den Wintermonaten und in den Übergangszeiten der Fall.

Die Integration einer Absorptionswärmepumpe in ein Biomasse-Heizkraftwerk erhöht den Wirkungsgrad der gesamten Anlage und damit den Brennstoffnutzungsgrad. Zusätzlich wird durch die Installation der Absorptionswärmepumpe der erforderliche Aufwand zur Entschwadung des Rauchgases, die an diesem Standort gesetzlich vorgeschrieben ist, reduziert. Nach den ersten Monaten zeigte sich ein zuverlässiger Betrieb des Systems und die erreichte Effizienz lag über den Erwartungen. Kleine Änderungen wie eine Anpassung der Füllmenge (H₂O/LiBr) und eine thermische Isolierung der Absorptionswärmepumpe verbessern die Effizienz. Eine Herausforderung ist die schnelle Leistungsanpassung zur Abdeckung der Spitzenlast am Morgen und am Abend aufgrund der Systemträgheit (Biomasseheizkraftwerk und Absorptionswärmepumpe). So erhöht sich beispielsweise der Wärmebedarf am Morgen innerhalb einer halben Stunde von 15 MW_{th} auf 54 MW_{th}.

2.2.3 Lebensmittelverarbeitung und Prozesswärmebereitstellung

Krainer ist ein renommierter steirischer fleisch- und wurstverarbeitender Betrieb in Wagna, der seit 2018 über eine CO₂-Wärmepumpe verfügt, die von AMT Kältetechnik GmbH errichtet wurde. Die Wärmepumpe weist eine Kälteleistung von ca. 600 kW und eine Heizleistung von 800 kW auf. Damit wird Warmwasser mit 60°C bereitgestellt, das zur Reinigung der Anlagen verwendet wird. Außerdem wird Sole mit bis zu -6°C zur Kühlung der Rohstoffe und Produkte erzeugt.

Es handelt sich um einen einstufigen transkritischen Kältekreis mit CO₂ als Kältemittel. Das Kältemittel wird im Verdampfer bei niedrigen Temperaturen und Drücken verdampft und im Verdichter auf Hochdruck verdichtet. Als Verdichter werden BOCK Hubkolbenverdichtern eingesetzt. Die sechs Verdichter sind parallel geschaltet, zusätzlich zur stufigen Leistungsregelung durch An- und Abschalten einzelner Verdichter ist einer der Verdichter mit einem Frequenzumformer geregelt. Am Verdichteraustritt liegt überkritisches Kältemittel vor, das dadurch gekennzeichnet ist, dass Dampf- und Flüssigphase nicht mehr unterschieden werden können. In den Gaskühlern wird dem Kältemittel bei gleitender Temperatur Wärme

entzogen, der Druck bleibt nahezu konstant. Die Wärmeauskopplung erfolgt in zwei wasserseitig parallel geschalteten Gaskühlern, die als Plattenwärmetauscher ausgeführt sind. Ein Gaskühler liefert Warmwasser mit 60°C, der zweite Gaskühler wird als Rückkühler eingesetzt. Das Kältemittel wird im Expansionsventil entspannt und gelangt zweiphasig wieder in den Verdampfer. Der Verdampfer ist als Rohrbündelwärmetauscher ausgeführt.

Durch die gleichzeitige Nutzung von Wärme und Kälte kann diese Wärmepumpe besonders effizient betrieben werden, diese Anwendung ist typisch für lebensmittelverarbeitende Betriebe.

3 Potentiale

Ausgehend von der Nutzenergieanalyse der Statistik Austria [14] kann man Aussagen über das Wärmepumpenpotential für industrielle Anwendungen treffen. Die österreichische Industrie verbrauchte 385 PJ Endenergie im Jahr 2016. Rund 25% davon wurden mit Erdgas gedeckt und für industrielle, für Wärmepumpen relevante Anwendungen wie Raumwärme und Klimatisierung, Dampferzeugung und Industrieöfen eingesetzt (111 PJ, vgl. Abbildung 9). Raumwärme und Klimatisierung sind typische Anwendungsgebiete für Wärmepumpen. Industrieöfen umfassen alle Arten von Öfen, die von Niedertemperaturanwendungen wie Trocknung bis hin zu Hochtemperaturprozessen wie Sintern reichen. Die Dampferzeugung deckt auch einen breiten Temperaturbereich ab. Daher sind beide Anwendungen für Wärmepumpen zumindest teilweise relevant.

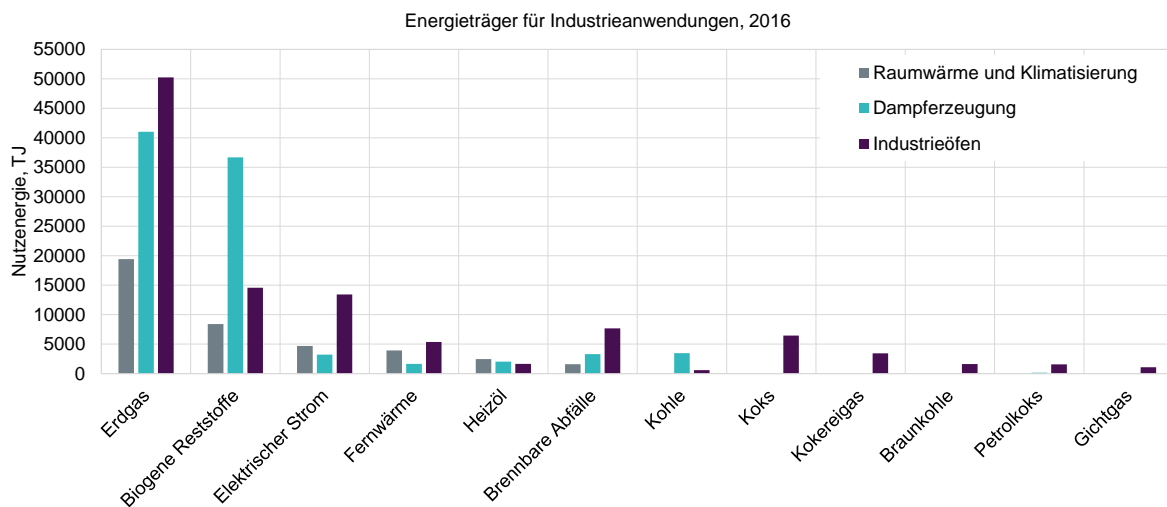


Abbildung 9: Energieträger für Industrieanwendungen in Österreich [14]

Zur Bereitstellung der zuvor beschriebenen Prozesswärme mit Wärmepumpen wird Abwärme benötigt. Panayiotou et al. [15] haben das Abwärmepotential bedeutender europäischer Industrien genauer untersucht und für Österreich 16,6 PJ Abwärme in der Eisen- und Stahlindustrie, 16,6 PJ bei der Verarbeitung von nichtmetallischen Erzen, 16,2 PJ in der chemischen und petrochemischen Industrie, 16,2 PJ in der Textil- und Lederindustrie, 15,5 PJ in der Papier- und Zellstoffindustrie und 12,6 PJ in der Lebensmittelindustrie errechnet. Eine weitere Unterteilung des Abwärmepotentials an Hand des Temperaturniveaus wurde allerdings nicht veröffentlicht.

Für die Nutzung durch Wärmepumpen sind insbesondere Niedertemperaturströme relevant, die nicht mehr direkt in Wärmetauschern genutzt werden können. Von den genannten Branchen gibt es vor allem in der Lebensmittelindustrie, der chemischen und petrochemischen Industrie und der Papier- und Zellstoffindustrie großes Potential für die Integration von Wärmepumpen [9], [16].

Die Treiber und Barrieren zur Erschließung dieser Potentiale wurden in der Österreichischen Technologieroadmap für Wärmepumpen [3] erarbeitet, die das Ergebnis eines partizipativen Stakeholder-Prozesses war. Der Fokus der Roadmap liegt dabei auf den Stärken der nationalen Wärmepumpenbranche und den Anforderungen der NutzerInnen. Für Industriewärmepumpen zählt der geringe Bekanntheitsgrad der Technologie zu den größten Barrieren. Dabei geht es vor allem um technische Möglichkeiten, die in den letzten Jahren durch Weiterentwicklungen wie neue Kältemittel und Hochtemperaturanwendungen deutlich zugenommen haben. Weitere hemmende Faktoren sind die noch geringe Vernetzung zwischen Wärmepumpenherstellern, Anlagenbauern und Anwendern, sowie die anhaltend niedrigen Öl- und Gaspreise seit 2014, die Investitionen in Energieeffizienzmaßnahmen hemmen. Zu den fördernden Faktoren zählt neben Investitionsförderungen für gewerbliche und industrielle Anlagen der Kommunalkredit Public Consulting (KPC), die hohe Effizienz der Anlagen durch die Nutzung von Abwärme. Pilot- und Demonstrationsanlagen für innovative Konzepte tragen dazu bei, die Informationsdefizite abzubauen und für eine weitere Verbreitung zu sorgen. Niedrige Strompreise, sowie das aktuell niedrige Zinsniveau wirken sich ebenfalls positiv aus.

4 Schlussfolgerungen

Es wurden rund 70 Wärmepumpeninstallationen in österreichischen Industriebetrieben erhoben und analysiert. Am häufigsten werden Wärmepumpen derzeit in der Lebensmittelindustrie eingesetzt. Üblicherweise werden diese Wärmepumpen zum gleichzeitigen Heizen und Kühlen verwendet, wie zum Beispiel Kältemaschinen mit Abwärmenutzung. Die Heizleistungen der erhobenen Beispiele liegen im Bereich von einigen 10-100 kW, die Wärme wird zumeist im Betrieb selbst genutzt (Gebäude- und Hallenheizung, sowie Prozesswärme). Wärmepumpen, die die für diese Anwendungen benötigte Vorlauftemperatur von ca. 80°C liefern, sind bereits seit vielen Jahren marktverfügbar. Die zweite große Gruppe der Anwendungen sind Kraftwerke, die Fernwärme bereitstellen. Dabei werden Wärmepumpen überwiegend zur Rauchgaskondensation eingesetzt, um so den Brennstoffnutzungsgrad weiter zu erhöhen. Hier kommen sowohl Kompressions- als auch Absorptionswärmepumpen zur Anwendung. Wärmepumpen, die industrielle Abwärme nutzen und Heizleistungen im MW-Bereich liefern, speisen in der Regel in Fernwärmenetze ein. Durch die Weiterentwicklung der Wärmepumpen zu höheren Wärmenutzungstemperaturen durch neue Kältemittel steigt die Zahl der Wärmepumpen in Fernwärmenetzen. In den erhobenen Beispielen liegt die Vorlauftemperatur zwischen 60 und 95°C. Fernwärmebereitstellung durch Industriebetriebe erfordert die Kooperation von mehreren Akteuren, wie es auch am Beispiel der Wärmepumpen der Marienhütte beschrieben wurde.

Die veröffentlichten COPs der Kompressionswärmepumpen liegen im Bereich von 3,5-5,5. Eine Abschätzung der möglichen CO₂- und Kosteneinsparungen im Vergleich zur Wärmebereitstellung mit einem Gaskessel zeigt, dass diese Wärmepumpen CO₂-Emissionen

um 70-81% und die laufenden Energiekosten um 33-74% reduzieren können. Effizienzsteigerung der Prozesse und die Vermeidung von CO₂-Emissionen sind wichtige Treiber zur weiteren Verbreitung der Wärmepumpen in der Industrie. Ebenso wichtig sind technologische Weiterentwicklungen, wie die Dampferzeugung mit Wärmepumpen. Dampfnetze sind in Industrieanlagen weit verbreitet, daher können Wärmepumpen, die Dampf liefern, besonders einfach in bestehende Anlagen integriert werden. Großes Potential dafür gibt es beispielsweise in der Papierindustrie (Trocknung), in der chemischen Industrie (Eindampfanlagen, Destillation) und in der Lebensmittelindustrie (Pasteurisieren, Sterilisieren).

Danksagung

Dieses Projekt (FFG Nr. 853.035) wird im Rahmen der IEA-Forschungskooperation im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie durchgeführt.

Literatur

- [1] Forman, C., Muritala, I.K., Pardemann, R., Meyer, B., Estimating the global waste heat potential, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57 (2016) 1568-1579.
- [2] Communication from the EU Commission, Towards an Integrated Strategic Energy Technology (SET) Plan: Accelerating the European Energy System Transformation, 2015.
- [3] Hartl, M., Biermayr, P., Schneeberger, A., Schöfmann, P., Österreichische Technologie-Roadmap für Wärmepumpen, *Berichte aus Energie- und Umweltforschung*, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 8/2016.
- [4] Biermayr, P., Dißbauer, C., Eberl, M., Enigl, M., Fechner, H., Fischer, L., Leonhartsberger, K., Maringer, F., Moidl, S., Schmidl, C., Strasser, C., Weiss, W., Wonisch, P., Wopienka E., *Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2017*, *Berichte aus Energie- und Umweltforschung*, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 4/2018.
- [5] Wilk, V., Hartl, M., Arnitz, A., Rieberer, R., *Industrial Heat Pumps in Austria Applications and Research*, European Heat Pump Summit, Nürnberg, 2017.
- [6] OIB, 2015. Österreichisches Institut für Bautechnik, Richtlinie 6, Version März 2015.
- [7] Energie-Control Austria: Elektrizität Preisentwicklung Nicht-Haushalte - halbjährliche Aktualisierung, 2017. https://www.e-control.at/documents/20903/26809/MStOeN-2017_PreiseNHH.xlsx/4afbef9d-c9ee-27cf-b30c-9dcfbf75058b, 26.10.2018.
- [8] Energie-Control Austria: Erdgas Preisentwicklung Nicht-Haushalte – halbjährliche Aktualisierung, 2017. https://www.e-control.at/documents/20903/448573/MStErdGas-2017_PreiseNHH.xlsx/b4c20969-284b-35eb-6a1a-d9222564af85, 26.10.2018.
- [9] Wolf, S., Fahl, U., Blesl, M., Voß, A., Jakobs, R., *Analyse des Potentials von Industriewärmepumpen in Deutschland*, Forschungsbericht, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart, 2014.
- [10] <https://www.klimaaktiv.at/>, 18.06.2018.

- [11] Unger, H., Energiemodell Reininghaus – Abwärmeauskopplung Marienhütte durch Energie Graz, Technischer Kurzbericht, 2018.
- [12] Bitzer, Kältemittel-Report 20, 2018 https://www.bitzer.de/shared_media/documentation/a-500-20.pdf, 15.11.2018.
- [13] www.bioenergie-kaernten.at, 12.01.2018.
- [14] Statistics Austria, STATcube – Statistische Datenbank von STATISTIK AUSTRIA, Nutzenergieanalyse 2016, 23.03.2018.
- [15] Panayiotou, G.P., Bianchi, G., Georgiou, G., Aresti, L., Argyrou, M., Agathokleous, R., Tsamos, K. M., Tassou, S.A., Florides, G., Kalogirou, S., Christodoulides, P., Preliminary assessment of waste heat potential in major European industries, Energy Procedia 123 (2017) 335-345.
- [16] Arpagaus, C., Bless, F., Uhlmann, M., Schiffmann, J., Bertsch, S., High temperature heat pumps: Market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials, Energy 152 (2018) 985-1010.