

VLESH

Variable Load Ejector for Steam Heat-pumps

Programm / Ausschreibung	Energieforschung (e!MISSION), Energieforschung, Energieforschungsprogramm 2023	Status	laufend
Projektstart	01.10.2024	Projektende	31.12.2025
Zeitraum	2024 - 2025	Projektlaufzeit	15 Monate
Keywords	Ejektor; Hochtemperatur Wärmepumpe; CO2 Reduktion; Grüner Dampf; Effizienzsteigerung		

Projektbeschreibung

Ähnlich wie auch in der gesamten EU werden in Österreich rund 40 % des gesamten Brennstoffeinsatzes in der Industrie zur Dampferzeugung genutzt. Dieser Dampf dient dann als Wärmeträgermedium welches 500°C viele Vorteile aufweist. Im Rahmen des übergeordneten Ziels den voranschreitenden Klimawandel zu verlangsamen ist eine CO2 Neutralisierung des Dampferzeugungsprozesses entscheidend. Abgesehen von der direkten Nutzung industrielle Abwärme, ist die Anwendung von Hochtemperatur Wärmepumpen die am energetisch sinnvollste. Eines der ersten Umsetzungsprojekte (AHEAD) weltweit ist gerade in Wien bei der Firma Takeda in Planung und unterstreicht Österreichs Vorreiterrolle in diesem Bereich. Doch Wärmepumpen gelten nicht nur als Schlüsseltechnologie für die Dekarbonisierung der heimischen Industrie, sondern entwickeln sich auch zum „Exportschlager“. Um die Dekarbonisierung der Industrie noch weiter zu befeuern ist der Ruf nach Effizienzsteigerung in der Vergangenheit immer größer geworden. Der effizienteste Weg zur Dampferzeugung mittels Wärmepumpe, besteht im Nutzen bestehender Abwärme von ca. $40\text{-}60^{\circ}\text{C}$, welche in einem geschlossenen Wärmepumpenkreislauf auf ca. 120°C angehoben wird und danach durch Mechanical-Vapor-Recompression (MVR) Einheiten auf das entsprechende Druckniveau verdichtet wird. Der Einsatz von MVR bringt bereits einen hohen Wirkungsgrad, allerdings gibt es noch Raum für effizienzsteigernde Maßnahmen, wenn man den Carnot-Kreislauf der unteren Stufe der Wärmepumpe betrachtet. Die größten Verluste im Carnot-Kreislauf treten beim Expansionsprozess im Expansionsventil auf. Dieser Exergieverlust kann aber durch eine innovative Komponente, dem Ejektor, teilweise wieder zurückgewonnen werden. Dieses Prinzip ist nicht neu und wird bereits bei CO2 Kältemaschinen eingesetzt wo abhängig von den Betriebsbedingungen und dem Design Effizienzgewinne zwischen 5% and 42% möglich sind. Auch zu Hochtemperaturwärmepumpen gab und gibt es bereits einige Forschungsprojekte mit Beteiligung des AIT. Allerdings sind Ejektoren sehr sensible Bauteile die stark von der Ausbildung der Überschallströmung und dem gleichzeitigen Verdampfen des Kältemittels in der Lavaldüse abhängen. Aus diesem Grund ist der heutige Stand der Entwicklung von Ejektoren nicht ausreichend, um bei gegebenen Anforderungen der industriellen Prozesse an die Teillastfähigkeit von dampferzeugenden Wärmepumpen eine verlässliche Effizienzsteigerung dazustellen. Diese stellt den Ausgangspunkt für das Forschungsprojekt „VLESH - Variable Load Ejector for Steam Heat-pumps“ da. Das vordergründige Ziel dieses Projekts ist es die technische und ökonomische Machbarkeit von Ejektorlösungen für schwankenden Einsatzbedingungen zu beleuchten. Diese Teillastfähigkeit der Wärmepumpe ist dabei mit 30%-100% Heizleistung und Quellschwankungen von 5K in beide Richtungen festgelegt. Als Kältemittel für die

Wärmepumpe wird bewusst Butan gewählt, da es sich aufgrund seiner günstigen thermodynamischen Eigenschaften und Status als natürliches Kältemittel als zukunftssträftig erweist. Die Wärmepumpe wird mittels 1D Simulation analysiert, während die Ejektor Charakteristiken durch die Möglichkeiten der numerischen Strömungssimulation (CFD) bestimmt werden sollen. Um auch abseits der Auslegungsbedingungen eine ausreichend genau Betrachtung der Strömung im Ejektor durchführen zu können, ist eine Weiterentwicklung der bis dato für Butan verwendeten Mehrphasenströmungsmodellen notwendig.

Abstract

Similar as in the EU, around 40% of all fuel used in industry in Austria is used to generate steam. This steam then serves as a heat transfer medium which has many advantages at $\approx 500^{\circ}\text{C}$. As part of the overarching goal of slowing down the progression of climate change, CO₂ neutralization of the steam generation process is crucial. Apart from the direct use of industrial waste heat, the use of high-temperature heat pumps is the most energy-efficient option. One of the first implementation projects (AHEAD) worldwide is currently being planned in Vienna at the Takeda company and underlines Austria's pioneering role in this area. However, heat pumps are not only considered a key technology for the decarbonization of domestic industry, but are also becoming an export hit. In order to further fuel the decarbonization of industry, the call for increased efficiency has become ever greater in the past. The most efficient way to generate steam using heat pumps is to use bursting waste heat of approx. $40\text{-}60^{\circ}\text{C}$, which is raised to approx. 120°C in a closed heat pump circuit and then compressed to the required pressure level using mechanical vapor recompression (MVR) units. The use of MVR already provides a high level of efficiency, but there is still room for efficiency-enhancing measures when considering the Carnot circuit of the lower stage of the heat pump. The greatest losses in the Carnot circuit occur during the expansion process in the expansion valve. However, this exergy loss can be partially recovered by an innovative component, the ejector. This principle is not new and is already used in CO₂ chillers where efficiency gains of between 5% and 42% are possible, depending on the operating conditions and design. There have also been several research projects involving the AIT on high-temperature heat pumps. However, ejectors are very sensitive components that depend heavily on the formation of the supersonic flow and the simultaneous evaporation of the refrigerant in the Laval nozzle. For this reason, the current state of development of ejectors is not sufficient to provide a reliable increase in efficiency given the requirements of industrial processes for the partial load capacity of steam-generating heat pumps. This is the starting point for the research project "VLESH - Variable Load Ejector for Steam Heat-pumps". The primary aim of this project is to shed light on the technical and economic feasibility of ejector solutions for fluctuating operating conditions. The partial load capacity of the heat pump is defined as 30%-100% heat output and source fluctuations of 5K in both directions. Butane was deliberately chosen as the refrigerant for the heat pump, as it has a promising future due to its favorable thermodynamic properties and status as a natural refrigerant. The heat pump is analyzed using 1D simulation, while the ejector characteristics are to be determined using the possibilities of computational fluid dynamics (CFD). In order to be able to carry out a sufficiently precise analysis of the flow in the ejector outside the design conditions, it is necessary to further develop the multiphase flow models used to date for butane.

Endberichtkurzfassung

Das Hauptziel des Forschungsprojekts „VLESH - Variable Load Ejector for Steam Heat-pumps“ ist die Entwicklung eines Teillastkonzepts für dampferzeugende Wärmepumpen, bei denen Butan als Kältemittel verwendet wird. Im Rahmen dieses Projekts wurden verschiedene Lösungsansätze miteinander verglichen, bevor die Entscheidung getroffen wurde, eine Nadel in den Ejektor einzubringen. Diese Maßnahme ermöglicht eine Erweiterung des Betriebsbereichs der Wärmepumpe auf

50-100 % der Heizleistung. Um eine weitere Reduktion des Betriebsbereichs auf 30 % zu erreichen, wurde als mögliche Lösung ein Bypass in Betracht gezogen. Die angestrebte Lösung hat das Potenzial, die Effizienz im gesamten Betriebsbereich um etwa 15-45 % zu steigern.

Beim Aufbau der Wärmepumpe wurde ein aus der Literatur bekannter Standard-Ejektorkreislauf gewählt, der anschließend weiter angepasst wurde, um die Effizienz zu erhöhen. Dies wurde durch die Ergänzung eines Subcoolers für das Speisewasser und eines internen Wärmetauschers erreicht. Die simulierte Wärmepumpe wurde dann in zwei praxisnahen Anwendungsszenarien getestet. Hier zeigte sich, dass die gestiegene Effizienz zu einer verbesserten Wirtschaftlichkeit führt, was die Marktdurchdringung der Technologie der dampferzeugenden Wärmepumpe erheblich steigern könnte.

Im Bereich der Modellierung wurden verschiedene Modelle untersucht, die das Teillastverhalten der Wärmepumpe besser abbilden können. Es stellte sich heraus, dass das Homogeneous Equilibrium Model (HEM) gut für eine erste Auslegung geeignet ist, jedoch ein kalibriertes Homogeneous Non-Equilibrium Model with Boiling (HNB) für den Designprozess die beste Wahl darstellt. Durch die Einbeziehung der Interfacial Area Concentration (IAC) in die aus der Literatur stammende Modellformulierung wurden im Projekt entscheidende Fortschritte erzielt. Eine vollständige Neukalibrierung des Accumulation Coefficient für das Kältemittel Butan konnte jedoch nicht abgeschlossen werden, da die vorliegenden Messdaten aus dem HighButan-Projekt als nicht vollständig physikalisch konsistent bewertet wurden.

Projektkoordinator

- AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Projektpartner

- Technische Universität Wien