

ETHP

Ejektortechnologien für Wärmepumpen

Programm / Ausschreibung	Energieforschung (e!MISSION), Energieforschung, Energieforschung 7. Ausschreibung	Status	abgeschlossen
Projektstart	01.01.2022	Projektende	31.12.2024
Zeitraum	2022 - 2024	Projektlaufzeit	36 Monate
Keywords	Wärmepumpen; Ejektor; Erhöhung des Temperaturhubs; Strömungssimulation;		

Projektbeschreibung

Wärmepumpenanlagen sind aus mehreren Gründen für die Zukunft des Produktionsstandortes Österreich von zentraler Bedeutung. Sie sind nicht nur Exportprodukt (bereits heute sind mehr als 30% der Anlagen für den Export bestimmt), sie leisten auch einen wesentlichen Beitrag zur Dekarbonisierung der Industrie. Sie ermöglichen die Nutzung von Abwärmern durch Einsatz von geringen Mengen an Strom und substituieren so auf effiziente Weise den Einsatz von Primärenergie wie Kohle und Gas. Für die produzierende Industrie sind insbesondere Industrierärmepumpen relevant. Ejektoren, eine innovative Komponente einer Wärmepumpe, erlauben eine Wirkungsgradsteigerung von bis zu 27% gegenüber konventionellen Anlagen.

Bei einer herkömmlichen Wärmepumpe wird durch ein Expansionsventil gesättigter Dampf oder unterkühlte Flüssigkeit bei hohem Druck auf Nassdampf bei niedrigem Druck entspannt. Dieser irreversible Prozess reduziert die Effizienz von Wärmepumpen maßgeblich, da die im Verdichter zugeführte Kompressionsarbeit verloren ist. Mit einem Ejektor kann ein Teil der Kompressionsarbeit zurückgewonnen, die benötigte Kompressorleistung signifikant reduziert und bei mehrstufigen Kompressoren gegebenenfalls sogar eine Kompressorstufe komplett ersetzt werden.

ETHP strebt die Entwicklung einer effizienten Industrierärmepumpe nach den Bedürfnissen des Marktes an. Dazu werden im Anschluß an Experteninterviews, Machbarkeitsstudien und Wirtschaftlichkeitsrechnungen mittels fortschrittlicher Simulationsmethoden der Kältekreis sowie verschiedene Ejektorgeometrien ausgelegt, optimiert und in einem im Rahmen des Projektes ausgelegten und gefertigtem Labormuster mit umfangreicher Instrumentierung erprobt. Der Kältekreis wird dabei auf den Ejektor genau abgestimmt. Ein intelligentes Regelkonzept des Kältekreises inklusive Ejektor, das ein perfektes Zusammenspiel von Ejektor und Kompressor über einen weiten Betriebsbereich garantiert, ermöglicht die Erreichung eines maximalen CoP. Zwei Meßkampagnen mit unterschiedlichen numerisch optimierten Ejektoren bieten die Datenbasis für den Ausbau des AIT Auslegungstools für Ejektoren auf der Basis von validierten 1D und hoch aufgelösten 2D/3D CFD Simulationen. ETHP realisiert somit eine Wärmepumpe für die industrielle Nutzung auf Basis eines Kältekreises mit 2 Phasen-Ejektoren.

Der Wissenszuwachs im Projekt umfasst insbesondere das abgestimmte und validierte Design der ETHP Wärmepumpe, die optimierten und im Labormuster erprobten Ejektorgeometrien sowie die validierten ein- und mehrdimensionalen Simulationsmodelle.

Im Projekt ETHP soll die Ejektor-Technologie für Hoch- und Höchsttemperaturwärmepumpen etabliert werden. ETHP legt damit den Grundstein für die nächste Evolutionsstufe hocheffizienter Industriewärmepumpen und ebnet den Weg hin zu einer dekarbonisierten Welt.

Abstract

Heat pump systems are of central importance for the future of Austria as a production location for several reasons. Not only are they an export product (already today more than 30% of the systems are produced for export), they also make a significant contribution to the decarbonization of industry. They enable the use of waste heat by using small amounts of electricity, thus efficiently substituting the use of primary energy such as coal and gas. Industrial heat pumps are particularly relevant for the manufacturing industry. Ejectors, an innovative component of a heat pump, allow an efficiency increase of up to 27% compared to conventional systems.

In a conventional heat pump, an expansion valve expands saturated steam or subcooled liquid at high pressure to wet steam at low pressure. This irreversible process significantly reduces heat pump efficiency because the compression work supplied in the compressor is lost. With an ejector, part of the compression work can be recovered, the required compressor power can be significantly reduced and, in the case of multi-stage compressors, even one compressor stage can be completely replaced, if necessary.

ETHP aims to develop an efficient industrial heat pump according to the needs of the market. For this purpose, following expert interviews, feasibility studies and profitability calculations, the refrigeration circuit and various ejector geometries are designed, optimized and tested in a laboratory prototype designed and manufactured as part of the project with extensive instrumentation using advanced simulation methods. The refrigeration circuit is precisely matched to the ejector. An intelligent control concept of the refrigeration circuit including the ejector, which guarantees a perfect interaction of ejector and compressor over a wide operating range, enables the achievement of a maximum CoP. Two measurement campaigns with different numerically optimized ejectors provide the data for the extension of the AIT design tool for ejectors based on validated 1D and high resolution 2D/3D CFD simulations. ETHP thus realizes a heat pump for industrial use based on a refrigeration circuit with 2-phase ejectors.

The knowledge gained in the project includes in particular the tuned and validated design of the ETHP heat pump, the optimized ejector geometries tested in the laboratory prototype, and the validated one-dimensional and multi-dimensional simulation models.

The ETHP project aims to establish ejector technology for high and ultra-high temperature heat pumps. ETHP thus lays the foundation for the next evolutionary stage of highly efficient industrial heat pumps and paves the way towards a decarbonized world.

Endberichtkurzfassung

Kurzzusammenfassung

Im Zuge der industriellen Energiewende rückt die Dekarbonisierung von Prozesswärme zunehmend in den Fokus. Hochtemperatur-Wärmepumpen (HT-WP) gelten dabei als vielversprechende Technologie, insbesondere wenn sie mit innovativen Komponenten wie Ejektoren kombiniert werden. Das Forschungsprojekt ETHP widmete sich der Entwicklung, Erprobung und Marktbewertung eines solchen Systems auf Basis des Kältemittels R1233zd(E). Im Mittelpunkt standen neben der technischen Auslegung und Simulation auch der Bau eines Labormusters, dessen messtechnische Validierung sowie die Bewertung ökonomischer und ökologischer Einsatzpotenziale in realen Industrieprozessen. Der vorliegende Bericht fasst die

wesentlichen Erkenntnisse aus Marktanalysen, Systemdesign, Simulation, Regelung, Fertigung und Erprobung zusammen und liefert damit eine ganzheitliche Bewertung der industriellen Einsatzmöglichkeiten von HT-Wärmepumpen mit Ejektortechnologie.

Marktaufbereitung

Der im Rahmen des Projektes erstellte Marktbericht befasst sich mit dem Einsatzpotenzial von Hochtemperatur-Wärmepumpen (HT-WP) mit Ejektortechnologie in industriellen Prozessen. Ziel der Analyse ist es, die wichtigsten industriellen Anwendungen zu identifizieren, bei denen diese Technologie technisch, wirtschaftlich und praktisch realisierbar ist. Dabei werden nicht nur das theoretische Potenzial, sondern auch mögliche Marktbarrieren berücksichtigt.

HT-Wärmepumpen ermöglichen die Nutzung von Abwärme zur Erzeugung von Prozesswärme auf hohem Temperaturniveau und gelten damit als Schlüsseltechnologie zur Dekarbonisierung industrieller Wärmeprozesse. Je nach technischer Entwicklung sind zukünftig auch Temperaturen bis zu 280°C oder sogar 500°C denkbar. Ihr wirtschaftlicher Einsatz hängt jedoch, auch in niedrigeren Temperaturbereichen bis zu 200°C, stark von Faktoren wie Energiepreisen, staatlicher Förderung und den Investitionskosten ab.

Besonders hohe Potenziale zeigen sich in Branchen mit konstantem Wärmebedarf und bereits vorhandenen Abwärmequellen. Dazu zählen vor allem die Papier- und Druckindustrie, die Lebensmittelverarbeitung, die chemische Industrie sowie Trocknungsprozesse bei der Herstellung nichtmetallischer mineralischer Erzeugnisse, insbesondere Keramik. In diesen Sektoren bestehen zahlreiche Prozesse, bei denen Wärme im Bereich von 100 bis 200°C benötigt wird – ein Bereich, den HT-Wärmepumpen gut abdecken können.

Für die Europäische Union ergibt sich daraus aus unterschiedlichen Studien ein technisches Potenzial von 28 bis 237 Terawattstunden pro Jahr. In Österreich zeigt sich ein besonders hohes Potenzial in den Sektoren Papier, Chemie und Lebensmittel. Allerdings wird das realisierbare Potenzial derzeit durch verschiedene Markthemmnisse eingeschränkt. Dazu gehören eine geringe Bekanntheit der Technologie, Unsicherheiten hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Produktionsprozesse, hohe Investitionskosten, mitunter auch zu hohe Betriebskosten sowie ein Mangel an Fachkräften und Planungsunterstützung.

Im Rahmen des Projektes wurden auch Expertengespräche mit potenziellen industriellen Anwendern geführt. Diese bestätigten das hohe Interesse an HT-Wärmepumpen, insbesondere in Szenarien mit gleichzeitigem Wärme- und Kältebedarf. Investitionsentscheidungen hängen dabei maßgeblich von Energiekosten, CO₂-Einsparpotenzialen und der Betriebssicherheit ab.

Die Ejektortechnologie selbst bietet Vorteile in Anwendungen mit großen Temperaturhüben und niedrigen Druckniveaus. Sie kann die Effizienz der Wärmepumpe steigern und eine breitere Nutzung industrieller Abwärme ermöglichen. Zahlreiche Best-Practice-Beispiele aus österreichischen Unternehmen belegen die Machbarkeit und den Nutzen solcher Systeme, insbesondere in Kombination mit Fernwärmenetzen.

HT-Wärmepumpen mit Ejektoren besitzen ein großes Potenzial für die industrielle Wärmewende, dessen Ausschöpfung

erfordert jedoch gezielte Fördermaßnahmen, Bewusstseinsbildung und technische Weiterentwicklung und Unterstützung.

Weiters wurden Machbarkeitsstudien durchgeführt, um das Einsatzpotenzial von Hochtemperatur-Wärmepumpen mit Ejektortechnologie in der Industrie zu evaluieren. Ziel war es, anhand von zwei realen industriellen Anwendungen zu untersuchen, unter welchen technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Bedingungen die Technologie sinnvoll einsetzbar ist. Grundlage der Studien waren Experteninterviews mit Unternehmen aus den Sektoren Nahrungsmittelproduktion und Chemie, aus denen zwei konkrete Use Cases für detaillierte Analysen ausgewählt wurden.

Im ersten Use Case wurde ein Produktionsprozess analysiert, der einen hohen Bedarf an Dampf mit unterschiedlichen Druckniveaus aufweist. Dabei wurden verschiedene Abwärmequellen wie Verwurfskondensat und Kühlwasser als potenzielle Energiequellen identifiziert. Zur Dampfbereitstellung wurde ein System aus einer geschlossenen Wärmepumpe und Dampfkompressoren simuliert. Die Ergebnisse zeigen, dass durch den Einsatz eines Ejektors die Jahresarbeitszahlen (COP) leicht verbessert und dadurch die Betriebskosten signifikant reduziert werden können. Zwar werden die Investitionskosten für das System mit Ejektor höher bewertet, dennoch resultiert ein höherer Kapitalwert nach 20 Jahren (21% höher für das System mit Ejektor vs. ohne Ejektor). Zudem führt der Einsatz der Wärmepumpe mit Ejektor zu einer Reduktion der CO₂-Emissionen um 43% gegenüber einer elektrischen Referenztechnologie, wobei angenommen wurde, dass ein konventioneller Strommix bezogen wird mit Scope 2 Emissionen >0 g/kWh, und zu einer Primärenergieeinsparung von bis zu 26%.

Der zweite Use Case behandelt einen Prozess, bei dem Dampf zur Beheizung genutzt wird. Hier wurde über die Ejektorintegration hinaus zusätzlich analysiert, welchen Effekt eine Substitution des Dampfeinsatzes durch Heißwasserbereitstellung auf Basis von Wärmepumpen mit Ejektoren hat. Das System, welches in der Rechnung nur Heißwasser bereitstellt und keinen Dampf, nutzt zwei unterschiedliche Abwärmequellen und liefert kontinuierlich Wärme. Da der Wärmebedarf zeitlich schwankt wurde ein thermischer Speicher als ausgleichendes Element angenommen. Auch hier zeigt sich ein Vorteil für die Ejektortechnologie hinsichtlich des COP des Gesamtsystems (2,91 mit Ejektor gegenüber 2,43 ohne). Die Investitionskosten liegen jedoch nur leicht höher als ohne Ejektor. Da dieser Prozess im Vergleich mit Use Case 1 mit geringeren Temperaturen auskommt und somit der COP höher ist, sind die Amortisationszeiten deutlich kürzer (ca. 2-3 Jahre). Allerdings ist für diesen Use Case der Kapitalwert mit Ejektor nach zwanzig Jahren nicht höher als jener für die Wärmepumpe ohne Ejektor. Die CO₂-Einsparungen liegen bei 66% mit Ejektor (vs. Referenz-Elektrokessel), die Primärenergieeinsparung bei bis zu 59%.

Zusammenfassend zeigen die beiden Use Cases, dass der Einsatz von Ejektortechnologie ökologische Vorteile gegenüber Wärmepumpen ohne Ejektor bietet. Wirtschaftlich rentabel ist der Einsatz jedoch nur dann, wenn ausreichend Abwärme zur Verfügung steht – wie im Fall von Use Case 1. Generell verbessert sich die Wirtschaftlichkeit von Wärmepumpenanwendungen deutlich, wenn der Temperaturhub zwischen Quelle und Senke gering ist. Eine Deckung industrieller Wärmebedarfe über Wärmepumpensysteme – insbesondere mit Ejektor – kann somit in Zukunft eine zentrale Rolle bei der Dekarbonisierung industrieller Prozesse spielen. Ohne Fördermaßnahmen sind sie allerdings aktuell noch nicht wettbewerbsfähig gegenüber konventionellen Gaskesseln.

Basierend auf den Analysen für die beiden beschriebenen Use Cases wurden auch allgemeine Erkenntnisse zur Integration von Wärmepumpen mit und ohne Ejektoren für den publizierbaren Endbericht aufbereitet.

Ziel des Projekts EHP ist die Entwicklung einer Hochtemperatur-Wärmepumpe mit dem Kältemittel R1233zd(E), bei der ein Ejektor anstelle eines herkömmlichen Expansionsventils verwendet wird. Der gewählte Ejektor-Kältekreis folgt dem sogenannten Standardaufbau mit einem Separator, wobei der Ejektor den Kältemittelfluss auf der Verdampferseite bestimmt. Die Systemauslegung erfolgte modellbasiert mit der Software Dymola und der TIL-Bibliothek. Die Simulationen zeigen, dass durch den Einsatz eines Ejektors eine Effizienzsteigerung von ca. 15% gegenüber einem konventionellen System möglich ist – bei einer angenommenen Ejektoreffizienz von 27% (COP-Steigerung von 1,8 auf 2,0). Das Mitreißverhältnis liegt bei ca. 0,5, die Druckrückgewinnung bei 1,2. Der Verdichter ist ein halbhermetischer Schraubenverdichter mit 118 m³/h Hubvolumen und wurde für einen Auslegungspunkt von 48°C Verdampfung und 133°C Kondensation dimensioniert. Ein zentraler Bestandteil des Designs ist der Sauggaswärmeübertrager, der für das gewählte HFO-Kältemittel R1233zd(E) notwendig ist, um Schäden durch Nassdampf zu vermeiden. Die Wärmetauscherkonfiguration (Rohrbündel und Plattenwärmeübertrager) wurde so gewählt, dass Druckverluste minimiert und eine stabile Überhitzung gewährleistet sind. Die resultierende Systemarchitektur wurde auf Basis realer Komponenten und Prüfstandsinfrastruktur modelliert und abgestimmt.

Der Designprozess des Ejektors erfolgte in zwei Phasen: Zunächst wurden über 300 Ejektorgeometrien mithilfe des Homogeneous Equilibrium Models (HEM) simuliert und auf ihre Effizienz untersucht. Dabei zeigte sich, dass jede Geometrie nur bei spezifischen Betriebsbedingungen optimal arbeitet. Mit Einführung eines realistischeren Kompressormodells musste das Ejektordesign überarbeitet werden, da nun deutlich stärkere Unterkühlung im Primärstrom zu berücksichtigen war. Das HEM-Modell versagte unter diesen Bedingungen, weshalb das aufwendigere Homogeneous Relaxation Model (HRM) eingesetzt wurde. Dieses erlaubt durch eine Relaxationszeit die verzögerte Verdampfung und stabilere Simulationsergebnisse. In einem iterativen, simulationsbasierten Designprozess wurde die finale Geometrie des Ejektors entwickelt. Anpassungen an der Primärdüse waren entscheidend, um bei hoher Unterkühlung eine stabile Verdampfung und Strömung zu gewährleisten. Insgesamt wurden über 100 aufwendige HRM-Simulationen durchgeführt. Das Ergebnis ist eine Ejektorgeometrie, die bei einem Saugdruckverhältnis von 1.38 ein Mitreißverhältnis von 0.45 und eine Ejektoreffizienz von 0.45 erreicht. Diese Werte zeigen, dass das Ejektordesign unter realitätsnahen Bedingungen gut funktioniert, wenngleich die Ejektoreffizienz nicht direkt mit dem COP korreliert.

Zentral für die Regelungsstrategie ist die Koordination von Verdichter, Ejektor und Separator zur Steuerung von Heizleistung, Überhitzung und Füllstand. Die Ejektorcharakteristik bestimmt dabei maßgeblich die Betriebsdynamik, da kein klassisches Expansionsventil zur Druckregelung vorhanden ist. Fünf Regelkreise wurden definiert, darunter Drehzahlregelung des Verdichters zur Einhaltung der Vorlauftemperatur (130°C) und Überhitzungsregelung mittels Ventile. Die verwendeten Sollwerte sind derzeit als Defaultwerte ausgelegt und wurden im Labor weiter optimiert. Zur weiteren Effizienzsteigerung – insbesondere unter Teillastbedingungen sind robuste, modellbasierter Regelungsstrategien notwendig.

Eine vollständige technische Grundlage für die Fertigung des EHP-Wärmepumpen-Labormusters wurde erarbeitet. Es enthält das Maßblatt, umfassende Produktionsdokumentation sowie eine vollständige Teileliste. Dargestellt und dokumentiert werden sämtliche Baugruppen: Hauptkomponenten, Halterungen, Bohrungen, sowie detaillierte Rohrleitungssysteme für Saug-, Druck-, Flüssigkeits-, Ejektor-, Öl-, Wasser- und Pressostatleitungen. Ebenso enthalten sind Zeichnungen für alle Sensoreinheiten und Komponenten. Die technischen Zeichnungen sind direkt für die Fertigung

verwendbar und ermöglichen die präzise Montage des Labormusters. Die finale Teileliste umfasst 160 Positionen und reicht von Kältemittelventilen über Sensorik bis hin zu Isoliermaterialien.

Zur Überwachung und Validierung der ETHP-Wärmepumpe wird ein zweigeteiltes Messsystem eingesetzt: Das Steuerungssystem von OCHSNER sowie ein unabhängiges, hochauflösendes Messsystem von AIT. Dieses AIT-System erfasst die zentralen Kenngrößen des Kältekreises (Temperatur, Druck, Massenstrom) und dient der Validierung der Simulation sowie der Optimierung der Regelung. Insgesamt kommen zwölf PT1000-Temperatursensoren, fünfzehn Drucksensoren (Cerabar und Deltabar) sowie zwei Coriolis-Massenstromsensoren zum Einsatz. Die Messdaten werden über ein ICP-DAS-Bussystem in einem Schaltschrank verarbeitet und mittels LabView erfasst, visualisiert und ausgewertet. Die LabView-Oberfläche zeigt u.a. Echtzeitdaten, $\log(p)$ -h-Diagramme und Ejektor-Effizienz.

Zur Erweiterung des Einsatzbereichs und zur Kompensation von Unsicherheiten bei der CFD-Auslegung wurde ein adaptierter Ejektor mit schaltbarem Bypass entwickelt. Der Bypass führt einen Teilstrom vom Sekundärstrom ab und rückführt ihn am Ende der Mischzone. Dadurch kann der Ejektor auch bei Betriebsabweichungen effizienter betrieben werden. Simulationen zeigen eine Effizienzsteigerung im Off-Design-Betrieb (z.B. von 0.37 auf 0.43) bei gleichzeitiger Stabilität im Designpunkt. Das CAD-Design wurde in Zusammenarbeit mit TB Technology erstellt. Der Bypass ist manuell über Schrauben schaltbar. Zusätzlich sind fünf Bohrungen zur Druckmessung im Betrieb vorgesehen. Die Konstruktionspläne inklusive 3D-Modell und detaillierter technischer Zeichnungen wurden erstellt.

Im ETHP-Projekt wurde das 1D-Simulationswerkzeug `simpy_ejector` weiterentwickelt und öffentlich zugänglich gemacht (GitHub + Python-Paket unter `simpy_ejector`). Die zentrale Neuerung betrifft die realitätsnahe Berechnung des Sekundärmassestroms auch im subkritischen Betrieb – ein wichtiger Schritt zur flexiblen Ejektorauslegung. Die Validierung erfolgte über drei Wege: (1) ein Vergleich mit Literaturdaten (Butan-Ejektor) zeigte gute Übereinstimmung der Druckverläufe und Massenströme. (2) Der Vergleich mit CFD-Simulationen (R1233zd) ergab einen sehr exakten Primärmassestrom und einen Sekundärmassestrom mit ca. 20% Abweichung. (3) Der Vergleich mit Experimenten zeigte gut übereinstimmende Druckverläufe; die Massenströme zeigen bei der Treibdüse 30–40% Abweichung, bei der Saugdüse dagegen hohe Übereinstimmung. Das Tool wurde mit verbesserter Materialdatenstruktur (CoolProp-Integration) und neuen Algorithmen versehen und soll der Community als Open-Source-Plattform für weitere Ejektorforschung dienen.

Labormusterbau, Messungen und Analysen

Das Labormuster der Hochtemperatur-Wärmepumpe wurde im Rahmen der beiden Messkampagnen umfassend getestet. Die Messungen erfolgten am Prüfstand bei OCHSNER. Im Fokus standen die Validierung des Ejektorkonzepts, die Charakterisierung von Betriebszuständen sowie die Bewertung der Performance unter realen Bedingungen. (1) Ejektorbetrieb: Der Ejektor war funktionstüchtig, jedoch zeigte sich, dass die Auslegung im realen Betrieb zu Instabilitäten im Sekundärstrom führte, insbesondere bei höheren Wärmesenken-Temperaturen. Die Teillastfähigkeit war eingeschränkt. Ein stabiler Betrieb konnte nur bei spezifischen Randbedingungen gewährleistet werden. (2) Leistungsdaten: Die Wärmepumpe erreichte einen maximalen COP von ca. 2,3 bei Senktemperaturen unterhalb 110°C. Bei höherem Temperaturniveau sank der COP deutlich ab (z.B. $COP < 1,5$ bei $> 125^\circ\text{C}$), vorwiegend wegen hohen Druckverlusten im Ejektor und Leistungsverluste bei der Ölkühlung. (3) Vergleich Simulation vs. Realität: Während die Dymola-Simulationen idealisierte Werte prognostizierten, zeigten die Messungen Abweichungen, insbesondere beim Massenstromverhalten im Ejektor. Die

Abweichungen waren im Bereich von 20-40%, v.a. bei Teillast.

Der Ejektor zeigte im Teillastbereich geringere Effizienz als erwartet. Auch die Messung der Ejektor-Effizienz war durch nicht vollständig etablierte Zweiphasenströmung erschwert. Verbesserungen der Bypass-Geometrie und eine optimierte Regelstrategie werden empfohlen. Die Messkampagnen bestätigen grundsätzlich die Funktionsfähigkeit des Konzepts, offenbaren aber deutliche Optimierungspotenziale in Geometrie, Regelung und thermischer Integration. Das entwickelte System bildet eine solide Basis für nachfolgende Optimierungs- und Skalierungsarbeiten.

Projektkoordinator

- AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Projektpartner

- Ochsner Wärmepumpen GmbH
- Ochsner Energietechnik GmbH