

# IEA Wärmepumpentechnologien (HPT) Annex 58: Hochtemperatur- Wärmepumpen

Arbeitsperiode 2021 - 2024

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**24/2025**

## Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur,  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:

Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien

Leitung: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Kontakt zu „IEA Forschungskooperation“: Mag.<sup>a</sup> Sabine Mitter

Autorinnen und Autoren:

DI Dr. techn. Sabrina Dusek, DI Dr. techn. Veronika Wilk

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

DI Manuel Verdnik, Ao.Univ.-Prof. DI Dr. techn. René Rieberer

Technische Universität Graz - Institut für Wärmetechnik

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von



Wien, Oktober 2024

Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an  
[iii3@bmimi.gv.at](mailto:iii3@bmimi.gv.at).

**Disclaimer:**

Dieser Ergebnisbericht wurde von der Fördernehmer:in erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit, Aktualität sowie die barrierefreie Gestaltung der Inhalte übernimmt das Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) keine Haftung.

Mit der Übermittlung der Projektbeschreibung bestätigt die Fördernehmer:in ausdrücklich, über sämtliche für die Nutzung erforderlichen Rechte – insbesondere Urheberrechte, Leistungsschutzrechte sowie etwaige Persönlichkeitsrechte abgebildeter Personen – am bereitgestellten Bildmaterial zu verfügen.

Die Fördernehmer:in räumt dem BMIMI ein unentgeltliches, nicht ausschließliches, zeitlich und örtlich unbeschränktes sowie unwiderrufliches Nutzungsrecht ein, das übermittelte Bildmaterial in allen derzeit bekannten sowie künftig bekannt werdenden Nutzungsarten für Zwecke der Berichterstattung, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit im Zusammenhang mit der geförderten Maßnahme zu verwenden, insbesondere zur Veröffentlichung in Printmedien, digitalen Medien, Präsentationen und sozialen Netzwerken.

Für den Fall, dass Dritte Ansprüche wegen einer Verletzung von Rechten am übermittelten Bildmaterial gegen das BMIMI geltend machen, verpflichtet sich die Fördernehmer:in, das BMIMI vollständig schad- und klaglos zu halten. Dies umfasst insbesondere auch die Kosten einer angemessenen rechtlichen Vertretung sowie etwaige gerichtliche und außergerichtliche Aufwendungen.

## **Vorbemerkung**

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts im Rahmen der IEA Forschungsk Kooperation. Es wurde vom Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) initiiert, um österreichische Forschungsbeiträge zu den Kooperationsprojekten der Internationalen Energieagentur (IEA) zu unterstützen.

Die IEA Forschungsk Kooperationen umfassen eine breite Palette an Energiethemen mit dem Ziel Energiesysteme, Städte, Mobilitäts- und Industriesysteme fit für eine nachhaltige Zukunft bis 2050 zu machen. Auch Themen wie Gendergerechtigkeit oder Ressourcen- und Kreislaufwirtschaftsaspekte werden berücksichtigt.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements der beteiligten Forschungseinrichtungen und Unternehmen ist Österreich erfolgreich in der IEA verankert. Durch die vielen IEA-Projekte entstanden bereits wertvolle Inputs für europäische und nationale Energieinnovationen und neue internationale Standards. Auch in der Marktumsetzung konnten richtungsweisende Ergebnisse erzielt werden.

Ein wichtiges Anliegen ist es, die Projektergebnisse einer interessierten Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Daher werden alle Berichte nach dem Open Access Prinzip in der Schriftenreihe des BMIMI über die Plattform [nachhaltigwirtschaften.at](https://www.nachhaltigwirtschaften.at) veröffentlicht.



## Inhalt

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 Kurzfassung</b> .....   | <b>8</b>  |
| <b>2 Abstract</b> .....  | <b>10</b> |
| <b>3 Ausgangslage</b> .....  | <b>12</b> |
| <b>4 Projektinhalt</b> .....   | <b>14</b> |
| 4.1 Internationales Projekt .....  | 14        |
| 4.2 Aufgabenstellung und Ziele des österreichischen Konsortiums .....                  | 16        |
| 4.3 Vorgangsweise, Methoden und Daten .....  | 16        |
| <b>5 Ergebnisse</b> .....  | <b>19</b> |
| 5.1 Task 1 – Technologien .....  | 21        |
| 5.1.1 Einführung in die HTWP-Technologie .....   | 21        |
| 5.1.2 Überblick über die Technologien .....  | 24        |
| 5.1.3 Demonstrationsprojekte .....   | 27        |
| 5.1.4 HTWP-Markt und Perspektiven in Österreich.....                                   | 28        |
| 5.1.5 Perspektiven der Technologieentwicklung und -einführung .....                    | 30        |
| 5.2 Task 2 – Konzepte .....  | 31        |
| 5.2.1 Integrationskonzepte .....   | 32        |
| 5.2.2 Wärmepumpenkonzepte .....  | 35        |
| 5.2.3 Wirtschaftliche Bewertung.....   | 41        |
| 5.3 Task 3 – Anwendungen und Transformation .....                                      | 43        |
| 5.3.1 Wie definiert man ein Dekarbonisierungsziel? .....                               | 45        |
| 5.3.2 Wie beschreibt man den aktuellen Status/Referenzszenario? .....                  | 45        |
| 5.3.3 Wie entwickelt und bewertet man Lösungskonzepte für die Dekarbonisierung?.....   | 47        |
| 5.3.4 Wie kann ein Dekarbonisierungspfad abgeleitet werden?.....                       | 47        |
| 5.3.5 Modellierungsansatz für die Bewertung von Wärmepumpenkonzepten .....             | 48        |
| 5.4 Task 4 - Definition und Prüfung von Wärmepumpen-Spezifikationen .....              | 50        |
| 5.4.1 Typischer Beschaffungsprozess und Beispiele für industrielle Wärmepumpenprojekte | 51        |
| 5.4.2 Normen .....   | 52        |
| 5.4.3 Factory und Site Acceptance Test (FAT und SAT).....                              | 53        |
| 5.4.4 Leitfäden.....   | 54        |
| 5.5 Erkenntnisse für Österreich .....  | 56        |
| 5.6 Publikationen .....  | 56        |
| <b>6 Vernetzung und Ergebnistransfer</b> .....   | <b>59</b> |
| 6.1 Vernetzung und Verbreitung der Ergebnisse.....                                     | 59        |
| 6.2 Relevanz und Nutzen .....  | 61        |
| <b>7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen</b> .....                           | <b>62</b> |
| <b>Tabellenverzeichnis</b> .....   | <b>65</b> |
| <b>Abbildungsverzeichnis</b> .....   | <b>66</b> |
| <b>Literaturverzeichnis</b> .....  | <b>67</b> |
| <b>Abkürzungen</b> .....   | <b>70</b> |



# 1 Kurzfassung

Wärmepumpen sind eine wesentliche Technologie, um die Dekarbonisierung des Industriesektors voranzutreiben. Ein hoher Anteil des industriellen Prozesswärmebedarfs liegt im Temperaturbereich von 100-200°C, daher sind gerade Hochtemperatur-Wärmepumpen für die Industrie interessant. In diesem Bereich wurde die Technologie erst vereinzelt demonstriert. Als Barrieren für die Verbreitung können lange Amortisationszeiten, Informationsdefizite, mangelndes Wissen über die technologischen Möglichkeiten, sowie ein Mangel an Pilot- und Demonstrationsanlagen genannt werden.

Das Ziel des IEA HPT Annex 58 ist es den Übergang zu einer wärmepumpenbasierten Prozesswärmeversorgung zu unterstützen. Um Barrieren für die Umsetzung der Technologie zu reduzieren, wurde verschiedene Interessensgruppen über das Potential von Hochtemperatur-Wärmepumpen gezielt informiert. Um diese Inhalte zu erarbeiten, wurden verschiedene Methoden angewendet, wobei die Inhalte im Allgemeinen auf internationaler Ebene auf die Teilnehmer:innen aufgeteilt wurden. Eine gezielte Aufbereitung von vorhandenem Wissen und Erkenntnissen, sowie Recherchen lieferten die Basis. Vorwiegend wurden gemeinsam bearbeitbare Onlinedokumente, sowie standardisierte Vorlagen für die Sammlung und Aufbereitung der Informationen verwendet. Weiters wurden Berechnungen und Simulationen durchgeführt. Arbeitsmeetings, Workshops, Deep Dive-Sessions und Status-Meetings wurden durchgeführt, um diverse Inhalte zu erarbeiten, Wissen auszutauschen, und um über den Status der einzelnen Tasks und Beiträge zu informieren.

Dieses Dokument gibt einen Einblick in die Ergebnisse des IEA HPT Annex 58. Task 1 liefert eine Einführung in die Hochtemperatur-Wärmepumpen-Technologie, wie zum Beispiel Kreislaufkonfigurationen, Arbeitsmedien und Kompressortypen, sowie einen Überblick über am Markt verfügbare oder sich in der Entwicklung befindenden Hochtemperatur-Wärmepumpen-Technologien, sowie Entwicklungsperspektiven. Weiters werden mehrere Demonstrationsprojekte, sowie die nationalen Hochtemperatur-Wärmepumpen-Märkte und Perspektiven der am Annex teilnehmenden Ländern vorgestellt. In Task 2 werden Integrationskonzepte für 12 vielversprechende industrielle Anwendungen (z.B. Ziegel Trocknung oder Extrusionskochen) vorgestellt. Weiters werden Wärmepumpenkonzepte für die Heißwassererzeugung, Dampferzeugung und Anwendungen mit hohen Temperaturspreizungen beschrieben und Empfehlungen für die Auswahl von Wärmepumpenkonzepten gegeben. Ein Leitfaden als Unterstützung für Endnutzer:innen bei der Entwicklung einer Dekarbonisierungsstrategie wurde im Zuge von Task 3 erstellt. Task 4 behandelt den typischer Beschaffungsprozess für Großwärmepumpen, sowie Beispiele für industrielle Wärmepumpenprojekte. Ebenfalls wurde in diesem Task ein Einblick in die für die Auslegung und Prüfung von Hochtemperatur-Wärmepumpen relevantesten Normen erarbeitet und Leitfäden für die Definition von Wärmepumpenspezifikationen und die Prüfung im Labor und vor Ort zusammengestellt. Informationen zu Factory Acceptance Test und Site Acceptance Test, sowie eine Checkliste für

Endnutzer:innen zur Informationssammlung für erste Herstelleranfragen werden im internationalen Taskbericht bereitgestellt.

Im Zuge des IEA HPT Annex 58 Projektes hat sich gezeigt, dass bereits einige Technologien für die Anwendung im Hochtemperaturbereich verfügbar sind, und auch vereinzelt Demonstrationsprojekte durchgeführt wurden. Dennoch sind weiterhin Technologieentwicklungen und Demonstrationsprojekte in unterschiedlichen Anwendungen und Industriesektoren notwendig, um das Vertrauen in die Technologie zu stärken und ihre Verbreitung voranzutreiben. Im geplanten Nachfolgeprojekt IEA HPT Annex zum Thema „Industrielle Hochtemperaturwärmepumpen“, welches 2025 starten wird, soll eine Grundlage für die Entwicklung von Sektorlösungen geschaffen werden. Weiterbildungsmaterialien für verschiedene Zielgruppen werden ebenfalls im Fokus dieses Projektes stehen.

## 2 Abstract

Heat pumps are an essential technology for the decarbonization of the industrial sector. A high proportion of industrial process heat demand is in the temperature range of 100-200°C, which makes high-temperature heat pumps particularly interesting for industry. In this field, the technology has only been demonstrated in limited applications. Barriers to wider use include long amortization periods, information gaps, a lack of knowledge about the technological possibilities, and a lack of pilot and demonstration plants.

The aim of the IEA HPT Annex 58 is to support the transition to a heat pump-based process heat supply. In order to reduce barriers to the implementation of the technology, different stakeholders were provided with targeted information about the potential of high-temperature heat pumps. Various methods were used to develop this content, with the content in general being divided among the participants at the international level. A targeted processing of existing knowledge and findings, as well as research, provided the basis. Predominantly, jointly editable online documents and standardized templates were used to collect and process the information. Furthermore, calculations and simulations were carried out. Working meetings, workshops, deep dive sessions and status meetings were held to develop various content, exchange knowledge and provide information on the status of the individual tasks and contributions.

This document provides an insight into the results of the IEA HPT Annex 58. Task 1 introduces high-temperature heat pump technology, such as system types, working fluids and compressor types, as well as an overview of high-temperature heat pump technologies that are available on the market or under development, and development perspectives. Furthermore, several demonstration projects, as well as the national high-temperature heat pump markets and perspectives of the countries participating in the Annex, are presented. In Task 2, integration concepts for 12 promising industrial applications (e.g. brick drying or extrusion cooking) are described. Furthermore, heat pump concepts for hot water generation, steam generation and applications with large temperature glides are described and recommendations for the selection of heat pump concepts are given. A guideline to support end users in developing a decarbonization strategy was created during Task 3. Task 4 deals with the typical procurement process for large-scale heat pumps, as well as examples of industrial heat pump projects. This task also provided insight into the standards most relevant for the design and testing of high-temperature heat pumps and developed guidelines for defining heat pump specifications and for testing in the laboratory and on site. Information on factory acceptance tests and site acceptance tests, as well as a checklist for end users to gather information for initial manufacturer inquiries, is provided in the international task report.

The IEA HPT Annex 58 project has shown that some technologies are already available for use in high-temperature applications, and that a few demonstration projects have also been carried out. Nevertheless, further technology developments and demonstration projects in different

applications and industrial sectors are needed to strengthen confidence in the technology and promote its distribution. The planned follow-up project IEA HPT Annex on the topic of “Industrial High-Temperature Heat Pumps”, which is scheduled to start in 2025, aims to create a basis for the development of sector solutions. Training materials for different target groups will also be the focus of this project.

# 3 Ausgangslage

Bei der Erreichung der Klimaziele spielt die Dekarbonisierung des Industriesektors eine wesentliche Rolle. Für die Dekarbonisierung des Industriesektors muss nicht nur der Anteil an erneuerbaren Energiequellen erhöht, sondern auch der Energieverbrauch gesenkt werden. Durch den erhöhten Einsatz von erneuerbaren Energiequellen zur Erzeugung von elektrischer Energie ist die Elektrifizierung der industriellen Prozesswärmeversorgung eine vielversprechende Maßnahme. Der Einsatz von elektrisch angetriebenen Wärmepumpen in der Industrie ermöglicht sowohl eine Reduzierung des Energiebedarfs durch die Nutzung von Abwärme als auch die Elektrifizierung der Prozesswärmeversorgung. Damit ist die Wärmepumpe eine wesentliche Technologie für die Dekarbonisierung des Industriesektors.

Im Industriesektor wird für eine Vielzahl von Prozessen Wärme auf einem Temperaturniveau über 100°C benötigt, gleichzeitig ist oftmals Abwärme verfügbar, die ungenutzt oder sogar zuvor gekühlt an die Umgebung abgegeben wird. Hier können Hochtemperaturwärmepumpe (HTWP) eingesetzt werden, wobei angenommen wird, dass das größte Anwendungspotential für die Technologie im Versorgungstemperaturbereich von 100°C bis 200°C liegt. Beispiele für Prozesse, die Versorgungstemperaturen in diesem Bereich benötigen, sind Trocknen, Kochen, Bleichen, Pasteurisieren.

Im Jahr 2020 lag der Anteil der Nutzenergiekategorie „Prozesswärme < 200°C“ am Gesamtwärmebedarf bei rd. 42% in Österreich. Dieser Wärmebedarf wurde in den Industriesektoren bis zu 94% aus Erdgasverbrennung gedeckt. Industriesektoren mit dem größten Bedarf an Prozesswärme < 200°C sind die Sektoren „Papier, Zellstoff und Druck“, „Chemie und Petrochemie“ und „Lebensmittel, Tabak und Getränke“. (Statistik Austria, 2021)

Wärmepumpen werden bereits in der Industrie eingesetzt. Nach Biermayr et al. (Biermayer et al., 2021) befanden sich im Jahr 2020 über 400 Industriegewärmepumpen in Österreich in Betrieb.

In den beiden Vorgängerprojekten (IEA HPT Annex 35 und 48) wurden 68 Beispiele von industriellen Wärmepumpen erhoben, wobei die meisten im Nahrungsmittelsektor und in Fernwärmenetzen eingesetzt werden. Hierbei handelt es sich dennoch im Allgemeinen um Wärmepumpen, die Versorgungstemperatur unter 100°C liefern. (Wilk et al., 2019a)

Im Zuge von diversen Forschungsprojekten wird die HTWP-Technologie auf verschiedenen Ebenen, wie System- und Komponentenebene, weiterentwickelt. HTWP werden trotz bereits einigen wenigen kommerziell verfügbaren Produkten noch kaum in der Industrie eingesetzt. Vereinzelt wurde die Technologie in Forschungsprojekten für unterschiedliche industrielle Anwendungen bereits demonstriert.

Diverse Aspekte hemmen die Umsetzung. Dazu gehören zum Beispiel ökonomische Aspekte, wie die Forderung nach kurze Amortisationszeiten und Konkurrenztechnologien basierend auf fossilen Energieträgern, die geringere Betriebskosten aufweisen. Weiters sind mangelndes Wissen über die technologischen Möglichkeiten, sowie geringes Wissen zu existierende Pilot- und Demonstrationsanlagen Beispiele für Aspekte, die sich nachteilig auf die Umsetzung der Technologie auswirken. (Arpagaus, 2018)

Das Ziel des IEA HPT Annex 58 ist es, den Wissenstand über die Technologie und deren Einsatzmöglichkeiten bei unterschiedlichen Interessensgruppen zu erhöhen. Damit soll ein gesteigertes Verständnis für das Potential der Technologie geschaffen werden und die Verbreitung der Technologie vorangetrieben werden.

# 4 Projektinhalt

## 4.1 Internationales Projekt

Das IEA HPT Annex 58 Projekt zielt darauf ab, einen Überblick über die technologischen Möglichkeiten und Anwendungen für HTWP zu geben. Außerdem wurden Best-Practice-Empfehlungen, Informationsmaterialien und Möglichkeiten für den Übergang zu einer wärmepumpenbasierten Prozesswärmeversorgung erarbeitet, um die Verbreitung der Technologie voranzutreiben. Diverse Interessensgruppen, speziell wärmepumpenproduzierende Unternehmen, potenzielle Endnutzer;innen, Berater:innen, Energieplaner:innen und politische Entscheidungsträger:innen, sollen über das Potential der Technologie informiert werden.

Das internationale IEA HPT Annex 58 wurde von Benjamin Zühlsdorf vom Danish Technological Institute (DTI) geleitet. Es haben insgesamt 14 Länder teilgenommen: Belgien, China, Dänemark, Deutschland, Finnland, Frankreich, Japan, Kanada, Niederlande, Norwegen, Österreich, Schweiz, Südkorea, USA.

Die jeweiligen nationalen Teams bestehen aus mehreren Organisationen wie zum Beispiel: Ghent University, KU Leuven, Danish Technological Institute, FENAGY, Johnson Controls, Rambøll, Viegand Maagøe, DTU Technical University of Denmark, DLR, Fraunhofer ISE, Paderborn University, LUT University, Fincoil LU-VE Oy, Nevel, Suomen Tekojää, Vahterus, Yaskawa Environmental Energy/The Switch, Ademe, EDF Group, CEA, CRIEPI, Mayekawa, Kobelco Compressors Corporation, Fuji Electric, JEHC, NEDO, HPTCJ, CanmetENERGY, Université de Sherbrooke, Hydro-Québec - The Energy Technologies Laboratory, Emerson, SINTEF Energy Research, Enova, AIT Austrian Institute of Technology GmbH, TU Graz - Institut für Wärmetechnik, OST-IES, EPFL-IPESSE, HEIG-VD / IGT and CSD Engineers SA.

Nähere Informationen können den Beschreibungen der nationalen Teams auf der IEA HPT Annex 58 Webseite (<https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/>) entnommen werden. Der IEA HPT Annex 58 besteht aus fünf Tasks, Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Inhalte der Tasks.

Tabelle 1: Übersicht über die Tasks des internationalen Projekts und deren Inhalte

| Task  | Inhalte  |
|---|--|
| <b>Task 1 – Technologien</b>  | In diesem Task wurde zum einen eine Einführung in das Thema HTWP (z.B.: grundlegende Definitionen und Prinzipien) und zum anderen ein Überblick über HTWP-Technologien, die kommerziell verfügbar oder sich in der Entwicklung befindenden, gegeben. Weiters wurden unterschiedliche Demonstrationsprojekte vorgestellt und die nationalen HTWP-Märkte und Technologieperspektiven der teilnehmenden Länder dargestellt. Auf Basis dieser Informationen wurde ein Gesamtausblick zu den Entwicklungsperspektiven der Technologie erarbeitet. |
| <b>Task 2 – Konzepte</b>  | In diesem Task wurden Integrationskonzepte für ausgewählte Industrieprozesse, sowie eine Übersicht über Publikationen mit Beispielen zu Integrationskonzepten dargestellt. Außerdem wurden typische Wärmepumpenanwendungen und zugehörige Konzepte beschrieben und Empfehlungen für die Auswahl von Integrationskonzepten für bestimmte Anwendungen erarbeitet.  |
| <b>Task 3 – Anwendungen und Transformation</b>                        | In diesem Task wurde die Entwicklung von Dekarbonisierungsstrategien und deren Bedeutung genauer betrachtet. Dazu wurden die Themen Zielsetzung, Beschreibung des Status des zu dekarbonisierenden Standorts, die Entwicklung und Bewertung von Lösungskonzepten und die Entwicklung einer Roadmap genauer betrachtet. Basierend darauf wurde ein Leitfaden entwickelt, der Endnutzer:innen dabei unterstützen soll, eine Dekarbonisierungsstrategie zu entwickeln.  |
| <b>Task 4 - Definition und Prüfung von Wärmepumpenspezifikationen</b> | Dieser Task beschäftigte sich mit Empfehlungen für die Definition und Prüfung von Spezifikationen für HTWP in gewerblichen Projekten. Es wurden Leitfäden und Empfehlungen für die Festlegung von Spezifikationen und der Performance von Wärmepumpen, sowie für die Prüfung und Validierung der Performance erstellt. Weiters wurde ein typischer Beschaffungsprozess näher erläutert und Normen für die Planung und Prüfung von industriellen Wärmepumpen diskutiert.  |
| <b>Task 5 - Dissemination</b>   | Dieser Task umfasste die gezielte Verbreitung der Ergebnisse unter einem breiten Spektrum von Interessengruppen. Das beinhaltete unter anderem die Erstellung der Deliverables, die Verbreitung der Ergebnisse auf nationaler und internationaler Ebene, sowie die Interaktion mit anderen Arbeitsgruppen.   |

## 4.2 Aufgabenstellung und Ziele des österreichischen Konsortiums

Das österreichische Konsortium besteht aus AIT Austrian Institute of Technology GmbH und TU Graz - Institut für Wärmetechnik und hat in allen Tasks des internationalen Projekts mitgearbeitet. Die Abarbeitung im Projekt erfolgte in enger Zusammenarbeit der beiden nationalen Projektpartner. Weiters hat das AIT die Leitung von Task 3 (Anwendungen und Transformation) des internationalen Projekts übernommen. Das österreichische Konsortium nahm an den internationalen Expert:innen-Meetings und Workshops teil, um dort die Erkenntnisse aus nationalen Projekten sowie die im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Arbeiten einzubringen und um sich mit den anderen Expert:innen über deren Aktivitäten im HTWP-Bereich auszutauschen. Zusätzlich wurde ein Expert:innen Meeting in Wien am AIT Austrian Institute of Technology abgehalten. Tabelle 2 zeigt die spezifischen Ziele des österreichischen Projektes, sowie die Einbettung der Ergebnisse in das internationale Projekt.

Tabelle 2: Ziele des nationalen Projektes und Einbettung in das internationale Projekt

| Ziele des nationalen Projekts  | Beitrag zum internationalen Projekt in |
|--|--|
| Erhebung und Dokumentation vom Stand-der-Technik speziell in Österreich im Bereich HTWP auf System- und Komponentenebene                                       | Task 1                                 |
| Erstellung von Integrationskonzepten für HTWP in ausgewählten Industrieprozessen.  | Task 2                                 |
| Leistung eines Beitrags zur Entwicklung von Strategien für einen Übergang zu einer wärmepumpenbasierten Prozesswärmeversorgung.                                | Task 3                                 |
| Erstellung einer Checkliste bzw. Empfehlungen für den Beschaffungsprozess bzw. Abnahme einer Wärmepumpe in Österreich aus Endkundensicht.                      | Task 4                                 |
| Informationsweitergabe bzw. Weiterbildung relevanter nationaler Zielgruppen sowie Erhöhung der internationalen Sichtbarkeit der österreichischen WP-Forschung. | Task 5                                 |

## 4.3 Vorgangsweise, Methoden und Daten

Die Ergebnisse des internationalen Projektes setzen sich aus den Beiträgen der nationalen Teams zusammen. Dabei wurden unterschiedliche Aufgaben an die nationalen Teams verteilt. Ein wesentlicher Bestandteil des nationalen Projektes lag darin, vorhandenes Wissen und Erkenntnisse zum Beispiel aus Forschungsprojekten gezielt aufzubereiten und für das internationale Projekt und

in weiterer Folge zur Veröffentlichung verfügbar zu machen. Verschiedene Methoden wurden angewendet, um die Inhalte in das internationale Projekt einzubringen.

Es wurden gemeinsam bearbeitbare Onlinedokumente für die internationalen Taskberichte, sowie standardisierte Vorlagen (Task 1 und Task 2) für das Einbringen der Beiträge, auf internationaler Ebene bereitgestellt. Diese standardisierten Vorlagen bieten den Vorteil, dass die benötigten Informationen, strukturiert gesammelt und dargestellt werden. Dennoch kann eine Überprüfung der Informationen notwendig sein, vor allem wenn unterschiedliche Begriffe und Definitionen verwendet werden. Im Folgenden werden kurz die einzelnen standardisierten Vorlagen vorgestellt, wobei die Vorlagen für die Technologiebeschreibungen direkt von den angefragten den herstellenden Unternehmen ausgefüllt wurden:

- 1) Vorlage zur Beschreibung von HTWP-Technologien
  - Zusammenfassung der Technologie inkl. Betriebsdaten
  - Projektbeispiel
  - Infobox: Heizleistung, Temperaturbereich, Arbeitsmedium (Kältemittel), Kompressortechnologie, spezifische Investitionskosten, TRL, Lebensdauer und Größe
  - Kontaktinformationen
- 2) Vorlage zur Beschreibung von Demonstratoren
  - Zusammenfassung des Demonstrators
  - Betriebserfahrungen
  - Besondere Erkenntnisse
  - Infobox: Installationsjahr, Betriebsstunden, Arbeitsmedium, Kompressortechnologie, Systemhersteller, Betriebsdaten, Investitionskosten, Einsparungen (Kosten und CO<sub>2</sub>) und Link zur Homepage oder Bericht
  - Kontaktinformationen
- 3) Vorlagen zur Beschreibung von Integrationskonzepten
  - Beschreibung des Referenzprozesses oder -systems
  - Detaillierte Beschreibung jedes Integrationskonzeptes (z.B.: Quellen- und Senktemperaturen und Medien)
- 4) Vorlagen zur Beschreibung von Wärmepumpenkonzepten
  - Beschreibung der Anwendung
  - Beschreibung von Wärmepumpenkonzepten (z.B.: Leistungsbereich, Erwartete Performance, Vor- und Nachteile)

Alle Beschreibungen der Demonstrationsprojekte und der HTWP-Technologien wurden auf der IEA HPT Annex 58 Webseite (IEA HPT Annex 58, 2024a) bereitgestellt. Die Inhalte aus den ausgefüllten Vorlagen für die Integrations- und Wärmepumpenkonzepte wurden in den Taskbericht zu Task 2 übertragen und analysiert.

Das nationale Projektteam hat mehrere Unternehmen, die HTWP herstellen, angefragt und bei positiver Rückmeldung die Vorlagen ausgesendet. Zu Beginn des Projektes waren die Rückmeldungen spärlich, da die Unternehmen noch keinen Vorteil in dem Technologieüberblick erkennen konnten. Während der Projektlaufzeit hat eines der angefragten Unternehmen eine Technologiebeschreibung zur Verfügung gestellt. Nach der Projektlaufzeit hat ein weiteres Unternehmen zwei Technologiebeschreibungen geliefert. Im Gesamten konnten 39 Technologiebeschreibungen und 16 Demonstrationsprojektbeschreibungen (Stand Mai 2024) gesammelt werden.

Gezielte Recherchen, Sammlung von vorhandenem Wissen und Erkenntnissen aus Gesprächen mit wärmepumpenproduzierenden Unternehmen, Endanwender:innen und Forschungsprojekten, Analyse und Aufbereitung der Informationen waren die Methoden zur Erarbeitung einer Vielzahl an Inhalten in diesem Annex-Projekt. Zu diesen Inhalten gehören zum Beispiel die Beiträge zum Stand der Technik bzw. Einführung in die Technologie, Demonstrationsprojektbeschreibungen, Integrations- und Wärmepumpenkonzeptbeschreibungen. Weiters wurden im Zuge von Task 1 vier Projekte mit wesentlicher Beteiligung des nationalen Projektteams vorgestellt.

Außerdem wurden Methoden wie Durchführung von Berechnungen, Simulationen und Vergleich mit Messergebnissen vom nationalen Team eingesetzt, um gewisse Inhalte, wie zum Beispiel die Darstellung des nationalen Wärmepumpenmarkts bzw. des nationalen Anwendungspotentials oder zur Darstellung eines Modellierungsansatzes für die Entwicklung und Bewertung von Wärmepumpenkonzepten angewendet. Ein weiterer wesentlicher Bestandteil bei der Erarbeitung der Inhalte für das internationale Annex-Projekt waren diverse Arbeitsmeetings, Workshops und Status-Meetings. Im Zuge von Task 3, geleitet vom AIT auf internationaler Ebene, wurden auch Workshops mit den Annex-Teilnehmern durchgeführt. Herausfordernd in Task 3 war es, die zu bearbeitenden Inhalte an die Vielzahl an Teilnehmer:innen in diesem Task zu verteilen und so eine unabhängige Erarbeitung, aber dennoch schlüssige Darstellung der Thematik zu ermöglichen.

Ein Instrument, um den Austausch und die Vernetzung im internationalen Projekt zu fördern, waren die von der internationalen Projektleitung organisierten Deep Dive Sessions. In diesen Sessions wurden sowohl Annex-Teilnehmer:innen, als auch externe Expert:innen eingeladen, Vorträge zu spezifischen Themen zu halten.

Im Zuge des Projektes wurden einige Daten verwendet. Zum einen bildeten Daten der Statistik Austria (Statistik Austria, 2021) eine Grundlage für die Darstellung und Berechnungen des nationalen HTWP-Anwendungspotentials. Zum anderen wurden Daten für den österreichischen Spotmarkt (Austrian Power Grid AG, 2024), für PV-Stromgestehungskosten (Kost et al., 2024), Emissionsfaktoren (Umweltbundesamt, 2023) und Erdgaspreise (E-Control, 2024) für eine Wirtschaftlichkeitsanalyse verwendet. Die Messergebnisse für den Vergleich mit Simulationsergebnissen eines vereinfachten Modellierungsansatzes wurden vom nationalen Projektteam erarbeitet. Weiters wurden Informationen aus den Technologiebeschreibungen (IEA HPT Annex 58, 2024a) und Daten zu den in Österreich betriebenen Industrierärmepumpen (Biermayer et al., 2021) genutzt.

# 5 Ergebnisse

In Tabelle 3 werden die Ergebnisse des internationalen Projektes, sowie die zugeordneten Beträge des österreichischen Konsortiums, aufgelistet. Das österreichische Konsortium hat die Ergebnisse des internationalen Projekts maßgeblich mitgestaltet. Weiters wird in diesem Kapitel ein Überblick über die Ergebnisse anhand der Tasks des internationalen Projekts gegeben.

Tabelle 3: Übersicht über die Tasks und deren Inhalte

| Task                          | Ergebnisse des internationalen Projektes   | Beiträge des österreichischen Konsortiums   |
|-------------------------------|--|---|
| Task 1 – Technologien         | <u>Internationaler Task 1 Bericht:</u><br>Einführung in die Hochtemperaturwärmepumpentechnologie | Kapitel 1.2.1.1: Kreislaufkonfigurationen (ohne Beschreibung zu Dampfkompensationssystemen)   |
|                               | Technologieüberblick   | Kapitel 1.2.1.3: Kompressor   |
|                               | Demonstrationsprojekte   | Beitrag zu Kapitel 2: Fünf Hersteller für Produktbeschreibungen angefragt   |
|                               | Nationaler HTWP-Markt und Perspektiven   | Beitrag zu Kapitel 3: Zwei Demonstrationsprojektbeschreibungen  |
|                               | Perspektiven der Technologieentwicklung und -einführung  | Kapitel 4.1: Überblick über die österreichische HTWP-Industrie, Überblick über den nationalen HTWP-Markt und Anwendungspotential, Entwicklungsperspektiven für HTWP-Technologien und ausgewählte Forschungsprojekte |
|                               |  | <u>Weitere Inhalte:</u> Patentrecherche   |
| Task 2 – Integrationskonzepte | <u>Internationaler Task 2 Bericht:</u><br>Einleitung (Umfang, Begriffe und Definition, Vorlagen) | Beitrag zu Kapitel 2.1.3: Informationen zur Stärketrocknung   |
|                               | Integrationskonzepte   | Kapitel 2.1.7: Ziegelrocknung   |
|                               | Wärmepumpenkonzepte  | Kapitel 2.1.10: Extrusionskochen  |
|                               | Empfehlungen für die Auswahl von Integrationskonzepten für bestimmte Anwendungen                 | Kapitel 3.1.2: Dampferzeugung   |
|                               |  | <u>Weitere Inhalte:</u> Genauere Ausführungen des Vergleichs von Wärmepumpenkonzepten zur Dampferzeugung, Genauere Ausführungen zum Einfluss der Kältemittelauswahl, wirtschaftliche Bewertung                      |

| Task  | Ergebnisse des internationalen Projektes  | Beiträge des österreichischen Konsortiums  |
|---|---|--|
|   | Zusammenfassung und Schlussfolgerung  |  |
| Task 3 - Anwendung und Transformation                           | <p><u>Internationaler Task 3 Bericht:</u></p> <p>Einleitung</p> <p>Wie definiert man ein Dekarbonisierungsziel?</p> <p>Wie beschreibt man den aktuellen Status/Referenzszenario?</p> <p>Wie entwickelt und bewertet man Lösungskonzepte für die Dekarbonisierung?</p> <p>Wie kann ein Dekarbonisierungspfad abgeleitet werden?</p> <p>Schlussfolgerung</p> <p><u>Leitfaden für die Entwicklung einer Dekarbonisierungsstrategie</u></p> | <p>Leitung des Task auf internationaler Ebene</p> <p>Organisation von zwei Workshops im Zuge von internationalen Projektmeetings</p> <p>Organisation und Durchführung von online Arbeitsmeetings</p> <p>Erster Vorschlag für Struktur und mögliche Inhalte wurden gemeinsam mit der internationalen Annex-Leitung erarbeitet</p> <p>Sammlung der Informationen und deren Aufbereitung</p> <p>Erstellung diverser Grafik- und Textvorschläge</p> <p>Finale Ausarbeitung der Dokumente (Bericht und Leitfaden) und Formatierung der Grafiken</p> <p><u>Weitere Inhalte:</u> Diskussion eines Modellierungsansatzes für die Entwicklung und Bewertung von Wärmepumpenkonzepten.</p> |
| Task 4 – Definition und Prüfung von Wärmepumpen-Spezifikationen | <p><u>Internationaler Task 4 Bericht:</u></p> <p>Einleitung und Definitionen</p> <p>Beschreibung eines typischen Beschaffungsprozesses für industrielle Großwärmepumpen</p> <p>Normen</p> <p>Beispiele und Erfahrungen aus industriellen Wärmepumpenprojekten</p> <p>Leitfaden zur Definition von Wärmepumpen-Spezifikationen</p> <p>Leitfaden für die Prüfung von HTWP in großem Maßstab</p>   | <p>Beitrag zu Kapitel 2.1: Checkliste für die Basisdesignphase</p> <p>Beitrag zu Kapitel 6.1: Informationen zur Laborinfrastruktur des nationalen Teams</p> <p>Kapitel 6.2.2: Beispiel für COP-Schwankungen und Unsicherheiten bei der Prüfung vor Ort (SAT)</p> <p>Beitrag zu Kapitel 6.3: Wesentlicher Beitrag bei der Definition der Schritte für die Nutzung von Simulationsmodellen für die Bewertung von Wärmepumpen</p> <p><u>Weitere Inhalte:</u> Informationen zu Normen und Richtlinien für Hochtemperaturwärmepumpen in Österreich</p>  |

## 5.1 Task 1 – Technologien

In diesem Task wird eine Einführung in die Technologie, sowie ein Überblick über marktverfügbare bzw. sich in der Entwicklung befindenden HTWP-Technologien gegeben. Weiters wurden Informationen zu Demonstrationsprojekten im HTWP-Bereich gesammelt. Die Informationen wurden auf der Homepage des IEA HPT Annex 58 (IEA HPT Annex 58, 2024a) veröffentlicht, wodurch eine umfassende Datenbank zu HTWP-Technologien und Demonstrationsprojekten zur Verfügung steht. Weiters werden in diesem Task die nationalen Märkte und Perspektiven werden für verschiedene Länder dargestellt. Der Forschungs- und Entwicklungsbedarf in Bezug auf Komponenten, Arbeitsflüssigkeiten und Systemdesign wurden zusammengefasst und allgemeine Entwicklungsperspektiven dargestellt. Die Ergebnisse zu diesem Task sind im internationalen IEA HPT Annex 58 Taskbericht „Task 1 – Technologies“ (Zühlsdorf et al., 2023) dargestellt. Ein Einblick in diese Ergebnisse bzw. den internationalen Taskbericht wird im Folgenden gegeben.

### 5.1.1 Einführung in die HTWP-Technologie

Als Wärmepumpe wird ein Gerät bezeichnet, das Wärme aus einer Wärmequelle auf einem niedrigeren Temperaturniveau zurückgewinnt und sie auf einen höheren Temperaturniveau wieder für eine Wärmesenke verfügbar macht. Dazu wird dem System hochwertigere Energie, wie Strom oder Wärme auf einem noch höheren Temperaturniveau zugeführt. HTWP stellen (zumindest einen Teil) der Heizleistung auf Temperaturen über 100°C zur Verfügung. Die Wärmesenke einer HTWP kann entweder der Prozessmassenstrom selbst sein oder ein Versorgungsstrom, der zur Beheizung des Prozessmediums genutzt wird.

Um eine Wärmepumpe nutzen zu können, muss eine Wärmequelle verfügbar sein, zum Beispiel Abwärme aus industriellen Prozessen (z.B.: Abwärme einer Kälteanlage, Kühlwasser oder feuchte Abluft) oder rezirkulierende Ströme von Prozessen, sowie Wärme aus erneuerbaren Energiequellen (Solarthermie, Geothermie, Umgebungsluft, Meer- oder Flusswasser). Weiters hängt die technische und wirtschaftliche Machbarkeit der HTWP-Technologie auch vom Einsatztemperaturbereich, der Leistung, dem Temperaturhub (Temperaturdifferenz zw. Senken- und Quellenaustritt), der Art des Prozesses (Batch oder kontinuierlich), Betriebsstunden und der Referenzerzeugungstechnologie ab.

Im Allgemeinen gibt es mehrere Möglichkeiten eine Wärmepumpe an einem Industriestandort zu integrieren: Integration direkt im Prozess, Integration in eine Prozesseinheit, Integration als zentrales Wärmeversorgungssystem. Die Auswahl der Möglichkeit hängt von unterschiedlichen Faktoren wie zum Beispiel Leistung, Effizienz, und Technologiereifegrad ab. Eine wesentliche Kennzahl für die Bewertung eines HTWP-Systems ist der Coefficient of Performance (COP). Der COP ist ein Maß für die Effizienz einer Wärmepumpe und ist definiert als das Verhältnis zwischen der Heizleistung und der Antriebsleistung, die zur Bereitstellung der Heizleistung benötigt wird. Weiters ist der COP des Wärmepumpensystems umgekehrt proportional zum Temperaturhub. Es kann davon

ausgegangen werden, dass der COP der Wärmepumpe bei der Integration direkt im Prozess am höchsten ist, da hier im Allgemeinen der Temperaturhub am geringsten ist.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit von HTWP ist die Erzeugung von Wärme bei der Nutzung von Überschuss-Strom, wobei die Wärme gespeichert wird. Gleichzeitig wird hier Niedertemperatur-Wärme auf einem höheren Temperaturniveau nutzbar gemacht. Wird Strom benötigt, kann der thermische Speicher entladen werden und diese Wärme für den Antrieb eines Kreislaufes (z.B. ORC) zur Stromerzeugung genutzt werden. Ein solches System wird auch als Carnot-Batterie bezeichnet.

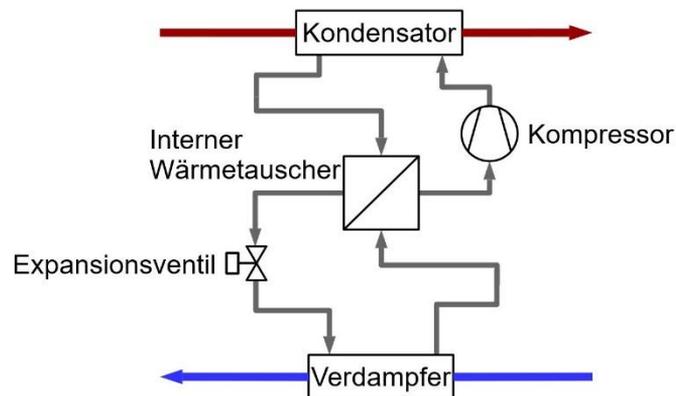
Die Funktionsweise einer Wärmepumpe basiert auf der Veränderung der thermodynamischen Eigenschaften eines Arbeitsmediums (Kältemittel) durch Druck und Temperatur. Bei Kompressionswärmepumpen wird beispielsweise die Druckabhängigkeit der Sättigungstemperatur genutzt, die eine Wärmeaufnahme durch Verdampfung auf niedrigem Temperatur- und Druckniveau und eine Wärmeabgabe durch Kondensation auf hohem Temperatur- und Druckniveau ermöglicht. Eine Einteilung kann in elektrisch und thermisch angetriebene Wärmepumpen erfolgen, je nachdem welche der beiden Energieformen für den Hauptantrieb genutzt wird. Diese beiden Typen unterscheiden sich wesentlich in ihren Funktionsprinzipien. Zu den thermisch angetriebenen Wärmepumpensystemen gehören zum Beispiel Sorptionsanlagen, thermoakustische und hybride Wärmepumpen. Im Task 1 Bericht (Zühlsdorf et al., 2023) wird ein Einblick in thermisch angetriebenen Wärmepumpensystemen gegeben.

Bei elektrisch angetriebenen Wärmepumpen erfolgt der Hauptantrieb des Wärmepumpenkreislaufes durch die Zufuhr von elektrischer Energie (z.B.: durch den Einsatz von Kompressoren). Im Folgenden wird ein Einblick in die Arbeitsmedien, System- und Kompressortypen von elektrisch angetriebenen Wärmepumpen gegeben. Weitere Informationen enthält der Task 1 Bericht (Zühlsdorf et al., 2023).

### **Kreislaufkonfigurationen und Kreisprozesse elektrisch angetriebener Wärmepumpen**

Einer der gebräuchlichsten Kreislaufkonfigurationen von elektrisch angetriebenen Wärmepumpen ist der einstufige Kreislauf mit oder ohne internen Wärmetauscher, wie er in Abbildung 1 dargestellt ist. Der Kreislauf besteht aus Verdampfer, Kompressor, Kondensator, Expansionsventil und je nach den Eigenschaften des eingesetzten Kältemittels, einem internen Wärmetauscher. Der interne Wärmetauscher wird eingesetzt, um die Effizienz des Kreislaufes zu erhöhen, indem das gasförmige Kältemittel nach dem Verdampfer mit dem flüssigen Kältemittel nach dem Kondensator weiter überhitzt wird. Der interne Wärmetauscher ist vor allem für Kältemittel mit einem überhängendem Zweiphasengebiet von Vorteil, da so eine Nassverdichtung vermieden werden kann. In den Kreisläufen können vor allem bei hohen Druckdifferenzen anstelle von Expansionsventilen (siehe Abbildung 1), die durch einen irreversiblen Entspannungsprozess mit hohen Exergieverlusten gekennzeichnet sind, auch zum Beispiel Ejektoren zur Rückgewinnung von Expansionsarbeit eingesetzt werden.

Abbildung 1: Einstufiger Wärmepumpenkreislauf mit internem Wärmetauscher (Quelle: AIT Austrian Institute of Technology GmbH, (Zühlsdorf et al., 2023))



Weitere Kreislaufkonfigurationen von elektrisch angetriebenen Wärmepumpen sind zum Beispiel der Kreislauf mit Economiser und der Kreislauf mit Kondensatoraustritt-Split-Ejektor. Weiters können Wärmepumpenkreisläufe zu Wärmepumpenkaskaden oder Mehrfach-Kreislauf-Systemen verschalten werden.

Bei Wärmepumpenprozessen, die im unterkritischen Bereich des Kältemittels ablaufen erfolgt die Wärmeabgabe an die Wärmesenke in einem Kondensator, wobei das Kältemittel kondensiert (unterkritisch). Die Wärmeaufnahme erfolgt über einen Verdampfer, in dem das Kältemittel verdampft. Beim transkritischen Prozess erfolgt die Wärmeabgabe bei gleitender Temperatur ohne Phasenwechsel des Kältemittels. Beim Joule-Prozess (auch bekannt als inverser Brayton-Prozess) hingegen findet im gesamten Kreislauf kein Phasenwechsel des Kältemittels statt und damit erfolgt die Wärmeübertragung rein sensibel. Aus diesem Grund eignen sich Wärmepumpen, die auf diesem Prinzip beruhen für Anwendungen mit großen Temperaturspreizungen zw. Wärmetauschein- und -austritt). Ein weiterer Prozess, indem kein Phasenwechsel stattfindet, ist der Stirling Prozess (oder auch Philips-Prozess), welcher besonders vorteilhaft bei hohen Temperaturhüben ist. Eine Technologie, die bei HTWP-Anwendungen, im Speziellen bei dampferzeugenden Systemen oftmals zum Einsatz kommt, sind **Dampfkompressoren** (Brüdenverdichter). Mit einem Dampfkompessor wird Wasserdampf von einem niedrigeren auf ein höheres Druckniveau gebracht.

### Kompressoren für elektrisch angetriebene Wärmepumpen

Der Kompressor ist die Hauptkomponente einer Kompressionswärmepumpe. Er verdichtet das gasförmige Kältemittel von einem niedrigeren auf ein höheres Druckniveau. Daher hat der Kompressor einen großen Einfluss auf die Effizienz des Wärmepumpensystems. Es sind verschiedene Kompressortypen erhältlich. Die Kompressortypen, die derzeit in HTWP eingesetzt werden, sind Kolben- (Hubkolben-), Scroll-, Schrauben- und Turbokompressoren (einschließlich Zentrifugalkompressor). In der Regel werden diese Kompressortypen von einem Elektromotor angetrieben.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Kompressionswärmepumpen nutzt die auf dem Joule-Prozess basierende Rotationswärmepumpe, die Zentrifugalkraft anstelle eines Kompressors zur Druckerhöhung (Längauer et al., 2019).

### **Arbeitsmedien elektrisch angetriebener Wärmepumpen**

Eine weitere wichtige Komponente eines Wärmepumpensystems ist das Arbeitsmedium (Kältemittel). Im Task 1 Bericht (Zühlsdorf et al., 2023) wird ein Überblick über die Eigenschaften heutiger und zukünftiger Arbeitsmedien gegeben, wobei der Überblick keine Edelgase wie Helium oder Argon enthält. Solche Edelgase werden zum Beispiel in Wärmepumpensystemen basierend auf dem Stirling- oder Joule-Prozess eingesetzt. Die Auswahl des Arbeitsmediums (Kältemittels) ist wesentlich bei der Auslegung von Wärmepumpen. Dabei spielen die Eigenschaften kritische Temperatur, kritischer Druck, Ozonabbaupotenzial (ODP ... Ozon Depletion Potential), Treibhauspotenzial (GWP ... Global Warming Potential) und Sicherheitsgruppe eine wichtige Rolle. Die wesentlichen Bewertungskriterien für den Einsatz in Wärmepumpen können in die Kategorien thermische Eignung, Umweltverträglichkeit, Sicherheit, Effizienz, Verfügbarkeit und andere Faktoren eingeteilt werden. Die F-Gas-Verordnung legt fest, welche Kältemittel unter welchen Bedingungen in der EU verwendet werden dürfen.

## **5.1.2 Überblick über die Technologien**

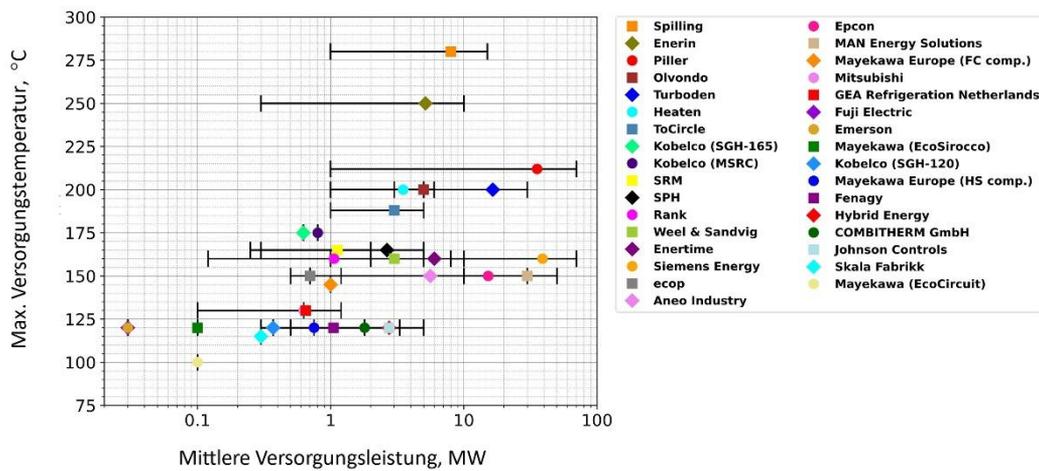
Um einen Überblick über den aktuellen Status der am Markt verfügbaren oder sich in der Entwicklung befindenden HTWP-Technologien zu erhalten, wurden im Rahmen des Projekts zweiseitige Beschreibungen gesammelt und auf der Webseite des IEA HPT Annex 58 (IEA HPT Annex 58, 2024a) veröffentlicht. Die Beschreibung erfolgte auf Basis einer Vorlage, die direkt vom herstellenden Unternehmen ausgefüllt wurden. Die Vorlage war wie folgt aufgebaut:

- Zusammenfassende Beschreibung der Technologie inkl. Leistungsdaten
- Projektbeispiel
- **Faktenbox:** Heizleistung, Temperaturbereich, Arbeitsmedium, Kompressortechnologie, spezifische Investitionskosten ohne Integrationskosten, Technology Readiness Level (TRL), erwartete Lebensdauer und Größe.
- Kontaktinformationen

Zum Zeitpunkt der Fertigstellung des Task 1 Berichts (Zühlsdorf et al., 2023) waren Beschreibungen für 34 verschiedene Technologien verfügbar und diese weisen eine große Bandbreite zum Beispiel in der maximalen Versorgungstemperatur, Heizleistung, TRL und spezifischen Kosten auf. Weiters sind Technologien, die zur Heißwassererzeugung, Dampferzeugung oder zum Aufheizen von anderen Medien (z.B.: Luft oder Thermoöl) eingesetzt werden können enthalten. Abbildung 2 zeigt die maximale Versorgungstemperatur und den Heizleistungsbereich (schwarze Linien) für die HTWP-Technologien verschiedener Hersteller. Die Symbole für die einzelnen Technologien wurden bei der mittleren Versorgungsleistung (Heizleistung) angeordnet. Es ist ersichtlich, dass alle

Technologien in einem Heizleistungsbereich von 30 kW und 70 MW liegen. Die maximalen Versorgungstemperatur liegt zwischen 100°C und 280°C.

Abbildung 2: Maximale Versorgungstemperatur und mittlerer Versorgungsleistung für die HTWP-Technologien verschiedener Unternehmen. Der Heizleistungsbereich der einzelnen Technologien werden durch die schwarzen Balken dargestellt. (Quelle: Danish Technological Institute, (Zühlsdorf et al., 2023))

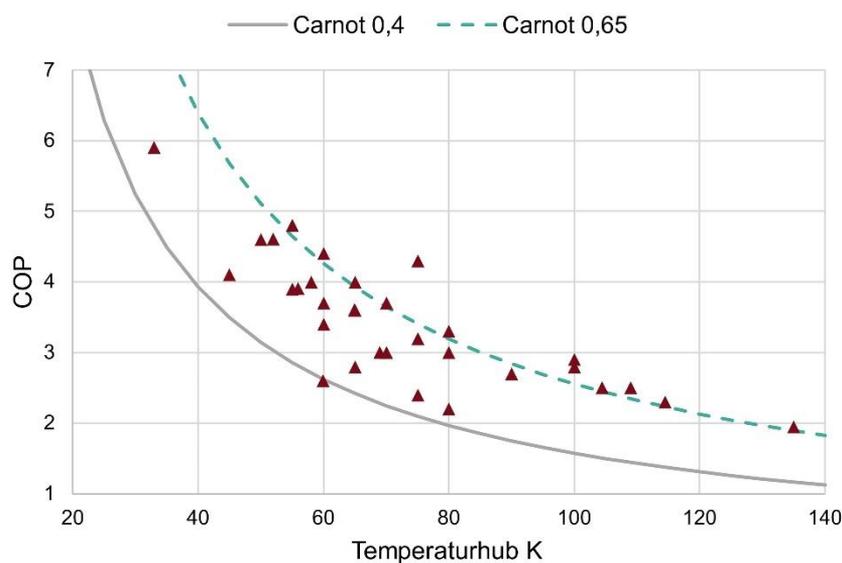


Weiters basieren die beschriebenen Wärmepumpentechnologien auf verschiedenen Prozessen bzw. Kreislaufkonfigurationen (siehe Kapitel 5.1.1) und nutzen unter anderem unterschiedliche Kompressortypen. Es werden neben Kompressionswärmepumpen mit geschlossenem Kreislauf, die im unterkritischen Bereich des Kältemittels arbeiten, auch transkritische Wärmepumpen, Wärmepumpen basierend auf den Stirling-Prozess, sowie eine Technologie, die auf dem Joule-Prozess beruhen, beschrieben. Darüber hinaus sind Dampfkompressoren, eine Hybrid-Wärmepumpe und ein Adsorptionswärmetransformer enthalten. Die Technologien befinden sich in unterschiedlichen Entwicklungsstadien, sie decken einen TRL-Bereich zwischen 4 (Technologie im Labor getestet) und 9 (System, dass sich in Betriebsumgebung bewährt hat) ab. Die COP-Werte, die von den Herstellern für verschiedene Betriebspunkte angegeben wurden, reichen von 1,4 bis 10,3, wobei dabei beachtet werden muss, dass es sich um unterschiedliche Technologien handelt.

Abbildung 3 zeigt die von Herstellern angegebenen COP-Werte für ausgewählte Wärmepumpentechnologien und Betriebspunkte (Versorgungstemperatur > 100°C) in Abhängigkeit vom Temperaturhub (Temperaturdifferenz zwischen Quellen- und Senkenaustritt). In der Abbildung werden nur die Werte für Kompressionswärmepumpen zur Heißwassererwärmung oder direkten Dampferzeugung (Verdampfung des Wassers direkt im Kondensator der Wärmepumpe, siehe auch Kapitel 5.2.2), die im unterkritischen Bereich arbeiten, dargestellt. Außerdem werden in dem Diagramm berechnete COP-Verläufe (Annahme: 120°C Versorgungstemperatur) auf Basis der Annahme von zwei unterschiedlichen Carnot-Gütegraden (0,4 und 0,65) dargestellt (siehe Kapitel

5.3.5). Der Carnot-Prozess ist der ideale Vergleichsprozess. Der Carnot-Gütegrad beschreibt, wie stark ein realer Wärmepumpenprozess von diesem idealen Vergleichsprozess abweicht. In Abbildung 3 ist zu erkennen, dass der COP im Allgemeinen mit steigendem Temperaturhub sinkt, sowie COP-Werte berechnet auf Basis eines Carnot-Gütegradbereichs von 0,4 bis 0,65 die meisten von den Herstellern angegebenen Werte beinhalten. In Kapitel 5.3.5 wird unter anderem der Carnot-Gütegrad näher erläutert.

Abbildung 3: COP ausgewählter HTWP-Technologien in Abhängigkeit vom Temperaturhub basierend auf (IEA HPT Annex 58, 2024a). (Dusek et al., 2024)



Weitere für Endnutzer:innen wesentliche Informationen sind die spezifischen Investitionskosten und die erwartete Lebensdauer. Die in den Beschreibungen angegebenen spezifischen Investitionskosten liegen zw. 200 €/kW und 1200 €/kW und der mittlere Temperaturhub variiert zw. 20°C und 190°C. Die Analyse der Beschreibungen hat einen leichten Trend für mit steigendem Temperaturhub steigende spezifische Investitionskosten gezeigt. Jedoch gibt es auch Herstellerangaben, die diesem Trend nicht folgen. Laut den meisten Hersteller liegt erwartete Lebensdauer bei 20 Jahren. Dennoch zeigt sich eine mit sinkender Heizleistung sinkende erwartete Lebensdauer. Die durchschnittlich erwartete Lebensdauer für Technologien mit einer Heizleistung unter 500 kW ist ca. 15 Jahre. Sie steigt auf 19 Jahre für Heizleistungen zwischen 500 kW und 5 MW. Für Technologien mit Heizleistungen über 5 MW ist die durchschnittlich erwartete Lebensdauer ca. 23 Jahre.

Auch nach der Fertigstellung von Task 1 und dem entsprechenden Bericht wurden weitere Technologiebeschreibungen veröffentlicht. Seit Mai 2024 befinden sich 39 Technologiebeschreibungen von 34 verschiedenen Unternehmen auf der IEA HPT Annex 58 Homepage (IEA HPT Annex 58, 2024a). Darunter sind zwei österreichische Unternehmen: ecop Technologies GmbH und OCHSNER Energie Technik. OCHSNER Energie Technik hat für den HTWP-Bereich zwei

Kompressionswärmepumpen im Portfolio, wobei die eine Wärmepumpe zur Dampferzeugung mit einer maximalen Temperatur von 120°C (1,6 MW) und die zweite zur Heißwassererzeugung mit maximal 130°C (0,5 MW) eingesetzt werden kann (OCHSNER Energie Technik, 2024a, 2024b). Ecop Technologies GmbH bietet eine auf dem Joule-Prozess basierende, sogenannte „Rotationswärmepumpe“ an, die eine maximale Senkenaustrittstemperatur von 150°C und eine Heizleistung von 0,7 MW besitzt (ecop Technologies GmbH).

Eine Patentrecherche hat gezeigt, dass in Österreich 43 Patente aus drei unterschiedlichen Patentfamilien zum Thema HTWP angemeldet wurden. Zwei Patentfamilien decken jeweils eine Vorrichtung und ein Verfahren ab, während die dritte Patentfamilie eine Vorrichtung zur Umwandlung von Wärmeenergie bei niedriger Temperatur in Wärmeenergie bei hoher Temperatur mittels mechanischer Energie und umgekehrt abdeckt. Alle drei Patentfamilien nutzen Fliehkräfte zur Verdichtung und Entspannung des Arbeitsmediums in einem geschlossenen Kreislauf.

### 5.1.3 Demonstrationsprojekte

Zweiseitige Beschreibungen von HTWP-Demonstrationsprojekte wurden ebenfalls in Task 1 des Projekts gesammelt und auf der Webseite des IEA HPT Annex 58 (IEA HPT Annex 58, 2024a) publiziert. Die Beschreibungen der Demonstrationsprojekte beinhaltet die folgenden Informationen, sofern diese Informationen zur Verfügung gestellt wurden:

- Zusammenfassende Beschreibung des Demonstrators
- Betriebserfahrung
- Besondere Erkenntnisse
- **Faktenbox:** Jahr der Inbetriebnahme, Betriebsstunden, Arbeitsmedium, Systemhersteller, Leistungsdaten im Auslegungspunkt, Investitionskosten, Einsparungen, geschätzte jährliche CO<sub>2</sub> -Einsparungen und Link zur Webseite oder zum Bericht.
- Kontaktinformationen

Mit Stand Mai 2024 sind 16 Demonstrationsprojekt-Beschreibungen verfügbar. Bei den Demonstratoren handelt es sich unterschiedliche HTWP-Technologien (geschlossene Kompressionswärmepumpen, Dampfkompressoren, und Wärmetransformatoren), die in sechs verschiedenen Industriesektoren umgesetzt wurden: *Papier und Zellstoff, Chemie und Petrochemie, Steine und Erden, Glas, Maschinenbau, Nahrungsmittel und Abwasserreinigung*. Sieben Demonstratoren wurden zur Dampferzeugung zum Beispiel für thermische Trennverfahren und acht für die Wärmeversorgung von Trocknungsprozesse eingesetzt. Die Erzeugung von Prozesswasser mit HTWP kommt ebenfalls in einem Demonstrationsprojekt vor. Die Versorgungstemperaturen der Demonstratoren liegen zwischen 110°C (Wärmepumpensysteme mit geschlossenem Kältemittelkreislauf) und 211°C (Dampfkompessor-Technologie).

Beschreibungen von zwei österreichischen Demonstratoren, die im Rahmen des H2020-Projektes DryFiciency entwickelt wurden, sind ebenfalls verfügbar. Die erste dieser Anlagen wurde bei einem Standort der Agrana und die zweite bei einem Standort der Wienerberger AG demonstriert. Wienerberger AG ist der größte Ziegelhersteller der Welt und Agrana ist ein Weltkonzern im Bereich Frucht-, Stärke- und Zuckerproduktion. Beide Demonstratoren bestehen aus jeweils zwei miteinander verschalteten Wärmepumpenkreisläufen (Verdampfer in parallel und Kondensatoren in Serie verschalten), die das Kältemittel R1336mzz(Z) nutzen und heißes Wasser mit bis zu 160°C zum Aufheizen von Luft für Trocknungsprozesse bereitstellen. Betriebserfahrungen für über 8000 Stunden konnten für beide Demonstratoren gesammelt werden. Zu den Herausforderungen bei der Entwicklung der HTWP gehörten die Kompatibilität von Schmiermittel, Kältemittel und Dichtungsmaterialien, die mechanische Konstruktion zur Reduzierung von Vibrationen, die Integrationsinfrastruktur und die Prozesssteuerung.

#### **5.1.4 HTWP-Markt und Perspektiven in Österreich**

In Kapitel 3 wurde bereits erwähnt, dass ein hoher Anteil des industriellen Prozesswärmebedarfs < 200°C noch durch die Verbrennung von Erdgas gedeckt wird. Setzt man anstatt Erdgasverbrennung (Wirkungsgrad 95%), Wärmepumpen mit einem COP von 2,76<sup>1</sup> kann der Endenergieverbrauch um rd. 66% gesenkt werden. Die Reduzierung des Energieverbrauchs durch Effizienzsteigerung ist von großer Bedeutung, wenn alle Sektoren in Österreich mit erneuerbarer Energie versorgt werden sollen. Das wird auch in der IndustRiES- Studie (Geyer et al., 2021) hervorgehoben, ebenso wie der Einsatz Speicher und Wärmepumpen, die wesentlich für die Effizienzsteigerung von Industrieprozessen sind.

Durch die Integration von Wärmepumpen können auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlich gesenkt werden. Wird in dem oben genannten Beispiel, für Erdgas ein CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor von 268 g/kWh und für Strom ein Emissionsfaktor von 219 g/kWh angenommen (Umweltbundesamt, 2021), ergeben sich CO<sub>2</sub>-Emissionseinsparungen von 72%. Durch den Einsatz von Strom aus erneuerbaren Quellen und einem entsprechend geringeren Emissionsfaktor sind weitere wesentliche CO<sub>2</sub>-Einsparungen möglich. Weiters könnten auf Grund der Energie- und Emissionseinsparungen die Betriebskosten deutlich gesenkt werden.

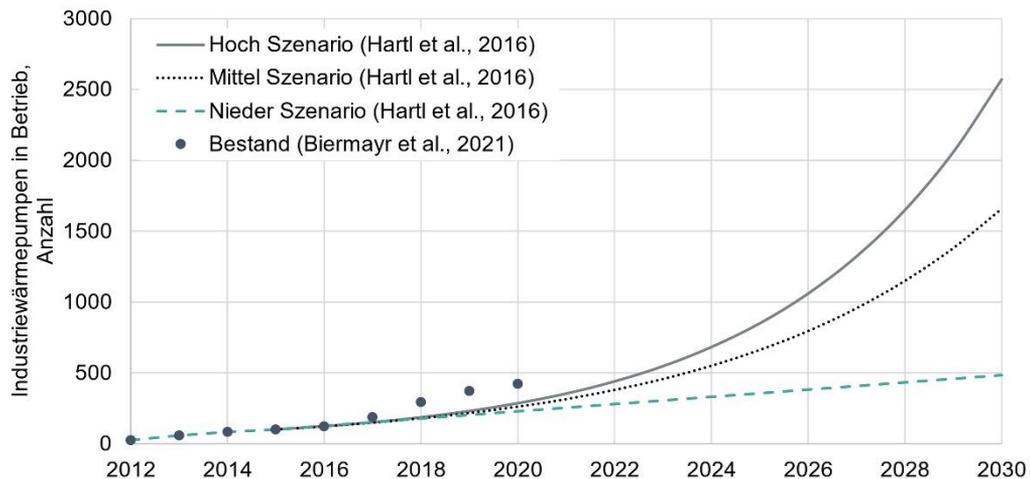
Anhand der von Biermayr et al. (Biermayer et al., 2021) publizierten Daten zeigt sich, dass die Zahl der betriebenen industriellen Wärmepumpen (in industriellen und gewerblichen Prozessen eingesetzt und projektbezogen hergestellt) in Österreich jährlich gestiegen ist (siehe Abbildung 4). In Abbildung 4 ist erkennbar, dass schon im Jahr 2017 mehr Wärmepumpen in Betrieb waren, als in der österreichischen Technologie-Roadmap für Wärmepumpen (Hartl et al., 2016) basierend auf den

---

<sup>1</sup> Ein COP von 2,76 ergibt sich zum Beispiel bei der Erzeugung von 120°C gesättigtem Dampf mit einer Quellaustrittstemperatur von 60°C und einem Carnot-Gütegrad von 0,46.

Daten von Biermayr et al. (Biermayer et al., 2021) für die Jahre 2012 – 2015 entwickelten Szenarien (lineare Entwicklung, 20% und 25% Marktwachstum) vorhergesagt wurde.

Abbildung 4: Jährliche Anzahl der in Betrieb befindlichen industriellen Wärmepumpen in Österreich inklusive Zukunftsszenarien bis 2030 basierend auf den Zahlen von 2012-2015 (Biermayer et al., 2021; Hartl et al., 2016).



Sowohl in der IndustRiES-Studie (Geyer et al., 2021) als auch in der Technologie-Roadmap für Wärmepumpen (Hartl et al., 2016) wird hervorgehoben wie wichtig Demonstrationsprojekte für die Verbreitung und Akzeptanz der Technologie im Industriesektor sind. Außerdem sind Forschungsprojekte zum Thema Abwärmenutzung, sowie Dampferzeugung mit Wärmepumpen bzw. höhere Bereitstellungstemperatur (150°C – 200°C) von großer Bedeutung.

Diverse Forschungsprojekte werden im Bereich HTWP durchgeführt. Beispielhaft werden im Folgenden ausgewählte Forschungsprojekte mit einer hohen österreichischen Beteiligung vorgestellt:

- Hot Cycle<sup>2</sup> (04/2015 – 06/2018): Wärmepumpenprototyp mit R600 als Kältemittel und einem modifizierten Trennhaubenkompressor zur Bereitstellung von Temperaturen bis 110°C. Dieser Kompressortyp weist gegenüber anderen Typen in Bezug auf Sicherheit und Wartungsfreundlichkeit Vorteile auf beim Einsatz in Kombination mit brennbaren und/oder toxischen Kältemitteln auf.

---

<sup>2</sup> Gefördert durch den Klima- und Energiefonds und durchgeführt im Rahmen des Energieforschungsprogramms 2015, FFG Nr. 848892, <https://energieforschung.at/projekt/hotcycle-hochtemperatur-waermepumpe-kleiner-bis-mittlerer-leistung-mit-trennhaubenkompressor/>

- TransCrit<sup>3</sup> (04/2018 – 09/2021): Durch Umsetzung einer transkritischen Prozessführung mit dem Kältemittel R600 (n-Butan) können Temperaturen von bis zu 160 °C erreicht werden. Dies wurde mit einem Funktionsmuster im Labormaßstab (Heizleistung ca. 16 bis 30 kW) demonstriert, das experimentell und mit Hilfe von Simulationsmodellen detailliert untersucht wurde.
- DryFiciency<sup>4</sup> (09/2016 – 08/2021): Drei Demonstratoren wurden entwickelt, wobei zwei der Demonstratoren bereits in Kapitel 5.1.3 kurz vorgestellt wurden. Bei dem dritten Demonstrator handelt es sich um ein offenes Wärmepumpensystem für die Dampftrocknung, wobei auch für diesen Demonstrator eine Beschreibung auf der Homepage des IEA HPT Annex 58 Task 1 (IEA HPT Annex 58, 2024a) zu finden ist.
- BAMBOO<sup>5</sup> (09/2018 – 08/2022): Ein Prototyp für eine industrielle Wärmepumpe zur Erzeugung von gesättigtem Dampf bei einem Druck von bis zu 5 bar<sub>a</sub> aus Abwärme wurde entwickelt, konstruiert, hergestellt, getestet und validiert.

### 5.1.5 Perspektiven der Technologieentwicklung und -einführung

Es wurde ein Überblick über die technischen Entwicklungsperspektiven von HTWP-Technologien auf Basis, der im internationalen Projekt gesammelten Informationen erstellt. In Abbildung 5 werden die Entwicklungsperspektiven in verschiedenen Heizleistungskategorien (200 kW bis 10 MW und >10 MW) und Versorgungstemperaturbereichen dargestellt. In der Heizleistungskategorie 200 kW bis 10 MW werden die Entwicklungsperspektiven in die Versorgungstemperaturbereiche <120°C, 120°C-160°C und >160°C eingeteilt. Im Heizleistungsbereich >10 MW werden nur zwei Versorgungstemperaturbereich <120°C und >120°C berücksichtigt. Im Folgenden werden die wesentlichen Aspekte der einzelnen Heizleistungskategorie und Versorgungstemperaturbereich zusammengefasst:

- Heizleistung: 200 kW bis 10 MW; Versorgungstemperatur < 120°C: In diesem Bereich basieren die Technologien vorwiegend auf Weiterentwicklungen von gewerblichen und industriellen Kältetechnikanalgen.
- Heizleistung: 200 kW bis 10 MW; Versorgungstemperatur 120°C – 160°C: In diesem Bereich gibt es zusätzlich zu den Technologien, die auf Weiterentwicklungen von gewerblichen und industriellen Kältetechnikanlagen basieren, neue Technologieentwicklungen, wie zum Beispiel Kompressoren auf Basis von LKW-Motoren oder Turboladern.

---

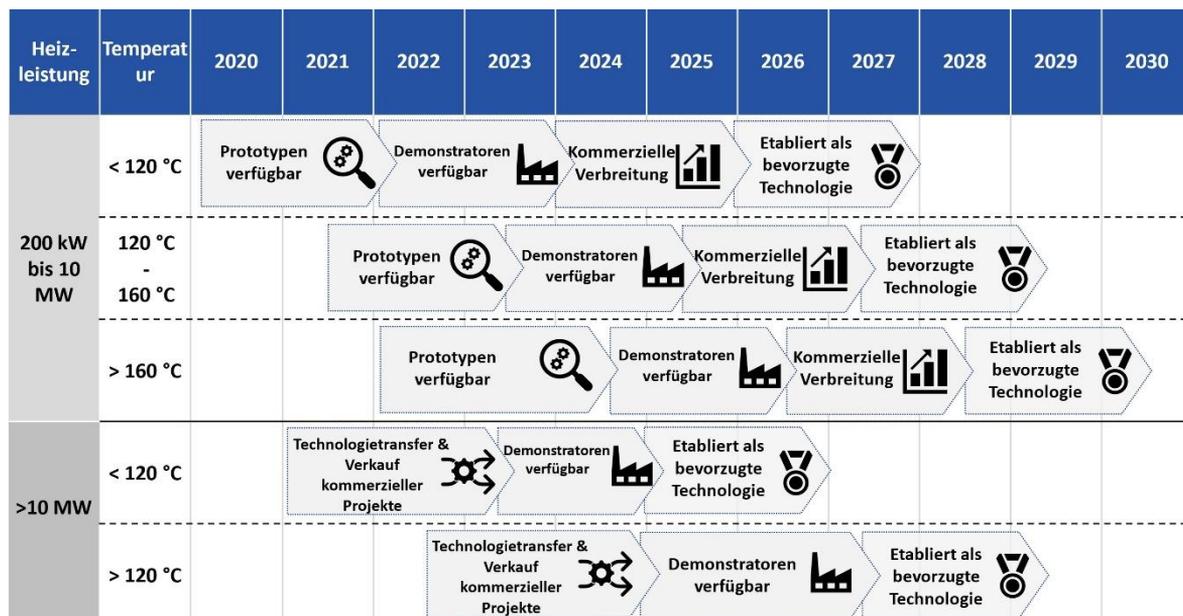
<sup>3</sup> Gefördert durch den Klima- und Energiefonds und durchgeführt im Rahmen des Energieforschungsprogramms 2017, FFG-Nr. 865083, <https://energieforschung.at/projekt/transkritische-hochtemperatur-waermepumpe-zur-abwaermenutzung/>

<sup>4</sup> Gefördert durch die europäische Kommission im Rahmen von H2020-Innovation Action, ID Nr. 723576, <https://dryficiency.eu/>

<sup>5</sup> Gefördert durch die europäische Kommission im Rahmen von H2020, ID Nr. 820771, <https://www.bambooproject.eu>

- Heizleistung: 200 kW bis 10 MW; Versorgungstemperatur >160°C: In diesem Bereich ist die Technologie noch weniger ausgereift, jedoch finden hier Entwicklungen statt (z.B. Dampfkompressoren und Wärmepumpen basierend auf Stirling-Prozess).
- Heizleistung: > 10 MW; Versorgungstemperatur <120°C: In diesem Bereich werden hauptsächlich Turbokompressoren angedacht.
- Heizleistung: > 10 MW; Versorgungstemperatur > 120°C: In diesem Bereich werden hauptsächlich Turbokompressoren angedacht, wobei Wasser als Kältemittel bevorzugt wird.

Abbildung 5: Technologieentwicklungsperspektiven für HTWP-Technologien bis 2030 (Quelle: Danish Technological Institute, (IEA HPT Annex 58, 2024a))



## 5.2 Task 2 – Konzepte

Task 2 des IEA HPT Annex 58 beschäftigt sich mit Integrationskonzepten für verschiedene Industrieprozesse und Wärmepumpenkonzepten für ausgewählte industrielle Anwendungen. Ziel des Task 2 war es, einen Überblick über Best Practice Konzepte für vielversprechende industrielle Anwendungen von HTWP zu geben und somit ein Verständnis für die technologischen Möglichkeit und das Potential zu schaffen. Im internationalen Task 2 Bericht des IEA HPT Annex 58 (Zühlsdorf et al., 2024a) werden Integrationskonzepte für verschiedene Industrieprozesse (z.B. Extrusionskochen und Ziegel Trocknung) und Wärmepumpenkonzepte für drei allgemeine industrielle Anwendungen vorgestellt. Außerdem werden Empfehlungen für die Auswahl von Wärmepumpenkonzepten gegeben.

## 5.2.1 Integrationskonzepte

Im Gesamten werden im internationalen Bericht zum IEA HPT Annex 58 Task 2 (Zühlsdorf et al., 2024a) 21 Integrationskonzepte für 12 verschiedene Industrieprozesse vorgestellt. Im Folgenden wird ein Überblick über die Integrationskonzepte gegeben:

- **Backöfen:**
  - Konzept 1: Das Konzept ist eine Kombination aus Wärmetauscher und Wärmepumpe. Die feuchte Luft aus dem Backofen wird zuerst in einem Wärmetauscher zur Vorwärmung der Zuluft des Backofens genutzt. Die feuchte Luft wird anschließend durch die Abkühlung auf der Quellenseite einer Wärmepumpe entfeuchtet und anschließend im Wärmetauscher vorgewärmt. Nach der Vorwärmung wird die Zuluft durch die Wärmepumpe auf die Zieltemperatur erwärmt.
  - Konzept 2: Eine Wärmepumpe wird zur Bereitstellung der Zuluft für den Backofen verwendet, indem die feuchte Luft aus dem Backofen erwärmt wird. Als Quelle für die Wärmepumpe wird die Kühlung des Förderbandes und des Produktes verwendet.
- **Destillation:**
  - Konzept 1: Die Wärmepumpe wird zur Bereitstellung von Dampf für die Destillationskolonne verwendet, indem die Kühlung des Destillats von der Wärmepumpe übernommen wird.
  - Konzept 2: Die Wärmepumpe wird zur Bereitstellung von Dampf für die Destillationskolonne verwendet, indem ein Kühlkreislauf als Wärmequelle genutzt wird.
  - Konzept 3: Die Wärmepumpe wird zur Bereitstellung von Dampf für einen Dünnschichtverdampfer und eine Destillationskolonne eingesetzt, wobei die Kondensation des Destillats nach dem Dünnschichtverdampfer als Wärmequelle verwendet wird.
- **Sprühtrocknung:**
  - Konzept 1: Die Wärmepumpe wird zur Bereitstellung der Zuluft für den Sprühtrockner verwendet, indem die feuchte Abluft des Sprühtrockners als Wärmequelle genutzt wird.
  - Konzept 2: Dieses Konzept entspricht Konzept 1, wobei ein Wasser-Zwischenkreis zwischen der feuchten Abluft aus dem Sprühtrockner und dem Verdampfer auf der Quellenseite der Wärmepumpe eingesetzt wird.
- **Batch-Sterilisation:**
  - Konzept 1: Die Wärmepumpe wird eingesetzt, um Heißwasser für einen Heißwasserpufferspeicher bereitzustellen, mit dem die zu sterilisierenden Retorten erhitzt werden. Als Wärmequelle dient ein Wasserspeicher, der durch Abwärme aus einem Retorten-Kühlprozess aufgewärmt wird.
  - Konzept 2: Die Wärmepumpe wird zur Bereitstellung von Dampf für die Beladung eines Dampfspeichers eingesetzt, wobei ein Wasserspeicher als Wärmequelle dient. Der Wasserspeicher wird durch Abwärme aus einem Retorten-Kühlprozess beheizt.

- **Anodisierungsprozess:**
  - Konzept 1: Das Prozessmedium des Glanzbades wird über einen Wärmetauscher zur Vorwärmung von Frischwasser für die Kondensations-, Entfettungs- und Reinigungsbadern genutzt. Das Abwasser aus dem Kondensationsbad wird in einem Wärmetauscher zur weiteren Erwärmung des bereits vorgewärmten Frischwassers genutzt. Anschließend wird das Abwasser als Wärmequelle einer Wärmepumpe genutzt, um entweder Dampf oder Heißwasser bereitzustellen. Das Heißwasser kann dann direkt im Kondensations-, Entfettungs- und Reinigungsbad eingesetzt werden oder der in der Wärmepumpe erzeugte Dampf wird eingesetzt, um das Wasser für die Bäder weiter zu erhitzen.
  - Konzept 2: Dieses Konzept entspricht im Wesentlichen dem Konzept 1, jedoch wird hier ein Wasser-Zwischenkreis zur Kühlung des Prozessmediums des Glanzbades und zur Vorwärmung des Frischwassers über einen Wärmetauscher eingesetzt wird.
- **Trocknung von Autolacken:**

Eine Wärmepumpe wird eingesetzt, um ein heißes flüssiges Wärmeträgermedium zur Versorgung des Trockners bereitzustellen, indem die Kühlung eines feuchten Luftstroms als Wärmequelle genutzt wird.
- **Ziegelrocknung:**
  - Konzept 1: Eine Wärmepumpe wird eingesetzt, um Heißwasser für einen Zwischenkreis bereitzustellen, indem die feuchte Abluft des Trockners als Wärmequelle genutzt wird. Das Heißwasser im Zwischenkreis wird zur Erwärmung der Luft im Trockner genutzt.
  - Konzept 2: Dieses Konzept entspricht im Wesentlichen Konzept 1, jedoch wird hier eine zweite Wärmepumpe eingesetzt, um die Zuluft für den Tunnelrockner auf einem höheren Temperaturniveau als die von den Heizschlangen erwärmte Luft im Trockner bereitzustellen. Für die zweite Wärmepumpe wird das Heißwasser im Zwischenkreis als Wärmequelle genutzt.
- **Öl- und Gasverarbeitung:**
  - Konzept 1: Eine Wärmepumpe wird zur Bereitstellung von Heizleistung für die zweite Stufe eines Separationsprozesses eingesetzt. Gleichzeitig kühlt die Wärmepumpe das abgetrennte Rohöl nach dem Separator.
  - Konzept 2: Die Wärmepumpe erhitzt Öl für ein zentrales Heizsystem, indem sie ein Wasser-Glykol-Gemisch aus einem zentralen Kühlsystem als Wärmequelle nutzt.
- **Formfaser-Trockner:**
  - Konzept 1: Eine Wärmepumpe wird zur Beheizung der Trocknungsluft eines Konvektionstrockners eingesetzt, wobei die feuchte Abluft des Trockners als Wärmequelle genutzt wird.
  - Konzept 2: Eine Wärmepumpe wird zur Erwärmung von Rezirkulationsdampf (Dampftrocknung) eingesetzt, wobei überschüssiger Dampf als Wärmequelle genutzt wird. Eine weitere Möglichkeit wäre hier einen Dampfkompessor zu nutzen,

um den Druck und die Temperatur des überschüssigen Dampfes zu erhöhen und damit den Rezirkulationsdampf über einen Wärmetauscher zu erhitzen.

- **Extrusionskochen:**

Eine Wärmepumpe wird eingesetzt, um einen wasserbasierten Zwischenkreis aufzuheizen, indem die Abluft eines Trockners als Wärmequelle genutzt wird.

Das Heißwasser im Zwischenkreis wird eingesetzt, um das Produkt aufzuheizen.

- **Trocknung von Kunststoffgranulat:**

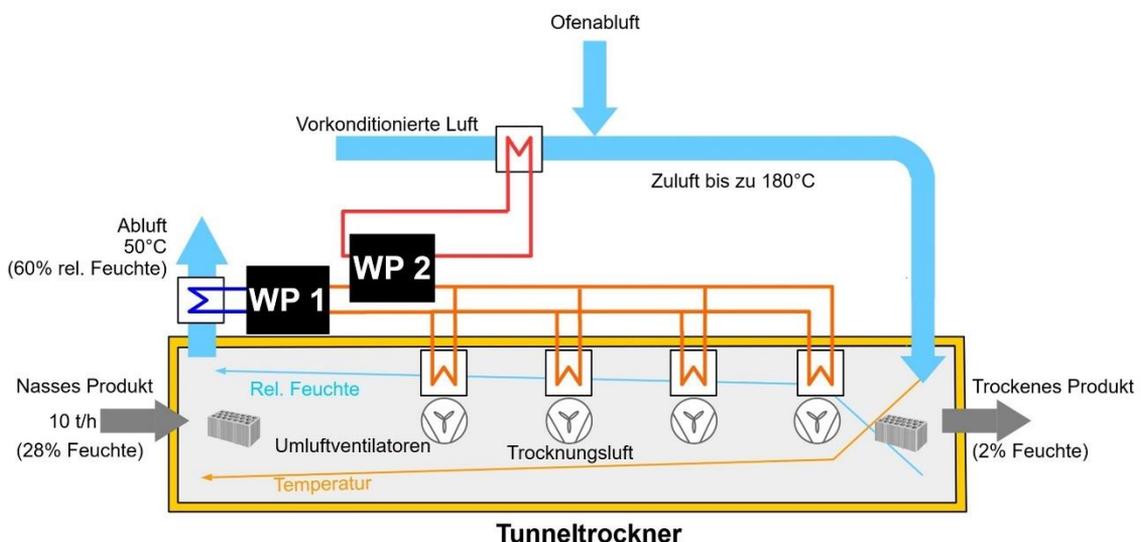
Eine Wärmepumpe wird eingesetzt, um Heißluft für den Trocknungsprozess bereitzustellen, indem feuchte Abluft aus Trocknungsprozessen als Wärmequelle genutzt wird.

- **Bioschlamm-trocknung:**

Dampfkompressoren werden eingesetzt, um die Temperatur und den Druck eines Teils des aus dem Trocknungsprozess austretenden überhitzten Dampfmassestrom zu erhöhen. Dieser komprimierte Dampf wird verwendet, um in einem Wärmetauscher den restlichen Teil des aus dem Trocknungsprozess austretenden überhitzten Dampfmassestrom für die erneute Nutzung im Trocknungsprozess wieder aufzuheizen.

Wie in der Auflistung zu erkennen ist, spielen Trocknungsprozesse in der Industrie eine wesentliche Rolle. Daher wird im Folgenden nochmals genauer auf die Integration von Wärmepumpen im Ziegel-trocknungsprozess näher eingegangen (siehe Abbildung 6).

Abbildung 6: HTWP-Integration in einem Ziegel-trockner. Integrationskonzept 1: nur WP1, Integrationskonzept 2: WP1 und WP2 (Quelle: AIT Austrian Institute of Technology GmbH, (Dusek et al., 2024), (Zühlsdorf et al., 2024a))



Wie bereits erwähnt, wurden zwei Integrationskonzepte für diesen Anwendungsfall vorgestellt. In beiden Konzepten wird eine Wärmepumpe (WP1 siehe Abbildung 6) verwendet, welche die feuchte Abluft aus dem Trockner über einen Wasser-Zwischenkreis als Wärmequelle nutzt und einen weiteren Wasser-Zwischenkreis aufheizt. Der heiße Wasser-Zwischenkreis wird genutzt um die Luft, über im Trockner angeordnete Heizschlangen, aufzuheizen. Beim ersten Konzept wird dem Trocknungsprozess noch zusätzlich Luft zugeführt, die mittels einer zusätzlichen Wärmequelle beheizt wird (Erdgasverbrennung, Abwärme aus einem weiteren Prozessschritt). Im zweiten Konzept ist eine zweite Wärmepumpe (WP2 siehe Abbildung 6) enthalten, die als Quelle den heißen Wasser-Zwischenkreis nutzt und Leistung zur Beheizung der Zuluft über einen dritten Wasser-Zwischenkreis bereitstellt. Die Auswahl des optimalen Konzepts hängt von den Randbedingungen ab. Zum einen ist die erforderliche Temperatur im Trockner bzw. in den Trocknungszonen ein Kriterium. Die Trocknungstemperatur hängt wiederum von der Länge des Trockners bzw. die Trocknungsgeschwindigkeit ab. Auch der Einfluss der Trocknungstemperatur auf das Produkt muss berücksichtigt werden. Außerdem ist zu berücksichtigen, ob unabhängig vom Trocknungsprozess zusätzliche Abwärme am Industriestandort verfügbar ist, die im Trocknungsprozess bzw. zur Beheizung der Zuluft nutzbar wäre. Ein Beispiel ist die Abwärme eines Ofens, indem die Ziegel gebrannt werden. Jedoch ist dabei darauf zu achten, ob diese zusätzliche Abwärme in Zukunft bei der Erhöhung des Dekarbonisierungsgrades des betrachteten Standorts, in dieser Qualität und Leistung noch zur Nutzung im Trocknungsprozess verfügbar ist. Eine ganzheitliche Dekarbonisierungsstrategie kann sicherstellen, dass Maßnahmen langfristig optimal umgesetzt werden. Auf die Entwicklung von Dekarbonisierungsstrategien wird in Kapitel 5.3 bzw. im internationalen Bericht zu Task 3 des IEA HPT Annex 58 (Zühlsdorf et al., 2024b; IEA HPT Annex 58, 2024b) näher eingegangen.

Die wirtschaftliche Bewertung der Konzepte ist stark von der tatsächlichen Ausführung abhängig. Es ist jedoch davon auszugehen, dass auf Basis der aktuellen Energieträgerpreise, das Konzept mit nur einer Wärmepumpe im Allgemeinen wirtschaftlicher ist. Die zusätzliche Wärmepumpe im zweiten Konzept bewirkt, dass die erste Wärmepumpe mehr Energie aus der Abluft rückgewinnt, um mehr Heizleistung bereitstellen zu können. Eine Erhöhung der Heizleistung der ersten Wärmepumpe wird benötigt, um die benötigte Quellenleistung für die zweite Wärmepumpe bereitzustellen. Wird mehr Energie aus der Abluft rückgewonnen, wird diese stärker abgekühlt, was in einem geringeren COP der ersten Wärmepumpe resultiert, als wenn diese allein vorhanden wäre. Außerdem bewirkt die Erhöhung der Heizleistung der ersten Wärmepumpe eine Steigerung der Investitionskosten. Weiters erhöhen sich die Investitionskosten durch die zusätzliche Wärmepumpe. Dennoch kann gleichzeitig mehr Energie und damit auch CO<sub>2</sub>-Emissionen mit dem zweiten Konzept eingespart werden.

## 5.2.2 Wärmepumpenkonzepte

Auf Basis der Integrationskonzeptbeschreibung können drei allgemeine Anwendungsfälle identifiziert werden: Heißwassererzeugung, Dampferzeugung und Anwendungen mit großen Temperaturspreizungen. Im internationalen Task 2 Bericht des IEA HPT Annex 58 (Zühlsdorf et al., 2024a) werden insgesamt 10 Wärmepumpenkonzepte für diese drei allgemeinen Anwendungsfälle

vorge stellt. Im Folgenden wird ein kurzer Einblick in die vorgestellten Wärmepumpenkonzepte gegeben, wobei auf den Anwendungsfall Dampferzeugung noch näher eingegangen wird.

- **Heißwassererzeugung:** Drei Konzepte werden für die Heißwassererzeugung vorgestellt, wobei sie sich in den verwendeten Systemtypen unterscheiden.
  - Geschlossene Kompressionswärmepumpen mit einstufiger, mehrstufiger Kompression und Wärmepumpenkaskade, die im unterkritischen Bereich des Kältemittels arbeiten. Somit erfolgt sowohl bei der Wärmeaufnahme als auch bei der Wärmeabgabe ein Phasenwechsel des Kältemittels.
  - Transkritische Wärmepumpe mit Gasbypass, Ejektor oder Expander unter Verwendung von R744 als Kältemittel. Die Wärmeabgabe erfolgt im überkritischen Bereich des Kältemittels (ohne Phasenwechsel) und die Wärmeaufnahme im unterkritischen Bereich (mit Phasenwechsel).
  - Hybride Absorptions-Kompressionswärmepumpe basiert auf dem Osenbrück-Kreislauf und arbeitet mit einem Kältemittelgemisch aus Ammoniak und Wasser.
- **Anwendungen bei großen Temperaturspreizungen:** Es werden vier Wärmepumpenkonzepte für diese Anwendung vorgestellt, wobei sie sich in den verwendeten Systemtypen unterscheiden. Unter großen Temperaturspreizungen wird ein großer Unterschied zwischen Ausgangs- und Zieltemperatur des durch die Wärmepumpe aufzuheizenden Mediums (ohne Phasenübergang des Mediums) verstanden.
  - Transkritische einstufige Wärmepumpe mit Gasbypass, Ejektor oder Expander siehe Heißwassererzeugung.
  - Transkritische kaskadierte Wärmepumpen mit Gasbypass, Ejektor oder Expander, wobei die Wärmepumpenkreisläufe über einen Wärmetauscher miteinander verbunden sind. In diesem Wärmetauscher kondensiert das Kältemittel des unteren Kreislaufes, während das Kältemittel des oberen Kreislaufes verdampft. Die Wärmeabgabe an das Prozessmedium erfolgt im überkritischen Bereich (ohne Phasenwechsel) und die Wärmeaufnahme im unterkritischen Bereich (mit Phasenwechsel).
  - Wärmepumpe basierend auf dem Stirling-Prozess basierend auf dem Stirling-Prozess, wobei hier sowohl bei der Wärmeaufnahme als auch bei der Wärmeabgabe kein Phasenwechsel des Kältemittels auftritt.
  - Wärmepumpe basierend auf dem Joule-Prozess, wobei hier kein Phasenwechsel des Kältemittels bei der Wärmeabgabe und Wärmeaufnahme auftritt.
- **Dampferzeugung:** Es werden drei Wärmepumpenkonzepte vorgestellt, wobei sich diese Konzepte darin unterscheiden, wie der Dampf erzeugt wird.
  - Direkte Dampferzeugung im Kondensator der Wärmepumpe, durch Anwendung eines dafür passenden Wärmetauschertyp (z.B. Plate and Shell Wärmetauscher). Als Systemtyp eignen sich vor allem Wärmepumpen, die im unterkritischen Bereich des Kältemittels arbeiten, da hier bei der Wärmeabgabe auf beiden Seiten des Wärmetauschers ein Phasenwechsel auftritt und somit eine hohe Heizleistung bei konstanter Temperatur übertragen werden kann. Im Allgemeinen ist es auch

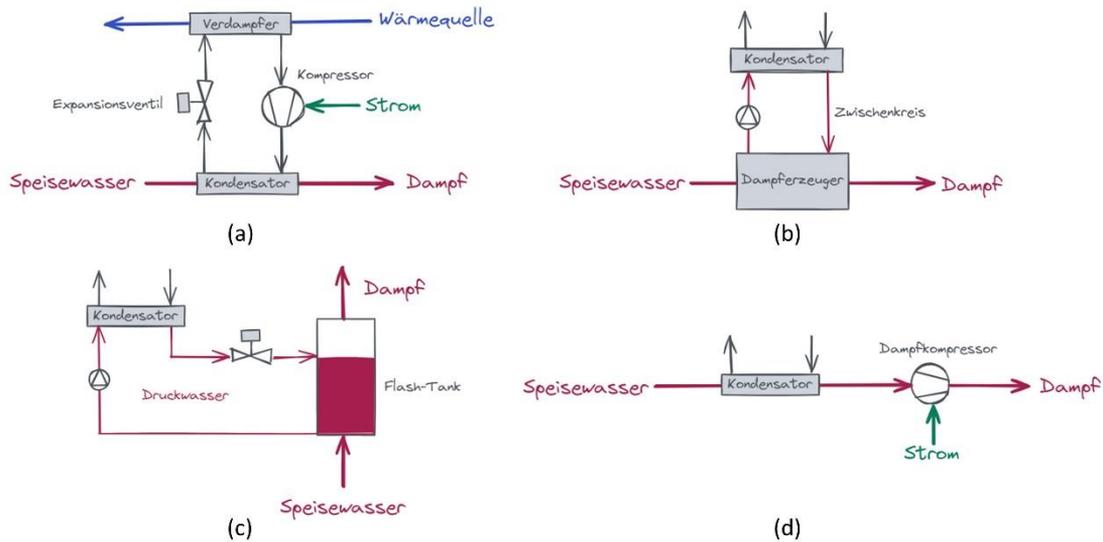
möglich den dampferzeugenden Wärmetauscher über einen Zwischenkreis mit dem Kondensator der Wärmepumpe zu koppeln. In diesem Fall erzeugt die Wärmepumpe Heißwasser.

- Wärmepumpen zur Heißwassererzeugung kombiniert mit einem Flash-Tank zur Dampferzeugung, wobei die Verdampfung durch Entspannung des Heißwasser im Flash-Ventil auftritt. Der Dampf kann dem Flash-Tank entnommen werden, der auch eine flüssige Phase enthält. Das Speisewasser bzw. die flüssige Phase wird dann mittels Pumpe über den Kondensator der Wärmepumpe geführt und somit erhitzt. Hier können klassische, am Markt verfügbare Wärmepumpen zur Heißwassererzeugung eingesetzt werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Ausnutzung von natürlicher Konvektion anstatt der Verwendung einer Pumpe. Hier findet eine Teilverdampfung im Kondensator der Wärmepumpe statt, wobei die Phasentrennung in einer Trommel erfolgt.
- Dampfkompressoren können eingesetzt werden, um den Druck und die Temperatur eines bereits vorliegenden Dampfmassenstroms zu erhöhen. Bei der Kompression wird der Dampf überhitzt, wobei dieser durch Wassereinspritzung wieder auf Sättigungszustand gebracht werden kann. Dampfkompressoren können zum Beispiel auch mit Wärmepumpen zur direkten Dampferzeugung oder mit einem Wärmetauscher, in dem Dampf auf niedrigem Druck- und Temperaturniveau durch die Nutzung von Abwärme erzeugt wird, gekoppelt werden (offenes System).

### **Vergleich der Wärmepumpenkonzepte zur Dampferzeugung**

In Wilk et al. (Wilk et al., 2019b) wurden vier verschiedene Wärmepumpenkonfigurationen zur Erzeugung von 200 kg/h Dampf bei einem Druck zwischen 2 bar<sub>a</sub> und 5 bar<sub>a</sub> mittels Simulationsstudien untersucht. Die vier untersuchten Konzepte werden in Abbildung 7 schematisch dargestellt. Als Kältemittel wurde R1336mzz(Z) gewählt und die Wärmequelle wurde von 85°C auf 80°C abgekühlt. Das erste Wärmepumpenkonzept ist eine geschlossene Wärmepumpe zur direkten Dampferzeugung im Kondensator (Abbildung 7 a). Im zweiten Konzept wird ein Wasser-Zwischenkreis zwischen dem Kondensator der Wärmepumpe und einem dampferzeugenden Wärmeübertrager eingesetzt (Abbildung 7 b). Hier erzeugt die Wärmepumpe Heißwasser. Auch in der dritten Konfiguration wird eine Wärmepumpe zur Heißwassererzeugung eingesetzt, wobei diese mit einem Flash-Tank (1 bar Druckdifferenz über dem Ventil) zur Dampferzeugung kombiniert wird (Abbildung 7 c). In der letzten Konfiguration wird, wie in der ersten Konfiguration eine geschlossene Wärmepumpe zur direkten Dampferzeugung eingesetzt. Hier wird Dampf bei 1,5 bar<sub>a</sub> erzeugt, wobei der Druck und die Temperatur durch den nachgeschalteten Dampfkompressor auf die Zielwerte erhöht werden (Abbildung 7 d). Alle geschlossenen Wärmepumpen beinhalteten einen internen Wärmeübertrager zur Sauggasüberhitzung.

Abbildung 7: Wärmepumpenkonzepte zur Dampferzeugung: (a) Wärmepumpe mit direkte Dampferzeugung im Kondensator, (b) Heißwasserwärmepumpe in Kombination mit dampferzeugendem Wärmetauscher, (c) Heißwasserwärmepumpe in Kombination mit Flash-Tank, (d) Wärmepumpe mit direkter Dampferzeugung im Kondensator in Kombination mit Dampfkompessor (Quelle: AIT Austrian Institute of Technology GmbH)



In Bezug auf den COP zeigen die Untersuchungen, dass die Konfiguration mit Zwischenkreis und Flash-Tank die niedrigsten Werte (rd. 2,3 für die Erzeugung von 4 bar<sub>a</sub>, 144°C Sattedampf) aufweisen. Der höchste COP (rd. 3,2 für die Erzeugung von 4 bar<sub>a</sub> Sattedampf) wurde mit dem Wärmepumpensystem erreicht, welches einen Dampfkompessor enthält. Im Allgemeinen konnten mit allen Wärmepumpensystemen deutliche Einsparungen im Energiebedarf gegenüber der Dampferzeugung mit Erdgasverbrennung erreicht werden. Außerdem wurde die Komplexität der unterschiedlichen Systeme anhand der Anzahl der Hauptkomponenten bewertet. Die geringste Anzahl an Hauptkomponenten wurde für das direkt dampferzeugende Wärmepumpensystem identifiziert. Die restlichen drei Konfigurationen haben die gleiche Anzahl an Hauptkomponenten, wobei davon ausgegangen wird, dass die Konfiguration mit Zwischenkreis weniger komplex als die Konfigurationen mit Flash-Tank und Dampfkompessor.

### Dampfversorgung auf unterschiedlichen Druckniveaus

An einem Produktionsstandort wird oftmals Prozesswärme auf unterschiedlichen Temperaturniveaus benötigt. Sollen diese Prozesswärmebedarfe von Wärmepumpen versorgt werden, ist es im Allgemeinen vorteilhaft nur die Heizleistung auf dem jeweiligen Temperaturniveau bereitzustellen, die auch auf diesem Temperaturniveau benötigt wird. Diese Aussage wird im Folgenden anhand der Dampferzeugung mit Wärmepumpe im Vergleich zur Dampferzeugung mit erdgasbefeuerten Dampfkesseln näher erläutert.

In Abbildung 8 ist die herkömmliche Vorgehensweise bei Dampferzeugung in einem erdgasbefeuerten Dampfkessel dargestellt. Hier wird der Dampf auf dem höchsten Druckniveau erzeugt und anschließend die bei den einzelnen Druckniveaus benötigte Menge entspannt.

Abbildung 8: Erdgasbasierte Dampfversorgung eines Produktionsstandortes (Quelle: AIT Austrian Institute of Technology GmbH, (Zühlsdorf et al., 2024a))

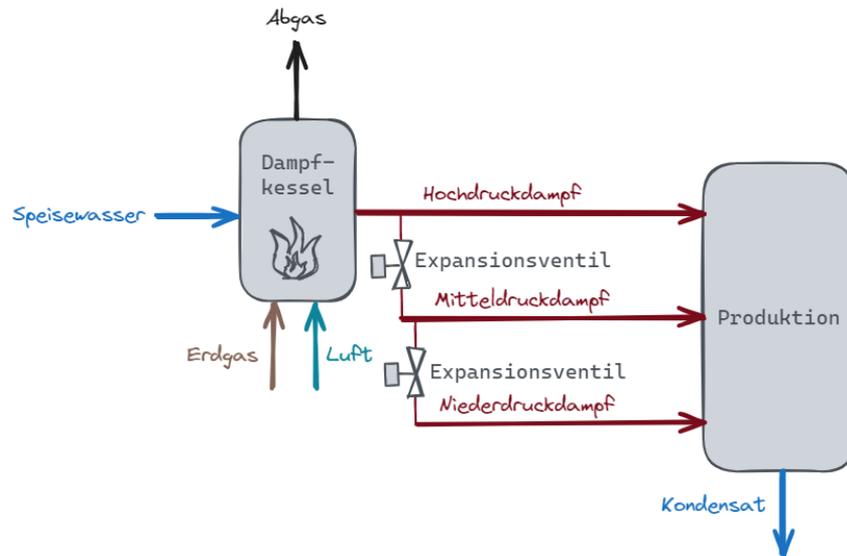
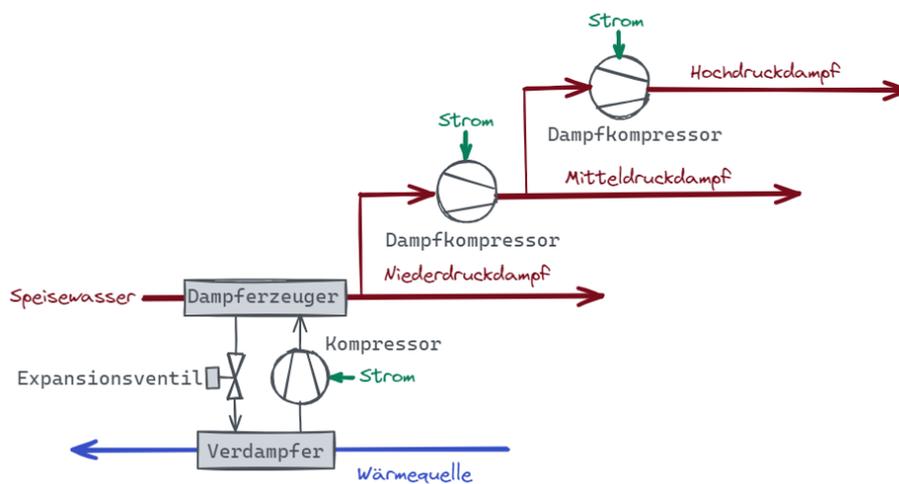


Abbildung 9: Dampferzeugung mit Wärmepumpentechnologie auf unterschiedlichen Druckniveaus (Quelle: AIT Austrian Institute of Technology GmbH, (Zühlsdorf et al., 2024a))

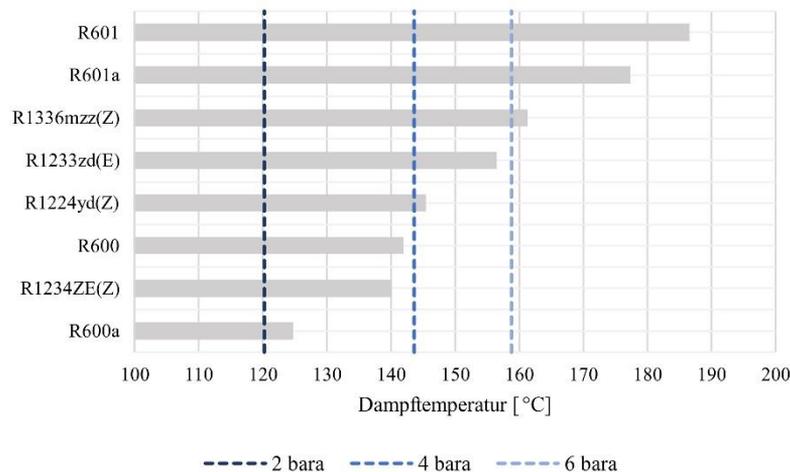


Im Gegensatz dazu ist die Dampferzeugung auf unterschiedlichen Druckniveaus mit Wärmepumpentechnologie in Abbildung 9 dargestellt. Hier erfolgt die Dampferzeugung kaskadisch. Mit einer direkt dampferzeugenden Wärmepumpe wird die gesamt benötigte Dampfmenge auf dem niedrigsten Druckniveau erzeugt. Die auf diesem Druckniveau benötigte Dampfmenge wird abgezweigt und der restliche Massenstrom wird mittels Dampfkompessor auf das nächste benötigte Dampfdruckniveau gebracht. Der Dampfbedarf auf höchstem Druckniveau wird dann durch einen weiteren Dampfkompessor des verbleibenden Massenstroms erzeugt. Es ist darauf hinzuweisen, dass bei dem Einsatz von Dampfkompressoren flüssiges Wasser eingespritzt wird, um annähernd gesättigten Dampf zu erhalten, daher ist der Dampfmassenstrom am Kompressoraustritt höher als am Kompressoreintritt. Diese kaskadische Anordnung der Wärmepumpen steigert die Effizienz des Wärmepumpensystems gegenüber einer alleinigen Erzeugung auf dem höchsten Druckniveau. Je größer der Temperaturhub, umso größer sind die Auswirkungen.

### Einfluss der Kältemittelauswahl

Abbildung 10 zeigt beispielhaft welche Kältemittel für den Einsatz in einer direkt dampferzeugenden Wärmepumpe im subkritischen Betrieb zur Erzeugung von Dampf auf verschiedenen Druckniveaus geeignet sind. Dabei ist darauf zu achten, dass die Kondensationstemperatur des Kältemittels deutlich unterhalb des kritischen Punktes des entsprechenden Kältemittels liegt (Annahme min. 10 K unterhalb der kritischen Temperatur).

Abbildung 10: Geeignete Dampftemperaturen für verschiedene Kältemittel (Annahme: 10 K Mindesttemperaturdifferenz zwischen kritischer Temperatur und Dampftemperatur) (Dusek et al., 2021)



In Dusek et al. (Dusek et al., 2021) wurden die in Abbildung 10 dargestellten Kältemittel für die in Anwendung in einer Wärmepumpe zur direkten Erzeugung von gesättigtem Dampf auf 2 bar<sub>a</sub>, 4 bar<sub>a</sub> und 6 bar<sub>a</sub> bei einer Quelleneintrittstemperatur von 85°C (Abkühlung 5K) untersucht. Dazu wurde ein Modell der HTWP bestehend aus Verdampfer, internen Wärmeübertrager, Kompressor,

Kondensator/Dampferzeuger, Sammler und Expansionsventil, erstellt. Die Ergebnisse der Simulationsstudie wurden in Bezug auf den COP und Fördervolumen des Kompressors verglichen. Für alle drei untersuchten Dampfdrücke weist das Kältemittel R601 den höchsten COP auf. Der COP ist bei der Anwendung von R601 anstatt R600a zur Dampferzeugung von gesättigtem Dampf bei 2 bar<sub>a</sub> um 24% höher ist. Gleichzeitig ist das Fördervolumen für die Anwendung von R601 um 35% höher als bei der Anwendung von R600a.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Auswahl des Kältemittels den COP deutlich steigern kann, wobei es gleichzeitig zu einer deutlichen Steigerung des Fördervolumen kommen kann. Das Fördervolumen beeinflusst die Größe der Wärmepumpe, daher kann es bei einem höheren Fördervolumen auch zu höheren Investitionskosten kommen. Im Gegensatz dazu bewirkt ein höherer COP geringere Betriebskosten.

### **5.2.3 Wirtschaftliche Bewertung**

Bei der wirtschaftlichen Bewertung spielen neben den Investitionskosten (200 – 1200 €/kW, siehe Kapitel 5.1.2) und Wartungskosten die Betriebskosten eine große Rolle. Hier sind die Stromkosten maßgeblich. Aus diesem Grund wurde eine Abschätzung durchgeführt, ob eine Kombination mit PV vorteilig gegenüber einem Strombezug am Spotmarkt ist. Die Nutzung der industriellen Flexibilität zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit wird auch für Industriestandorte immer wichtiger. Eine Strategie zur Nutzung der Flexibilität mit zunehmender Relevanz ist die (teilweise oder vollständige) Teilnahme an Stromspotmärkten, z. B. dem Day-Ahead-Spotmarkt.

Für die folgende Analyse wurde daher angenommen, dass der industrielle Produktionsstandort, an dem die Wärmepumpe betrieben werden soll, an Spotmärkten teilnimmt. Für die Bewertung der Betriebskosten, die für den Zeitraum eines Jahres durchgeführt wird, wurden stündliche, Day-Ahead Spotmarktpreise für einen (historischen) Zeitraum von 12 Monaten angenommen, anstatt einen durchschnittlichen, konstanten Preis während des betrachteten Jahres für den industriellen Stromverbrauch anzunehmen.

Für die Betrachtung wurden aktuelle Daten (Stand Juli 2024) des österreichischen Spotmarkts (Austrian Power Grid AG, 2024), sowie durchschnittliche Abgaben (35 €/MWh) und durchschnittliche Herkunftsnachweise für Grünstrom (10 €/MWh) herangezogen. Die Auswertung erfolgte quartalsweise durch Mittelung des Wertes der betrachteten Stunde über alle Tage des jeweiligen Quartals für Q3/23 bis Q2/24 und wurde mit oberen und unteren Werten für eine aktuelle Abschätzung der Stromgestehungskosten für große PV-Anlagen (>30 kWp) gemäß einer Fraunhofer-Studie (Kost et al., 2024) verglichen, wobei vereinfacht für diese Betrachtung angenommen wurde, dass die PV-Anlage zwischen 6:00 und 19:00 Strom erzeugt.

Abbildung 11: Vergleich zwischen Stromkosten (Spotmarktpreis + Gebühren) und PV-Stromgestehungskosten basierend auf (Austrian Power Grid AG, 2024) und (Kost et al., 2024)

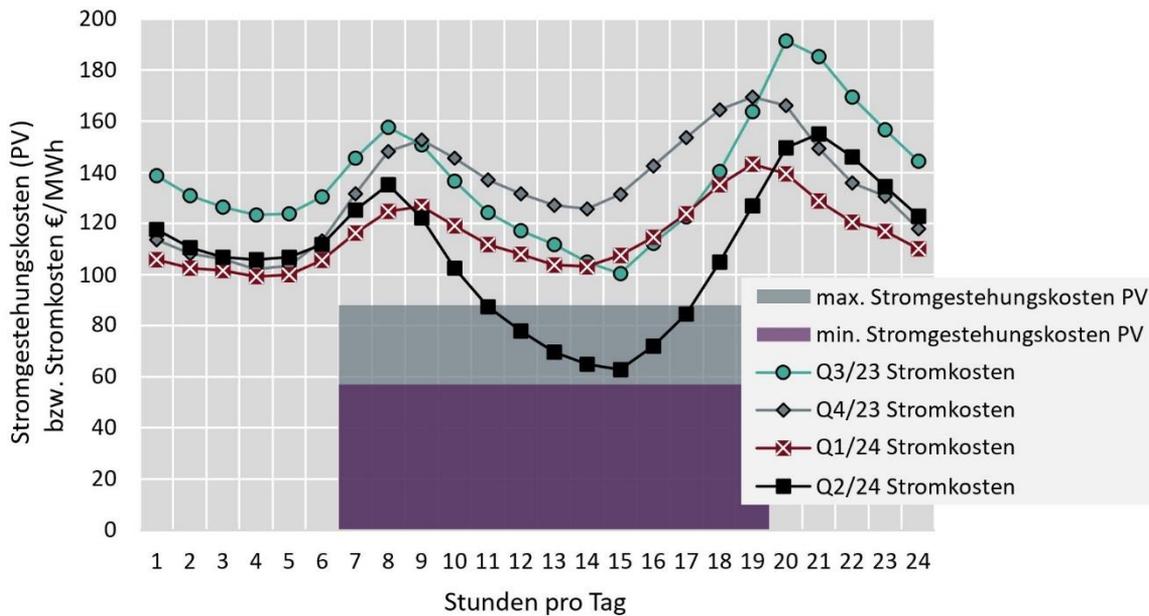
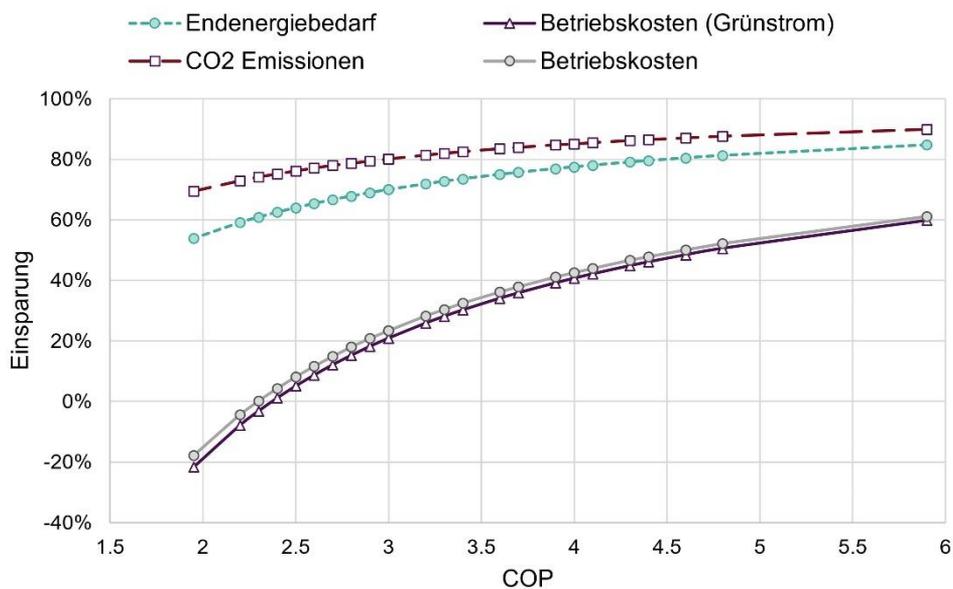


Abbildung 11 zeigt, dass der wirtschaftliche Vorteil der Kombination von Wärmepumpensystem mit PV-Systemen (erwarteter Vorteil niedriger Preise in den Stunden mit hoher PV-Erzeugung) im Vergleich zur Stromversorgung aus dem Netz vom Spotmarkt in jedem Quartal der Analyse (Q3/23-Q2/24) unterschiedlich ist. In den Quartalen Q3/23, Q4/23 und Q1/24 sind die PV-Stromgestehungskosten geringer als die Stromkosten am Spotmarkt. In Q2/24 zeigen sich in Abbildung 11 keine eindeutigen Einsparungen mit der PV-Anlage gegenüber den Stromkosten am Spotmarkt. Ob hier Einsparungen erzielt werden, hängt von den tatsächlichen Stromgestehungskosten ab. Die Unterschiede in den ausgewerteten Stromkosten am Spotmarkt in Abbildung 11 je nach Quartal und Tageszeit sind unter anderem auf einen hohen Anteil von erneuerbaren Energieformen im Stromnetz zurückzuführen.

In Abbildung 12 werden die Einsparungen in Bezug auf Endenergiebedarf, Betriebskosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen in Abhängigkeit vom COP dargestellt. Für die Berechnung des Energiebedarfs der Wärmepumpe wurden unterschiedliche COPs herangezogen (vgl. Abbildung 3) und diese mit der Wärmebereitstellung mittels Erdgasverbrennung mit einem Wirkungsgrad von 90% verglichen und somit die Einsparungen bestimmt. Beide Systeme stellen eine Heizleistung von 1 MW bereit. Damit ergeben sich je nach COP, Endenergieeinsparungen von 54% - 85%. Für die Berechnung der direkten Emissionseinsparungen wurde für Strom ein Emissionsfaktor von 133 g/kWh (Kraftwerkspark Österreich) und für Erdgas 201 g/kWh angenommen (Umweltbundesamt, 2023). Somit ergeben sich CO<sub>2</sub>-Emissionseinsparungen von 69% - 90%. Zur Berechnung der Betriebskosten wurde ein Erdgaspreis von rd. 35 €/MWh (Mittelwert aus Q3/23 – Q2/24 (E-Control, 2024)), wobei auf diesen Preis noch geschätzte Gebühren von 3 €/MWh aufgeschlagen wurden. Weiters wurden CO<sub>2</sub>-Steuern von 45 €/t<sub>CO2</sub> (finanz.at, 2024) berücksichtigt. Für den Strompreis wurde 114 €/MWh

(Mittelwert aus Q3/23 – Q2/24 (Austrian Power Grid AG, 2024), inkl. 35 €/MWh Gebühren) veranschlagt. Für die Betrachtung der Betriebskosten wurde zusätzlich auch die Anwendung von Grünstrom (100% CO<sub>2</sub>-Emissionseinsparung bei Wärmepumpeneinsatz) berücksichtigt, wobei der Strompreis um 10 €/MWh für den Herkunftsnachweis erhöht wurde. Mit den getroffenen Annahmen ergeben sich Betriebskosteneinsparungen bis zu 61% bzw. 60% (Grünstrom). Sinkt der COP unter 2,3 bzw. 2,4 (Grünstrom), können keine Betriebskosteneinsparungen mehr erzielt werden. Die Untersuchung zeigt, dass je nach vorliegendem Temperaturhub bzw. COP hohe Einsparungen erzielt werden können. Da der COP mit steigendem Temperaturhub sinkt, sollte bei der Integration darauf geachtet werden, den Temperaturhub so gering wie möglich zu halten.

Abbildung 12: Einsparungen von CO<sub>2</sub>-Emissionen, Endenergiebedarf und Betriebskosten in Abhängigkeit vom COP einer HTWP im Vergleich zu einem Gaskessel

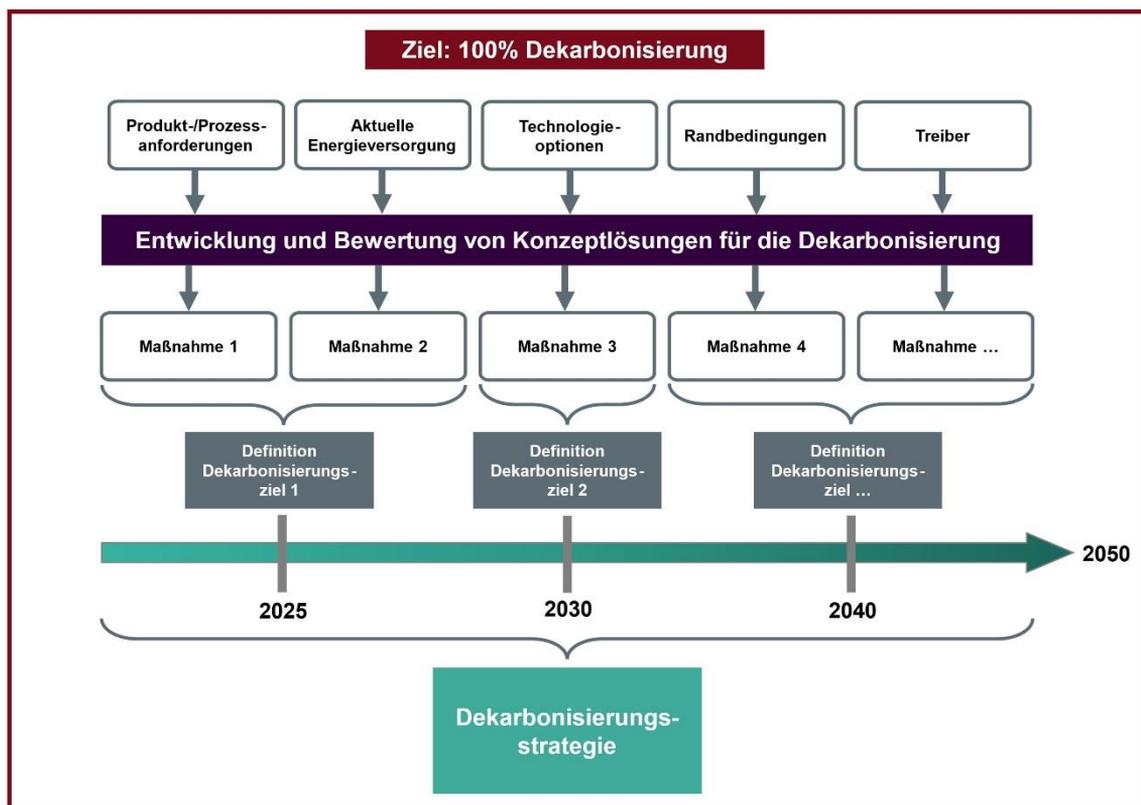


### 5.3 Task 3 – Anwendungen und Transformation

Um die vollständige Dekarbonisierung eines Industriebetriebes zu erreichen sind Dekarbonisierungsstrategien von großer Bedeutung. Es werden unternehmens- und standortspezifische Dekarbonisierungsstrategien, die auf Basis einer ganzheitlichen Betrachtung entwickelt werden, benötigt. Wärmepumpen sind sowohl eine Effizienz- als auch eine Elektrifizierungsmaßnahme und werden daher in vielen Industriebetrieben Teil der Lösung für eine vollständige Dekarbonisierung sein. Die Effizienzsteigerung der Prozesswärmeversorgung und die damit verbundene Senkung des Energieverbrauchs ist wesentlich für die Dekarbonisierung.

Abbildung 13 zeigt in vereinfachter Form den Weg und die benötigten Informationen bei der Entwicklung einer Dekarbonisierungsstrategie, wobei es sich oftmals um einen iterativen Prozess handelt. Die Entwicklung einer Dekarbonisierungsstrategie ist in den meisten Fällen aufwendig und benötigt Wissen über aktuell verfügbare und in der Zukunft verfügbare Technologien. Weiters müssen viele Informationen zum Produktionsstandort und die dort vorhandenen Produktionsprozesse bekannt sein und äußere Bedingungen und Unternehmensziele berücksichtigt werden.

Abbildung 13: Überblick über den Weg zu einer Dekarbonisierungsstrategie (Quelle: AIT Austrian Institute of Technology GmbH, (Zühlsdorf et al., 2024b))



Aus diesem Grund wurde im Zuge von Task 3 des IEA HPT Annex 58 (Zühlsdorf et al., 2024b) ein grafikbasierter Leitfaden (IEA HPT Annex 58, 2024b) erarbeitet, der Industrieunternehmen unterstützen soll, eine Dekarbonisierungsstrategie für die Prozesswärmeversorgung, die zu den „Scope 1“ Emissionen beiträgt, zu entwickeln. Im Leitfaden werden die folgenden vier Hauptfragen behandelt:

- Wie definiert man ein Dekarbonisierungsziel?
- Wie beschreibt man den aktuellen Status/Referenzszenario?
- Wie entwickelt und bewertet man Lösungskonzepte für die Dekarbonisierung?
- Wie kann ein Dekarbonisierungspfad abgeleitet werden?

Im zugehörigen Taskbericht (Zühlsdorf et al., 2024b) werden die einzelnen Themen des Leitfadens noch einmal aufgegriffen und zusätzliche Informationen und genauere Erläuterungen gegeben. Im Folgenden wird ein Überblick über die Inhalte des Leitfadens und dem entsprechenden internationalen Taskbericht gegeben.

### **5.3.1 Wie definiert man ein Dekarbonisierungsziel?**

Die Entwicklung einer Dekarbonisierungsstrategie startet mit der Festlegung eines übergeordneten Ziels bzw. dem Zeitrahmen, in dem dieses Ziel erreicht werden soll. Auf Basis dieses Ziels lassen sich Zwischenziele ableiten, wobei diese während der Strategieentwicklung laufend auf Machbarkeit geprüft und ggf. angepasst werden sollten. Eine Methode, die bei der Definition von Zielen hilfreich sein kann, ist die SMART-Methode. Sie besagt, dass ein Ziel spezifisch, messbar, erreichbar, relevant und terminiert sein sollte.

Die Zieldefinition und der Zeitplan können durch verschiedene Faktoren wie Treiber und Ambitionslevel beeinflusst werden. Beispiele für Treiber sind: Verfügbarkeit alternativer Technologien, rechtliche Anforderungen, finanzielle Vorteile, Verbesserung des Images, Reduzierung der Umweltbelastung und Erfüllung von Kundenerwartungen. Eine gute und klare Definition und Kommunikation der Ziele innerhalb des betreffenden Unternehmens kann die Entwicklung und die Umsetzung einer Dekarbonisierungsstrategie wesentlich beeinflussen.

### **5.3.2 Wie beschreibt man den aktuellen Status/Referenzszenario?**

Um eine Dekarbonisierungsstrategie mit effizienten Lösungskonzepten entwickeln zu können, ist eine gute Datenlage wesentlich. Dazu gehören nicht nur Informationen zur aktuellen Prozesswärmeversorgung, sondern auch Informationen, was die einzelnen Prozesse wirklich benötigen (z.B.: Medium, Temperatur, Druck, Leistung). Außerdem sind die Zusammenhänge zwischen einzelnen Prozessen sowie Randbedingungen wichtige Faktoren bei der Entwicklung von Lösungskonzepten für eine ganzheitliche Dekarbonisierung eines Standortes. Um die Machbarkeit von Wärmerückgewinnungsmaßnahmen, wie Wärmetauscher und Wärmepumpen, in Betracht ziehen zu können, sind auch Informationen zu vorhandenen Abwärmeströmen notwendig. In Tabelle 4 wird eine Checkliste dargestellt, die zeigt, welche Informationen benötigt werden, um die Machbarkeit von Wärmerückgewinnungsmaßnahmen zu prüfen.

Um den Bedarf an Prozesswärme mit den neuen Lösungen auch zu jederzeit sicherstellen zu können, müssen bei der Entwicklung von Lösungskonzepten auftretende Schwankungen im Prozesswärmebedarf, Kühlbedarf und verfügbare Abwärme berücksichtigt werden. Aus diesem Grund sollten die Daten für einen repräsentativen Zeitraum verfügbar sein und analysiert werden. Neben dem aktuellen Status sollte auch die zukünftigen Entwicklungen, wie zum Beispiel Erhöhung der Produktionskapazität und damit einhergehende Erhöhung des Prozesswärmebedarfs oder in

Zukunft nicht mehr verfügbare Abwärmeströme berücksichtigt werden. Weiters ist die Festlegung eines Referenzszenarios für die Bewertung der entwickelten Lösungskonzepte notwendig.

Tabelle 4: Checkliste zur Schaffung einer Informationsbasis für eine Machbarkeitsstudie von Wärmerückgewinnungsmaßnahmen.

| <b>Checkliste</b>  |
|--|
| <p>Besteht ein Kühlbedarf?</p> <p>Was muss gekühlt werden?</p> <p>Welche Temperatur hat das zu kühlende Medium?</p> <p>Was ist die Zieltemperatur?</p> <p>Wie hoch ist die Kälteleistung oder der Massenstrom des zu kühlenden Mediums?</p> <p>Wie verändert sich der Kühlbedarf im Laufe der Zeit?</p> <p>Wie wird die Kühlung derzeit bereitgestellt?</p>  |
| <p>Gibt es ungenutzte Abwärme?</p> <p>Was ist das für ein Medium?</p> <p>Ist es verschmutzt?</p> <p>Wie hoch ist die Temperatur der Abwärme?</p> <p>Auf welche Temperatur kann der Abwärmestrom gekühlt werden?</p> <p>Feuchte Luft: Wie hoch ist die Luftfeuchtigkeit?</p> <p>Wie hoch ist der Massenstrom?</p> <p>Wie verändert sich der Abwärmestrom (Temperatur, Wärmeleistung) im Laufe der Zeit?</p> |
| <p>Besteht ein Heizbedarf?</p> <p>Welches Medium soll beheizt werden?</p> <p>Was ist die Zieltemperatur?</p> <p>Wie hoch ist der erforderliche Massenstrom?</p> <p>Wie verändert sich die Nachfrage (Temperatur, Kapazität) im Laufe der Zeit?</p>   |

Die Datensammlung ist ein oftmals schwieriger und aufwändiger Schritt. Die Informationen sollten so aktuell wie möglich sein und können aus verschiedenen Quellen, wie zum Beispiel Messungen, Prozessleitsystem (PLS) und Datenblättern gesammelt werden. Trotz der Vielzahl an möglichen Quellen sind oftmals nicht alle Informationen vorhanden und die Lücken müssen durch zusätzliche Messungen oder Berechnungen und Annahmen geschlossen werden.

### **5.3.3 Wie entwickelt und bewertet man Lösungskonzepte für die Dekarbonisierung?**

Um Lösungen entwickeln zu können, müssen zuerst die Technologieoptionen bekannt sein. Neben Wärmetauschern, Wärmepumpen und Speichern, die als Effizienzsteigerungsmaßnahmen bezeichnet werden können, können auch Maßnahmen zur Elektrifizierung, wie z.B.: Elektroboiler, für die Dekarbonisierung eingesetzt werden. Elektrisch angetriebene Wärmepumpen fallen sowohl in die Kategorie der Effizienzsteigerungsmaßnahmen als auch Elektrifizierungsmaßnahmen. Der Einsatz von erneuerbaren Gasen und Biomasse können ebenfalls als Maßnahme zur Dekarbonisierung betrachtet werden.

Bei Wärmepumpen und im speziellen HTWP hat die Integrationsebene (Prozess-, Unit-, Versorgungs- und Sektorebene) einen großen Einfluss. Zum Beispiel ist die Effizienz der Wärmepumpentechnologie umso höher, je näher am Prozess diese integriert wird, da hier der zu überwindende Temperaturhub im Allgemeinen am geringsten ist. Das optimale Lösungskonzept ist anwendungs- und standortspezifisch. Für die Entwicklung von Lösungskonzepten stehen mehrere Methoden wie Pinch Analyse, physikalische Modellierung und mathematische Optimierung zur Verfügung.

Die Basis für die Bewertung von Wärmepumpenkonzepten ist der COP. Zur Bestimmung dieses COPs stehen neben der detaillierten physikalischen Modellierung auch vereinfachte Modellierungsansätze zu Verfügung, wie zum Beispiel die Annahme eines Carnot-Gütegrades oder Lorenz-Gütegrades. Diese Ansätze werden in Kapitel 5.3.5 näher erläutert. Für die Bewertung der Lösungskonzepte können eine Vielzahl ökonomische (z.B. Betriebskosten), aber auch nicht-ökonomische (z.B. Platzbedarf) Bewertungskriterien ausgewählt werden, wobei bei der Entwicklung von Lösungskonzepten für die Dekarbonisierung die Emissionseinsparungen ein wesentliches Bewertungskriterium ist. Wichtig ist die für das Unternehmen wesentlichen Bewertungskriterien und ihre Gewichtung festzulegen.

### **5.3.4 Wie kann ein Dekarbonisierungspfad abgeleitet werden?**

Auf der Grundlage der entwickelten Lösungskonzepte kann eine Dekarbonisierungs-Roadmap entwickelt werden, um den Umsetzungsprozess zu unterstützen. Wichtig ist das Team für die Umsetzung der Roadmap zu definieren und auch zu prüfen, ob das notwendige Know-How im Unternehmen verfügbar ist oder von extern eingeholt werden muss. Weiters sollten Teilprojekte festgelegt und ein Zeitplan mit Meilensteinen und Zwischenzielen erstellt werden, um eine Roadmap zu erhalten. Auch hier sind eine Vielzahl an Einflussfaktoren wie z.B. Technologiereifegrad oder Stillstands-Zeiten oder Lieferzeiten zur berücksichtigen. Während der Umsetzung sollten die realisierten Maßnahmen neu bewertet und die Roadmap, wenn notwendig, entsprechend angepasst werden.

### 5.3.5 Modellierungsansatz für die Bewertung von Wärmepumpenkonzepten

Simulationsmodelle können ein wichtiges Werkzeug sein, um technische Systeme wie die Prozesswärmeversorgung mit Wärmepumpen zu analysieren und zu optimieren. Je nach dem Umfang der Analyse stehen verschiedene Modellierungsansätze zur Verfügung. Ein detaillierteres Simulationsmodell erfordert mehr Informationen im Vergleich zu einem eher allgemeinen Simulationsansatz, was die Anpassung eines bestehenden detaillierten Modells an eine neue Anlage erschwert. Um den Einfluss technischer, standortspezifischer Prozesskriterien wie z. B. die erforderlichen Temperaturniveaus zu untersuchen, wird ein vereinfachter Modellierungsansatz diskutiert, der die Übertragbarkeit auf unterschiedliche Betriebsbedingungen ermöglicht. Der Ansatz besteht darin, den gemessenen COP einer HTWP mit dem COP eines idealen Lorenz-Prozesses in Form eines Gütegrades zu beschreiben. Der Lorenz-Prozess wurde gewählt, da dieser eine Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Austritt der Wärmequelle und der Wärmesenke berücksichtigt. Im folgenden Abschnitt wird der Ansatz zur Vorhersage des COP der HTWP bei gegebenen (standortspezifischen) Betriebsbedingungen, auf Basis eines konstanten Gütegrades beschrieben. Dieser Gütegrad wurde anhand von Messdaten bei verschiedenen (nominalen) Betriebsbedingungen einer Anlage im Labormaßstab ermittelt.

Der COP der Anlage wird nach Gleichung 1 bestimmt, als das Verhältnis der von der Wärmepumpe abgegebenen Heizleistung und der benötigten elektrischen Leistung. Die abgegebene Wärme wird anhand des Volumenstroms, der Dichte und der Enthalpiedifferenz zwischen Aus- und Eintritt der Wärmesenke berechnet. Ausgehend von der betreffenden Wärmequelle und Wärmesenke wird der COP des idealen Lorenz-Prozesses nach Gleichung 2, unter Verwendung der mittleren thermodynamischen (also logarithmischen) Temperaturen von Wärmequelle  $T_{lm,Q}$  und Wärmesenke  $T_{lm,S}$  nach Gleichung 3, berechnet. Der Gütegrad, der den COP der Anlage mit dem COP des idealen Lorenz-Prozesses vergleicht, ist mit Gleichung 4 gegeben.

Ein Nachteil dieses Ansatzes ist, dass weitere Annahmen oder Modellierungen erforderlich sind, um die Heizleistung der Anlage vorherzusagen, und dass Betriebsgrenzen nicht berücksichtigt werden.

$$COP = \frac{\dot{Q}}{P_{el}} = \frac{\dot{V}_{S, ein} \cdot \rho_{S, ein} \cdot (h_{S, ein} - h_{S, aus})}{P_{el}} \quad \text{Gleichung 1}$$

$$COP_{Lorenz} = \frac{T_{lm,S}}{T_{lm,S} - T_{lm,Q}} \quad \text{Gleichung 2}$$

$$T_{lm} = \frac{T_{ein} - T_{aus}}{\ln \frac{T_{ein}}{T_{aus}}} \quad \text{Gleichung 3}$$

$$v_{Lorenz} = \frac{COP}{COP_{Lorenz}}$$

Gleichung 4

Bei der untersuchten Anlage handelt es sich um die in Abbildung 14 (links) schematisch dargestellte einstufige R600-HTWP im Labormaßstab, die für den sub- und transkritischen Betrieb geeignet ist (Verdnik und Rieberer, 2022). Die verfügbaren Messdaten decken den Betriebsbereich der Wärmequelleneintrittstemperaturen zwischen 60 und 40°C mit 5 K Spreizung, Senkeneintrittstemperaturen von 80°C und Senkenaustrittstemperaturen zwischen 110 und 160°C ab. Die Heizleistung kann über einen drehzahleregelten Kompressor im Bereich von -30% und +50% der Nennleistung eingestellt werden (50 Hz Nennfrequenz kann im Bereich von 35 bis 75 Hz eingestellt werden). Das Hochdruckniveau der Anlage wird auf das optimale Niveau eingestellt und die entsprechende Sauggasüberhitzung wird in Abhängigkeit von der Wärmequellentemperatur eingestellt.

Abbildung 14: Schematische Darstellung der untersuchten R600 HTHP (links) und ausgewertete Gütegrade (rechts) (Quelle: TU Graz)

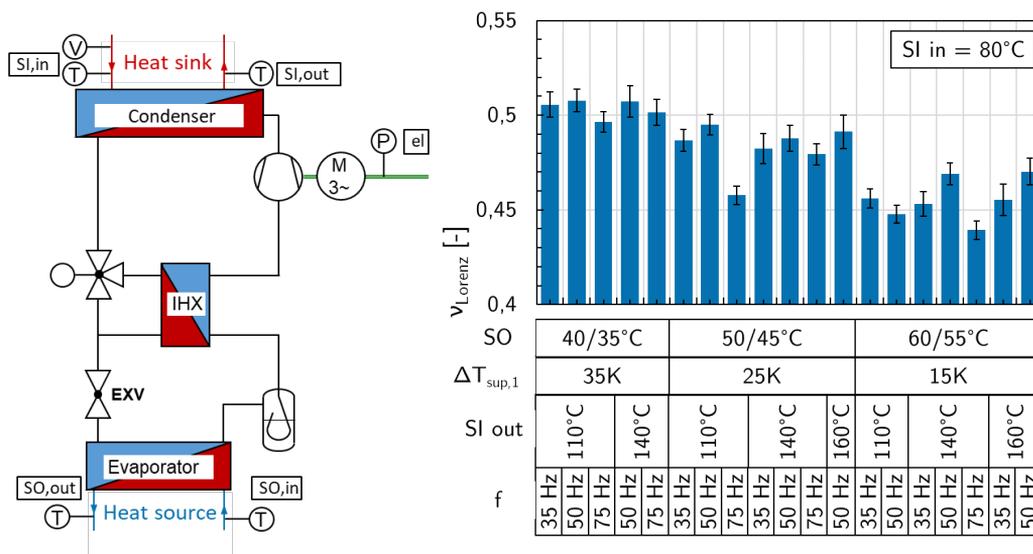


Abbildung 14 (rechts) zeigt den Gütegrad für verschiedene Betriebspunkte und die zugehörige Messunsicherheit. Der erreichte Gütegrad liegt im Bereich zwischen 0,44 und 0,51 für den beobachteten Betriebsbereich. Unter der Annahme eines mittleren Gütegrads von 0,47 und der Anwendung von Gleichung 4 kann der COP der Anlage mit einer Abweichung von 7 % vorhergesagt werden. Wird der höchste beobachtete Gütegrad von 0,51 für alle Betriebspunkte angenommen, so beträgt die maximale Abweichung innerhalb des untersuchten Bereichs 16 %. Diese Ergebnisse zeigen, dass dieser vereinfachte Ansatz zur Vorhersage des COP der Anlage unter verschiedenen Betriebsbedingungen verwendet werden kann. Da der Ansatz jedoch auf Messdaten beruht, hängt

die Übertragbarkeit auf andere Anlagen stark von der Datenverfügbarkeit ab, wobei die Auslegungsdaten für den Nennbetrieb als Ausgangspunkt für erste Schätzungen dienen können.

Der Hauptvorteil dieses Ansatzes ist seine Einfachheit und die Tatsache, dass nur der Parameter Gütegrad benötigt wird. Die Untersuchung komplexer Systeme mit anspruchsvollen Kältekreisläufen, die aus mehreren Stufen oder thermischen Speichern bestehen, erfordert effiziente Simulationsmodelle. Bei mehrstufigen Systemen kann der diskutierte Ansatz auf jede Stufe angewendet werden, wodurch die Komplexität der untersuchten Systeme reduziert wird. Angewandt auf eine zweistufige industrielle Ammoniak-Wärmepumpe, die in einer Molkerei installiert ist, konnte der vorgestellte Ansatz die Arbeitszahl des Systems für 12,5h Betrieb mit einer Abweichung von weniger als 3 % vorhersagen (Verdnik et al., 2023). Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass für die betrachteten Anlagen die Verwendung von vereinfachten Modellannahmen Untersuchungen mit ausreichender Genauigkeit bei reduziertem Rechen- und Modellierungsaufwand ermöglichen kann.

Ein ähnlicher Ansatz besteht darin, den realen COP mit dem COP eines idealen Carnot-Prozesses zu vergleichen. Dieser ideale COP wird gemäß Gleichung 5 berechnet. Im Wesentlichen wird auch der zuvor diskutierte ideale Lorenz-COP anhand eines Carnot-Prozesses berechnet, bei dem jedoch die Temperaturspreizungen der Wärmequelle und -senke über mittlere thermodynamische Temperaturen berücksichtigt werden. Der Carnot-Gütegrad, der den COP der Anlage mit dem COP des idealen Carnot-Prozesses vergleicht, wird mit Gleichung 6 angegeben:

$$COP_{Carnot} = \frac{T_{S,aus}}{T_{S,aus} - T_{Q,aus}} \quad \text{Gleichung 5}$$

$$\nu_{Carnot} = \frac{COP_h}{COP_{Carnot}} \quad \text{Gleichung 6}$$

Im Unterschied zum Lorenz-Prozess berücksichtigt der Carnot-Prozess eine isotherme Wärmeabgabe und -aufnahme. Ob die Modellierung, die von einem konstantem Gütegrad auf der Grundlage eines Carnot- oder eines Lorenz-Prozesses ausgeht, eine bessere Darstellung des tatsächlichen Systems unter verschiedenen Betriebsbedingungen liefert, hängt hauptsächlich von Spreizung auf der Wärmequelle- und Wärmesenkenseite ab.

## 5.4 Task 4 - Definition und Prüfung von Wärmepumpen-Spezifikationen

In Task 4 des IEA HPT Annex 58 wurde unter anderem der Ablauf eines Großwärmepumpenbeschaffungs- und Integrationsprozess beschrieben und ein Überblick über die für HTWP relevantesten Normen für die Auslegung und Prüfung gegeben. Aktuell gibt es noch keine allgemein

anerkannten Normen für die Spezifikation und Prüfung von Leistungsanforderungen für Industriewärmepumpen. Aus diesem Grund wurden im Task 4 des IEA HPT Annex 58 drei Leitfäden (Definition von Wärmepumpenspezifikationen, Laborprüfbedingungen und Prüfung vor Ort) entwickelt. Weiters wurden Beispiele und Erkenntnisse von Industriewärmepumpenprojekte dargestellt. Die Ergebnisse dieses Tasks sind im internationalen Bericht von IEA HPT Annex 58 Task 4 (Poulsen et al., 2024) dargestellt und im Folgenden wird ein Einblick in den Bericht gegeben.

### **5.4.1 Typischer Beschaffungsprozess und Beispiele für industrielle Wärmepumpenprojekte**

Im IEA HPT Task 4 Bericht (Poulsen et al., 2024) wird ein typischer Beschaffungsprozess für industrielle Großwärmepumpenprojekte beschrieben, wobei davon ausgegangen wird das ein Ausschreibungsverfahren durchgeführt wird. Der Beschaffungsprozess kann vier Stufen bzw. Phasen eingeteilt werden: *Idee*, *Konzeption*, *Basisplanung* und *Detailplanung und Umsetzung*. Die erste Phase (*Idee*) umfasst die Idee, eine Wärmepumpe zur Deckung eines Wärmebedarfs einzusetzen. In der Konzeptphase werden die erforderlichen Komponenten des Systems erhoben und eine Systemübersicht erstellt. Außerdem wird in dieser Phase oftmals eine Machbarkeitsstudie durchgeführt. Eine Abschätzung zum Zeitplan, zu Wartungs- und Instandhaltungsintervalle und Lebensdauer, sowie die erwarteten Leistungsdaten ist hier enthalten. In der Basisplanungsphase wird das Wärmepumpensystemdesign weiterentwickelt. Im internationalen Bericht zu IEA HPT Annex 58 Task 4 (Poulsen et al., 2024) ist eine Checkliste enthalten, die Endnutzer:innen dabei helfen soll, schon in einer frühen Projektphase Informationen für erste Herstelleranfragen zusammenzustellen. Die von den Herstellern eingeholten Informationen liefern die Basis für die Weiterentwicklung des Wärmepumpenprojektes. Weiters werden in der Basisplanungsphase die Ausschreibungsunterlagen erstellt. Die Ausschreibungsunterlagen enthalten Informationen zu Wärmequelle, Anforderungen an das System, Unsicherheiten und Einschränkungen und ein Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema sowie das Budget.

Die letzte Phase (*Detailplanung und Umsetzung*) des Beschaffungsprozesses beginnt mit der positiven Investitionsentscheidung und dem Aussenden der Ausschreibungsunterlagen. Diese Phase ist im Allgemeinen deutlich aufwendiger als die drei ersten Phasen. Sie umfasst außerdem die Planung, Lieferung und Integration des Wärmepumpensystems, sowie die Definition der Anforderungen den *Factory Acceptance Test (FAT)* und *Site Acceptance Test (SAT)*. Nähere Informationen zu FAT und SAT sind im internationalen IEA HPT Annex 58 Task 4 Bericht (Poulsen et al., 2024) und in Kapitel 5.4.3 zu finden. Mehr zum Ausschreibungsprozess, wie zum Beispiel typische Bewertungskriterien, sind ebenfalls im internationalen IEA HPT Annex 58 Task 4 Bericht (Poulsen et al., 2024) enthalten.

Weiters werden im internationalen IEA HPT Annex 58 Task 4 Bericht (Poulsen et al., 2024) Beispiele für Wärmepumpenprojekte zur Bereitstellung von Prozesswärme und Fernwärme bei Temperaturen unter 100°C vorgestellt. Drei Projekte behandeln die Fernwärmebereitstellung mittels Wärmepumpe und in zwei Projekten wird Prozesswärme bereitgestellt. Die Beispiele wurden von

der dänischen Energieberatungsfirma Viegand Maagøe geliefert, die Teil des dänischen IEA HPT Annex 58 Teams ist.

## 5.4.2 Normen

Die wichtigsten in Europa vorhandenen Normen, die im Zusammenhang mit der Integration einer Wärmepumpentechnologie stehen, werden im internationalen IEA HPT Annex 58 Task 4 Bericht (Poulsen et al., 2024) aufgelistet, wobei diese in fünf Kategorien eingeteilt werden:

- Allgemeine elektrische Komponenten
- Kabel und Steckverbinder
- Rohrleitungen, Montagesysteme und mechanische Belastungen
- Prüfung, Systemdesign und Messungen
- Brandschutz, elektrischer Schutz und Sicherheit

Die bestehenden Normen, welche die Wärmepumpenkomponente selbst betreffen, wurden im Allgemeinen für Haushaltsanwendungen entwickelt. Im Gegensatz zu Haushaltsanwendungen, bei denen in der Regel Kompressionswärmepumpen verwendet werden, die im unterkritischen Bereich arbeiten, sind für die Industrieanwendung unterschiedliche Wärmepumpentechnologien, wie z. B. Dampfkompressoren oder Wärmepumpen nach dem Stirling-Prinzip, verfügbar. Außerdem können Wärmepumpen in der Industrie nicht nur zur Erzeugung von Heißwasser oder Heißluft, sondern auch zur Erzeugung von Dampf oder zur Erwärmung eines anderen Mediums (Thermoöl) eingesetzt werden.

Im Allgemeinen besteht eine HTWP-Anlage aus mehreren Komponenten, die von unterschiedlichen Normen betroffen sind. Die bestehenden Normen (EN 14511, EN 14825, EN 13771, EN 12900, EN 378, ISO 916) zur Charakterisierung der Leistung von Wärmepumpen wurden im Bericht auf ihre Anwendbarkeit auf HTWP hin diskutiert. Grundsätzlich sind die Normen EN378, EN 12900 und ISO 916 Teil 2 auch für HTWP anwendbar, wobei zum Teil Anpassungen notwendig sind. Die Methoden der Normen EN 14511 und EN 14825 sind im Allgemeinen anwendbar, jedoch müssen die Normen auf den Temperaturbereich von HTWP angepasst werden. Bei EN 13771 kann das Prüfverfahren und die Messunsicherheiten auf HTWP angewendet werden.

Wie auf europäischer Ebene gibt es auch in Österreich keine speziellen Normen für HTWP. Zusätzlich zu den in Europa geltenden Normen gibt es in Österreich die Kältetechnikverordnung aus dem Jahr 1969, die für industrielle und gewerbliche Anwendungen, nicht aber für den Haushaltsbereich gilt. Sie ist zwar noch in Kraft, deckt aber nicht die neuesten Entwicklungen ab. So sind beispielsweise A2L-Kältemittel (ungiftig und schwer entflammbar) nicht abgedeckt, und auch die Entwicklungen bei den Sicherheits- und Leckage-Warnsystemen werden nicht berücksichtigt. Da sie in der aktuellen Fassung nicht für alle Anwendungen einsetzbar ist, ist eine Aktualisierung für Ende 2024 geplant. Weiters gibt der Task 4 Bericht (Poulsen et al., 2024) einen Überblick über die

relevantesten Normen in Japan und stellt fest, dass auch in Japan keine speziellen Normen für HTWP existieren.

### 5.4.3 Factory und Site Acceptance Test (FAT und SAT)

FAT ist die Prüfung eines Systems durch das herstellende Unternehmen vor der Auslieferung an den Kunden. Ziel ist es, zu überprüfen, ob die Kundenanforderungen in Bezug auf Funktion und Leistung erfüllt werden. Ein SAT erfolgt nach dem FAT und wird direkt beim auftraggebenden Unternehmen, nach der Inbetriebnahme durchgeführt. Im IEA HPT Annex 58 Task 4 Bericht (Poulsen et al., 2024) wurden FAT und SAT unter anderem in Bezug auf den Beschaffungsprozess und den Beispielen zu industriellen Wärmepumpenprojekten behandelt. Im Folgenden wird in Tabelle 5 eine kurze Zusammenfassung der Inhalte in Bezug auf die Vor- und Nachteile von FAT und SAT gegeben. Die Anforderungen sind im Allgemeinen für FAT und SAT gleich, jedoch ist ein SAT im Gegensatz zum FAT nicht optional.

Tabelle 5: Vor- und Nachteile von FAT und SAT.

| FAT/SAT    | Vorteile   | Nachteile   |
|------------|--|---|
| <b>FAT</b> | - Eine Art Versicherung für Käufer:innen   | - Zusätzliche Kosten  |
|            | - Stabilere Bedingungen  | - Hoher Aufwand, wenn die Anlage in mehreren Teilen ausgeliefert wird |
|            | - Sammeln von Erfahrungen mit neuen Technologien   | - Kurze Betriebszeit  |
|            | - Prüfung von Betriebspunkten, die vor Ort nur schwer oder gar nicht zu erreichen sind (neue Technologien) | - Hohe Kosten für Laborinfrastruktur                                  |
| <b>SAT</b> | - Reale Betriebs- und Randbedingungen  | - Schwankende Rand- und Umgebungsbedingungen                          |
|            | - Prüfung im Vollausbau  | - Schwierig genaue Betriebsbedingungen zu erreichen                   |
|            |  | - Begrenzter Betriebsbereich  |

Bei der Durchführung von Prüfungen ist das Messequipment und dessen Genauigkeit von entscheidender Bedeutung. Dieses Thema wird auch im Task 4 Bericht (Poulsen et al., 2024) ausführlicher behandelt. Die zulässigen Messabweichungen und Unsicherheiten, die bei der Prüfung vor Ort auftreten können, müssen spätestens vor der Dokumentation eines Prüfergebnisses zwischen auftragnehmenden und auftraggebenden Unternehmen vereinbart werden. Abweichungen können in der Regel sowohl durch die Wärmepumpenanlage als auch durch die Betriebsbedingungen vor Ort verursacht werden. Die ISO 916:2020 und die EN-13711 enthalten beispielsweise Tabellen

für die maximal erlaubten Abweichungen. Es wird empfohlen, wesentliche Messpunkte zu identifizieren und zulässige Abweichungen zu definieren.

#### **5.4.4 Leitfäden**

Im Zuge des IEA HPT Annex 58 Task 4 (Poulsen et al., 2024) wurden drei Leitfäden entwickelt. Weiters wurde auch das Thema der Simulationen zur Bewertung von Wärmepumpen behandelt. Hier wird ein kurzer Einblick in diese Inhalte gegeben.

##### **Leitfaden für die Definition von Wärmepumpen-Spezifikationen**

In diesem Leitfaden werden die Parameter, Leistungsindikatoren, Sicherheits- und Prüfverfahren, die bei der Spezifikation von Großwärmepumpen und insbesondere von HTWP berücksichtigt werden sollten, zusammengefasst und näher erläutert. Ziel des Leitfadens ist es, Endnutzer:innen bei der Erstellung von Ausschreibungsunterlagen und der Auswahl zu unterstützen. Im Vergleich zur Checkliste, die in Kapitel 5.4.1 erwähnt wurde, werden hier einige Punkte nochmals aufgegriffen und näher erläutert.

Ein weiteres Thema, das im Rahmen dieses Leitfadens vorgestellt wird, sind Leistungsdiagramme. Leistungsdiagramme, die in Abstimmung zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer erstellt werden, unterstützen dabei, einen Anhaltspunkt für die Leistung in Off-Design-Punkten zu erhalten. Dabei handelt es sich in der Regel um mehrdimensionale Diagramme, z. B. der COP in Abhängigkeit von den Senken- und Quellentemperaturen. Auch Sicherheitsgrenzen und andere Randbedingungen können in diesen Diagrammen berücksichtigt werden. Zur Erstellung solcher Diagramme ist ein Prüfstand oder ein gut validiertes Simulationsmodell erforderlich. Beispiele für solche Diagramme werden in dem internationalen Taskbericht (Poulsen et al., 2024) gegeben.

##### **Leitfaden für Laborprüfbedingungen von HTWP in großem Maßstab**

Im Zuge des Leitfadens für Laborprüfbedingungen sind die Laborinfrastrukturen von Universitäten und Forschungseinrichtungen angeführt, die an IEA HPT Annex 58 beteiligt sind. In Tabelle 6 wird die Laborinfrastruktur des nationalen Teams für Wärmepumpen im Mittel- und HTWP-Bereich angegeben. Weiters beinhaltet der Leitfaden Erläuterungen zu Laborprüfungen, die für die Charakterisierung einer Wärmepumpe erforderlich sind. Zusätzlich sind auch Empfehlungen für die Messgenauigkeit aus der Norm EN14511:3-2022 angegeben.

Tabelle 6: Beschreibung der Wärmepumpenlaborinfrastruktur des nationalen Teams im Mittel- und HTWP-Bereich (Poulsen et al., 2024).

| Institu-<br>tion | Jahr | Quellentyp | Senkentyp | Senkentemperatur<br>°C | Kapazität<br>kW | Anmerkungen                 |
|------------------|------|------------|-----------|------------------------|-----------------|-----------------------------|
| AIT              | 2000 | Wasser     | Wasser    | 95                     | 100             |                             |
| AIT              | 2000 | Sole       | Wasser    | 95                     | 100             |                             |
| AIT              | 2010 | Luft       | Wasser    | 95                     | 50              | Lufttemperatur<br>von -25°C |
| AIT              | 2000 | Wasser     | Öl        | 250                    | 15              |                             |
| AIT              | 2000 | Sole       | Öl        | 250                    | 15              |                             |
| AIT              | 2010 | Luft       | Öl        | 250                    | 15              | Lufttemperatur<br>von -25°C |
| AIT              | 2025 | Luft       | Wasser    | 95                     | 100             | Lufttemperatur<br>von -25°C |
| TU Graz-<br>IWT  | 2018 | Wasser     | Wasser    | 160                    | 700             |                             |

### Leitfaden für die Prüfung vor Ort von HTWP in großem Maßstab

Der Leitfaden für die Prüfung vor Ort gibt Informationen zur Durchführung und Empfehlungen, welche Werte ermittelt werden sollen (COP, Temperaturen auf der Quellen- und Senkenseite, thermische Kapazität, elektrische Leistung). Die durchzuführenden Messungen sind vom Wärmepumpendesign (z.B. Dampferzeugung oder Heißwassererzeugung) abhängig. Es wird eine Checkliste dargestellt, welche die bei einer SAT durchzuführenden Messungen auflistet. Außerdem sind Empfehlungen für zusätzlich durchzuführende Prüfungen, wie z. B. Geräusch- und Vibrationstests, gegeben. Die Notwendigkeit von Dichtheits- und Druckprüfungen wird hervorgehoben.

### Beispiel für COP-Schwankungen und Unsicherheiten bei der Prüfung vor Ort

Auf Basis der Ergebnisse eines Demonstrationsprojektes (Dryficiency (HORIZON 2020)) wird ein Beispiel für Unsicherheit, sowie COP-Schwankungen bei Prüfungen vor Ort gegeben. Die Anforderung an die Messgenauigkeit der Sensoren kann aus der angestrebten maximalen Unsicherheit in den gewünschten KPIs (z. B. COP) mit Hilfe von Fehlerfortpflanzungsrechnungen bestimmt werden. Eine Methode ist im „Guide to the expression of uncertainty in measurement“ (JCGM, 2020) beschrieben.

### **Verwendung von Simulationen zur Bewertung von Wärmepumpen**

Beim einem FAT von großen industriellen Wärmepumpen kann es zu hohen Kosten kommen. Eine Möglichkeit einen FAT zu ersetzen, kann eine simulationsbasierte Bewertung in Kombination mit einem SAT sein. Die Modellerstellung kann zum Beispiel von einem unabhängigen Dritten durchgeführt werden, wobei zum Beispiel Daten des SAT zur Validierung herangezogen werden können. Das Modell kann neben der Bewertung auch z.B. zur Überwachung, Fehlererkennung und Optimierung eingesetzt werden. Die Vorgehensweise kann beispielsweise in die folgenden Schritte unterteilt werden:

- Ausbau des Simulationsmodells
- Beschaffung von Testdaten zur Validierung
- Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Daten aus den Ausschreibungsunterlagen
- Bewertung auf Basis von Effizienz und/oder Heizleistung

## **5.5 Erkenntnisse für Österreich**

Die Arbeiten im IEA HPT Annex 58 haben gezeigt, dass schon mindestens 39 HTWP-Technologien (Stand Mai 2024) am Markt verfügbar sind oder sich in der Entwicklung befinden. Auch zwei österreichische Hersteller haben Produkte, die im HTWP-Bereich eingesetzt werden können. Weiters wurden 16 Demonstrationsprojektbeschreibungen (Stand Mai 2024) veröffentlicht. Es ist davon auszugehen, dass in den nächsten Jahren noch mehr Demonstrationsprojekte realisiert werden. Diese Projekte, sowie die Verbreitung der Erfahrungen sind wichtig, um die Technologie in der Industrie zu etablieren. Weiters hat sich gezeigt, dass es noch keine spezifischen Normen für HTWP, weder auf europäischer noch auf österreichischer Ebene gibt.

## **5.6 Publikationen**

- B. Zühlsdorf, et al., **IEA HPT Annex 58 High-Temperature Heat Pumps Task 1 – Technologies. Task Report**, Heat Pump Centre (Hrsg.), 2023, online available. <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2023/09/annex-58-task-1-technologies-task-report.pdf>.  
**Synopsis:** Der Bericht beinhaltet unter anderem eine Einführung in das Thema HTWP, einen Überblick über HTWP-Technologien, nationale HTWP-Märkte und Technologieperspektiven.
- B. Zühlsdorf, et al., **IEA HPT Annex 58 High-Temperature Heat Pumps Task 2 – Integration Concepts. Task Report**, Heat Pump Centre (Hrsg.), 2024, <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2024/06/task2report.pdf>.  
**Synopsis:** Der Bericht enthält unter anderem Beschreibungen von Integrationskonzepten für ausgewählte Industrieprozesse, Wärmepumpenkonzepte für typische Anwendungen und Empfehlungen für die Konzeptauswahl.

- B. Zühlsdorf, et al., **IEA HPT Annex 58 High-Temperature Heat Pumps Task 3 – Applications and Transition. Task Report**, Heat Pump Centre (Hrsg.), 2024, <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2024/04/annex58task3report.pdf>.

**Synopsis:** Der Bericht behandelt das Thema „Entwicklung von Dekarbonisierungsstrategien“. Dazu werden z.B. die Themen Beschreibung des Ausgangszustandes, Entwicklung und Bewertung von Lösungskonzepten adressiert.
- J. L. Poulsen, et al., **IEA HPT Annex 58 High-Temperature Heat Pumps Task 4 - Definition and Testing of Heat Pump Specifications. Recommendations for defining and testing of specifications for HTHPs in commercial projects and Transition**, Heat Pump Centre (Hrsg.), 2024, <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2024/04/annex-58-task-4-report-definition-and-testing-of-hp-1.pdf>

**Synopsis:** Der Bericht beinhaltet die Beschreibung eines Beschaffungsprozesses für Großwärmepumpen, Leitfäden und Empfehlungen für die Festlegung von Spezifikationen und Leistung, sowie Prüfung der Leistung.
- M. Verdnik, R. Rieberer, **TransCrit: R600 high-temperature heat pump in sub- and trans-critical operation**, In: B. Zühlsdorf, M. Bantle, B. Elmegaard (Hrsg). 3rd High-Temperature Heat Pump Symposium 2022: Book of Presentations. Technical University of Denmark, 2022, [https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/278579856/hthp\\_symposium\\_2022\\_book\\_of\\_presentations.pdf](https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/278579856/hthp_symposium_2022_book_of_presentations.pdf).

**Synopsis:** Dieser Beitrag fasst die wesentlichen Ergebnisse des Projektes TransCrit (FFG-Nr.: 86583) wie Kreislaufdesign und Ergebnisse der experimentellen und simulationsgestützten Untersuchung zusammen.
- S. Dusek, V. Wilk, R. Rieberer, M. Verdnik, **Description of the Austrian Team for Annex 58**, 2022, <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/03/description-of-austrian-team-for-annex-58.pdf>.

**Synopsis:** In diesem Dokument wird das österreichische Team des IEA HPT Annex 58 bestehend aus AIT Austrian Institute of Technology GmbH und TU Graz-Institut für Wärmetechnik vorgestellt.
- S. Dusek, V. Wilk, R. Rieberer, M. Verdnik, **Austrian Team Presentation**, 2023, <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2023/09/austriaannex58meetingaarhusteamvorstellungfinal.pdf>.

**Synopsis:** In dem Vortrag wird das österreichische Team, sowie die österreichische HTWP-Industrie, das österreichische Anwendungspotential und ausgewählte Forschungsprojekte vorgestellt.
- S. Dusek, B. Zühlsdorf, V. Wilk, B. Fibi, V. Amato, J. L. Poulsen, M. Verdnik, R. Rieberer, S. Knöttner, F. Schlosser, S. Benkert, **IEA HPT Annex 58 Task 3 - Applications – Strategies for the conversion to HTHP-based process heat supply**, In: B. Zühlsdorf, P. Nekså, B. Elmegaard (Hrsg.). 4th High-temperature Heat Pump Symposium 2024: Book of Presentations. DTU Mechanical Engineering, 2024, <https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/366495249/hthp-symposium-2024-book-of-presentations.pdf>.

**Synopsis:** Der Beitrag liefert einen Einblick in den „Leitfaden für die Entwicklung einer Dekarbonisierungsstrategie“ der im Zuge des IEA HPT Annex 58 Task 3 erarbeitet wurde.

- S. Dusek, V. Wilk, M. Verdnik, R. Rieberer, B. Zühlsdorf, **Reduktion des Energiebedarfs durch den Einsatz von Hochtemperaturwärmepumpen in Industrieprozessen**, 18. Symposium Energieinnovation 2024, 14.-16.02.2024, Graz/Österreich, 2024, [https://www.tugraz.at/fileadmin/user\\_upload/tugrazExternal/f560810f-089d-42d8-ae6d-8e82a8454ca9/files/lf/Session\\_F4/LF\\_Dusek\\_NEU.pdf](https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/tugrazExternal/f560810f-089d-42d8-ae6d-8e82a8454ca9/files/lf/Session_F4/LF_Dusek_NEU.pdf).

**Synopsis:** Der Vortrag beinhaltet Anwendungsbeispiele, einen Marktüberblick und Entwicklungsperspektiven für HTWP-Technologien. Die Inhalte wurden im Zuge des IEA HPT Annex 58 erarbeitet.

- IEA HPT Annex 58 High-Temperature Heat Pumps: Task 3 Applications and Transition – Strategies for the conversion to HTHP-based process heat supply, **Guideline for the development of a decarbonization strategy**, Heat Pump Centre (Hrsg.), 2024, <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2024/04/27032024guidelinefinal.pdf>.

**Synopsis:** Der Leitfaden soll die Industrie bei der Entwicklung einer Dekarbonisierungsstrategie unterstützen. Die Hauptthemen sind: Zielsetzung, Analyse aktueller Status, Konzeptentwicklung, Strategieumsetzung.

- S. Dusek, **IEA HPT Annex 58 Task 3 – Applications and transition towards heat pump-based process heating. Guideline for decarbonizing industrial process heating**, IEA HPT Annex 58 High-Temperature Heat Pumps Final Webinar, 23.04.2024, online, <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2024/04/finalwebinarannex58.pdf>.

**Synopsis:** In dem Vortrag wird das Hauptergebnis des IEA HPT Annex 58 Task 3, ein Leitfaden zur Unterstützung von Industriestandorten bei der Entwicklung von Dekarbonisierungsstrategien, vorgestellt.

# 6 Vernetzung und Ergebnistransfer

Zielgruppe für das Projekt und dessen Ergebnisse sind HTWP produzierende (inkl. Komponenten) und integrierende Unternehmen, Endnutzer:innen (inkl. Planer:innen und Berater:innen), politische Entscheidungsträger:innen, Studierende und Normungsgremien.

## 6.1 Vernetzung und Verbreitung der Ergebnisse

Viele der durchgeführten Maßnahmen zur Vernetzung und Ergebniskommunikation hatten das Ziel, mehrere der genannten Zielgruppen gleichzeitig anzusprechen. Die Veröffentlichung der Ergebnisse in Form von Taskberichten, Technologiebeschreibungen, Demonstrationsprojektbeschreibungen, Teambeschreibungen und Präsentationen auf der IEA HPT Annex 58 Homepage konnte als eine wesentliche Maßnahme identifiziert werden. Das nationale Team hat die Verfügbarkeit der Ergebnisse bzw. Ergebnisse selbst im Zuge von diversen themenverwandten Vorträgen und Gesprächen mit Industrieunternehmen und wärmepumpenproduzierenden Unternehmen miteinander verbunden und verbreitet. Als Beispiel ist hier ein Vortrag von G. Drexler-Schmid DECA - 3. Österreichischer Energieeffizienzkongress<sup>6</sup> zu nennen oder ein Vortrag von S. Dusek bei den WRS Energy Days<sup>7</sup>. Mit rd. 9600 Besuchern und rd. 5500 Downloads auf der IEA HPT Annex 58 Homepage im Zeitraum 04/2024 - 06/2024 zeigt sich das große Interesse an dem Projekt und dessen Ergebnisse.

Darüber hinaus wurde das Projekt auf den Webseiten des nationalen Projektteams vorgestellt und ein Vortrag von S. Dusek et al. auf der 18. Symposium Energieinnovation 2024<sup>8</sup> gehalten. An dieser Veranstaltung nehmen im Allgemeinen Vertreter:innen aus vielen der oben genannten Zielgruppen teil. Eine weitere Maßnahme, die verschiedene Zielgruppen anspricht, war der NEFI Technology Talk „Industrielle Abwärmenutzung mit Hochtemperaturwärmepumpen“. Dieser Technology Talk wurde von der nationalen Projektleitung in Zusammenarbeit mit dem Innovationsnetzwerk NEFI<sup>9</sup> organisiert und in Kooperation mit dem international IEA HPT Annex 58 und NEFI online durchgeführt. Rund 90 Personen haben an diesem Event teilgenommen. Ein Event, das eine hohe

---

<sup>6</sup> G. Drexler-Schmid, Energieeffizienz und Dekarbonisierung - Was können wir heute tun?, DECA - 3. Österreichischer Energieeffizienzkongress, 5.10.2022.

<sup>7</sup> S. Dusek, Anwendung von Hochtemperaturwärmepumpen zur industriellen Prozesswärmeversorgung, WRS Energy Days, 13.09.2022.

<sup>8</sup> S. Dusek, V. Wilk, M. Verdnik, R. Rieberer, B. Zühlsdorf, Reduktion des Energiebedarfs durch den Einsatz von Hochtemperaturwärmepumpen in Industrieprozessen, 18. Symposium Energieinnovation 2024, 14.-16.02.2024.

<sup>9</sup> NEFI – New Energy for Industry, <https://www.nefi.at/de/>

Reichweite auf internationaler Ebene (über 230 Teilnehmer) gezeigt hat, war das Final Webinar des IEA HPT Annex 58. Hier hat unter anderem S. Dusek die Ergebnisse aus Task 3 vorgestellt<sup>10</sup>.

Österreichische Unternehmen, die HTWP herstellen, wurden durch Anfragen zum Ausfüllen von Beschreibungen ihre Technologien auf das Annex Projekt aufmerksam gemacht. Dadurch wurde ihnen auch die Möglichkeit geboten, direkt in das Projekt eingebunden zu sein, da die zur Verfügung gestellten Beschreibungen auf der IEA HPT Annex 58 Webseite (IEA HPT Annex 58, 2024a) veröffentlicht wurden. Weiters hat A. Längauer von ecop Technologies GmbH einen Vortrag im Zuge einer Deep Dive Session gehalten<sup>11</sup>.

Die Vernetzung und der Ergebnistransfer in der Wärmepumpenbranche wurde außerdem durch Vorträge des nationalen Teams beim High Temperature Heat Pump Symposium 2022 und 2024 unterstützt. Hier wurde unter anderem die nationale Forschung und deren Lösungen bzw. deren Beitrag im IEA HPT Annex 58 Projekt innerhalb der Branche verbreitet. Die Teilnahme an der Annex 58 Session im Rahmen des IIR International Congress of Refrigeration 2023 in Paris und Teilnahme und Unterstützung beim Workshop auf der IEA Heat Pump Conference 2023 in Chicago konnte die Sichtbarkeit des nationalen Projektteams sowie die Vernetzung in der internationalen Branche erhöhen. Um die Aufmerksamkeit des Projekts und dessen Ergebnisse in der nationalen Wärmepumpenbranche auch nach der Laufzeit weiter zu erhöhen, ist ein Newsletter der Wärmepumpe Austria in Planung.

Um Studierende und junger Forscher:innen anzusprechen, wurden neben den Vorträgen auf Konferenzen, Inhalte aus dem Projekt in die Vorlesung „Kältetechnik und Wärmepumpen“ der TU Wien und in die Vorlesung „Wärmepumpentechnik“ an der TU Graz eingebunden. Somit bekommen Studierende Einblick in aktuelle Forschungsthemen, den Entwicklungsstatus der Technologien und deren Perspektiven im Hochtemperatur-Wärmepumpenbereich.

Durch einen vom nationalen Team organisiertem Vortrag des IEA HPT Annex 59 Heat Pumps for Drying in einem internationalen IEA HPT Annex 58 Meeting und der Präsentation von Inhalten des aus dem IEA HPT Annex 58 in einem Meeting des IEA IETS Task 15 Subtask 4 Industrial Excess Heat Recovery konnte die Vernetzung auch zwischen IEA Annex Projekten bzw. Tasks unterstützt werden.

---

<sup>10</sup> S. Dusek, IEA HPT Annex 58 Task 3 – Applications and transition towards heat pump-based process heating. Guideline for decarbonizing industrial process heating, IEA HPT Annex 58 High-Temperature Heat Pumps Final Webinar, 23.04.2024.

<sup>11</sup> A. Längauer, Function, design and possible applications of a Rotation Heat Pump at high temperatures, Andreas Längauer, IEA HPT Annex 58 Deep Dive Session 08.07.2021.

## 6.2 Relevanz und Nutzen

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass die Ergebnisse einen Nutzen für viele Zielgruppen haben. Es wurde unter anderem eine umfassende Datenbank zu am Markt oder in der Entwicklung befindlichen HTWP-Technologien, sowie Demonstrationsprojekten geschaffen, die auf der Annex 58 Homepage (IEA HPT Annex 58, 2024a) abgerufen werden kann. Diese Datenbank ist auf großes Interesse gestoßen. Sie gibt einen umfassenden Überblick über den aktuellen Status und die Verfügbarkeit der Technologie. Daher soll diese Datenbank so aktuell wie möglich gehalten werden.

Für die Zielgruppe der Endanwender:innen sind die Ergebnisse von hoher Relevanz und Nutzen. Zum Beispiel zeigen der Technologieüberblick, dass sich bereits einige Produkte im Hochtemperatur-Wärmepumpenbereich am Markt oder in der Entwicklung befinden. Die Ergebnisse zur Entwicklung von Dekarbonisierungsstrategien und zum Beschaffungsprozess haben für diese Zielgruppe ebenfalls einen großen Nutzen. Außerdem zeigen die Demonstrationsprojektbeschreibungen, Integrations- und Wärmepumpenkonzeptbeschreibungen die Anwendungsmöglichkeiten im industriellen Umfeld auf. Dies ist nicht nur für Endnutzer:innen, sondern auch für die Wärmepumpenbranche von hoher Relevanz.

Weiters sind die Ergebnisse für die österreichische Wärmepumpenbranche von Relevanz, da sie einen Vergleich und eine Einordnung der österreichischen Produkte und ihren Entwicklungsstatus gegenüber Lösungen aus anderen Ländern erlauben.

Im Bereich der Normen sind noch keine spezifischen Dokumente für den HTWP-Bereich auf nationaler und internationaler Ebene verfügbar. Dennoch sind einige Normen und Richtlinien verfügbar, die im Allgemeinen angewendet werden können und für Hochtemperaturwärmepumpen angepasst werden können.

# 7 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen

## Schlussfolgerungen

Der Technologieüberblick zeigt, dass sich bereits einige HTWP-Technologien auf unterschiedlichen TRL verfügbar sind. Es wurden 39 Technologiebeschreibungen publiziert. Im Vergleich dazu konnten nur 16 Demonstrationsprojektbeschreibungen gesammelt werden (Stand Mai 2024). Dies zeigt, dass deutlich mehr Demonstrationsprojekte in den nächsten Jahren durchgeführt werden sollten, um die Technologie weiterentwickeln und im Industriebereich verbreiten zu können. Die erarbeiteten Entwicklungsperspektiven von HTWP-Technologien zeigen, dass die Expert:innen des IEA Annex 58 Projektes davon ausgehen, dass sich die Technologie bis 2030 als bevorzugte Technologie im Bereich 100 -200°C etablieren wird. Auch in Österreich gibt es ein hohes Potential für die Technologie im Industriesektor zur Bereitstellung von Prozesswärme <200°C.

Anlagenbauunternehmen können die Verbreitung von HTWP stark beeinflussen, da hier Wärmepumpen direkt in Kombination mit der Prozessanlage ausgeführt werden können. Weitere Einflussfaktoren bei der Verbreitung der HTWP-Technologie im industriellen Umfeld ist die Bereitschaft der Endnutzer:innen auf die neuartige Technologie umzustellen, was stark von den wirtschaftlichen Randbedingungen abhängt. Um das volle Potential der Technologie ausschöpfen zu können, ist auch ein Umdenken in Bezug auf den Betrieb und die Auslegung der Prozesswärmeversorgung notwendig. Informationen für Endnutzer:innen zu Verfügbarkeit, Technologie, Entwicklungsperspektiven und Vorteilen von HTWP unterstützen die Verbreitung der Technologie. Gleichzeitig werden die wärmepumpenproduzierenden Unternehmen die Entwicklung und den Ausbau der Produktionskapazität vor allem dann vorantreiben, wenn ausreichend Endnutzer:innen Interesse zeigen. Um eine erfolgreiche Verbreitung der Technologie zu erreichen, ist die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Stakeholdern wertvoll, um Unsicherheiten zu verringern und Hindernisse zu überwinden.

Bei HTWP gibt es eine breite Vielfalt an technischen Lösungen und gleichzeitig eine Vielzahl an unterschiedlichen Industrieprozessen mit spezifischen Anforderungen. Auf Grund dieser Vielfalt ist es schwierig, allgemein anwendbare Integrationskonzepte zu definieren. Es wurden insgesamt Integrationskonzepte für 12 verschiedene Industrieprozesse und Wärmepumpenkonzepte für drei allgemeine Anwendungen (Heißwassererzeugung, Dampferzeugung und Anwendungen mit großen Temperaturspreizungen) beschrieben. Zum Beispiel treten bei Trocknungsprozessen oftmals hohe Temperaturspreizungen auf der Senkenseite auf und können somit dem entsprechenden allgemeinen Anwendungsfall zugeordnet werden. Weiters wurden die fünf wichtigsten thermischen Prozesse für eine HTWP-Anwendung definiert: Trocknung, Warmwasserbereitung, thermische Trennung, thermische Konservierung und thermische Behandlung. Trotz der Komplexität und

Verschiedenartigkeit von Industrieprozessen sollte weiter daran gearbeitet werden, allgemein anwendbare Integrationskonzepte zu entwickeln, um die Technologieverbreitung zu beschleunigen.

Außerdem wird die HTWP-Technologie in vielen Dekarbonisierungsstrategien eine wesentliche Maßnahme sein. Die Entwicklung einer solchen Strategie ist oftmals komplex, da viele Faktoren berücksichtigt werden müssen. Wesentlich für die Entwicklung ist eine gute Informations- und Datenbasis. Eine sorgfältig und gut kommunizierte Dekarbonisierungsstrategie ist wesentlich für die vollständige, energieeffiziente und rasche Dekarbonisierung eines Industriestandortes.

Die Arbeiten im Annex Projekt haben gezeigt, dass weder in Österreich noch in Europa, HTWP spezifische Normen existieren. Jedoch könnten einige Normen für die Anwendung auf HTWP angepasst werden.

### **Weiterführende nationale Forschungsprojekte und IEA Kooperationsprojekt**

Seit Beginn des IEA HPT Annex 58 Projekts (01/2021) wurden einige themenverwandte nationale Forschungsprojekte gestartet:

- **NEFI-AHEAD** (FFG, Laufzeit: 12/22-11/25): Optimale Integration und Betrieb einer n-Butan HTWP mit Dampfkompessor zur Bereitstellung von Satttdampf (11 bara, 184 °C) in einem Arzneimittelproduktionsstandort von Takeda (<https://www.nefi.at/de/projekt/ahead>).
- **ETHP** (FFG, Laufzeit: 01/22-12/24): Entwicklung eines Ejektors zur Effizienzsteigerung von Industriewärmepumpen (<https://projekte.ffg.at/projekt/4174819>).
- **CONAN** (FFG, Laufzeit: 02/24-02/27): Entwicklung eines verbesserten Regelungssystems einer Rotationswärmepumpe (<https://projekte.ffg.at/projekt/4875794>).
- **VLESH** (FFG, Laufzeit: 10/24-09/2025): Untersuchung der Machbarkeit von Ejektoren für schwankenden Einsatzbedingungen (<https://projekte.ffg.at/projekt/5125992>).

Neben den laufenden nationalen Forschungsprojekten soll ein IEA HPT Annex Nachfolgeprojekt zum Thema „Industrielle Hochtemperaturwärmepumpen“ im Jahr 2025 gestartet werden. Dieses Projekt zielt darauf ab, die im IEA HPT Annex 58 begonnenen Tätigkeiten zur Reduktion von Informationsdefiziten weiterzuführen. Weiters soll eine Grundlage für die Entwicklung von Sektorlösungen geschaffen, Schulungsunterlagen erarbeitet und publiziert werden.

### **Empfehlungen für die österreichische FTI-Politik**

Die Wärmepumpe und im speziellen die HTWP ist eine wichtige Technologie für die Dekarbonisierung der industriellen Prozesswärmeversorgung in Österreich. Es gibt eine Vielzahl an Produktionsstandorten, die sich für die Integration der Technologie eignen, jedoch wurde die Technologie erst vereinzelt demonstriert und es befinden sich erst vereinzelt Demonstratoren in Planung. Trotz des zunehmenden Interesses an der Technologie gibt es noch einige Barrieren, welche die Verbreitung der Technologie erschweren. Als solche Barrieren können zum Beispiel geforderte kurze Amortisationszeiten (Wirtschaftlichkeit), Informationsdefizite, und

mangelndes Vertrauen in die Technologie genannt werden. Um diese Barrieren zu reduzieren bzw. die Verbreitung der Technologie voranzutreiben, kann FTI-Politik daher die folgenden Punkte mittels Forschungs- und Demonstrationsprojekte unterstützen:

- Investitions- und Betriebskostenförderung für Demonstratoren in unterschiedlichen Leistungs- und Temperaturbereichen in verschiedensten Prozessen und Industriebranchen (z.B. im Rahmen des Programms Transformation der Industrie)
- Förderung von Komponenten- und Systemdesignentwicklungen
- Entwicklung von Standardlösungen für Sektoren und Prozesse mit ähnlichen Anforderungen und Randbedingungen.
- Erarbeitung und Verbreitung von Informations- und Schulungsmaterialien für unterschiedliche Interessensgruppen.
- Weiterbildungsveranstaltungen für die Wissensverbreitung in verschiedenen Interessensgruppen und zur Ausbildung für die Integration und den Betrieb von HTWP benötigten Personal.

Diese Maßnahmen sind wesentlich, um Vertrauen in die Technologie zu schaffen und damit eine rasche Ausrollung der Technologie im industriellen Umfeld zu etablieren.

## Tabellenverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Tabelle 1: Übersicht über die Tasks des internationalen Projekts und deren Inhalte .....   | 15 |
| Tabelle 2: Ziele des nationalen Projektes und Einbettung in das internationale Projekt .....   | 16 |
| Tabelle 3: Übersicht über die Tasks und deren Inhalte.....   | 19 |
| Tabelle 4: Checkliste zur Schaffung einer Informationsbasis für eine Machbarkeitsstudie von Wärmerückgewinnungsmaßnahmen.....            | 46 |
| Tabelle 5: Vor- und Nachteile von FAT und SAT.....   | 53 |
| Tabelle 6: Beschreibung der Wärmepumpenlaborinfrastruktur des nationalen Teams im Mittel- und HTWP-Bereich (Poulsen et al., 2024). ..... | 55 |

## Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 1: Einstufiger Wärmepumpenkreislauf mit internem Wärmetauscher (Quelle: AIT Austrian Institute of Technology GmbH, (Zühlsdorf et al., 2023)) .....  | 23 |
| Abbildung 2: Maximale Versorgungstemperatur und mittlerer Versorgungsleistung für die HTWP-Technologien verschiedener Unternehmen. Der Heizleistungsbereich der einzelnen Technologien werden durch die schwarzen Balken dargestellt. (Quelle: Danish Technological Institute, (Zühlsdorf et al., 2023)) .....  | 25 |
| Abbildung 3: COP ausgewählter HTWP-Technologien in Abhängigkeit vom Temperaturhub basierend auf (IEA HPT Annex 58, 2024a). (Dusek et al., 2024).....  | 26 |
| Abbildung 4: Jährliche Anzahl der in Betrieb befindlichen industriellen Wärmepumpen in Österreich inklusive Zukunftsszenarien bis 2030 basierend auf den Zahlen von 2012-2015 (Biermayer et al., 2021; Hartl et al., 2016).....   | 29 |
| Abbildung 5: Technologieentwicklungsperspektiven für HTWP-Technologien bis 2030 (Quelle: Danish Technological Institute, (IEA HPT Annex 58, 2024a)) .....   | 31 |
| Abbildung 6: HTWP-Integration in einem Ziegelrockner. Integrationskonzept 1: nur WP1, Integrationskonzept 2: WP1 und WP2 (Quelle: AIT Austrian Institute of Technology GmbH, (Dusek et al., 2024), (Zühlsdorf et al., 2024a)) .....   | 34 |
| Abbildung 7: Wärmepumpenkonzepte zur Dampferzeugung: (a) Wärmepumpe mit direkte Dampferzeugung im Kondensator, (b) Heißwasserwärmepumpe in Kombination mit dampferzeugendem Wärmetauscher, (c) Heißwasserwärmepumpe in Kombination mit Flash-Tank, (d) Wärmepumpe mit direkter Dampferzeugung im Kondensator in Kombination mit Dampfkompessor (Quelle: AIT Austrian Institute of Technology GmbH)..... | 38 |
| Abbildung 8: Erdgasbasierte Dampfversorgung eines Produktionsstandortes (Quelle: AIT Austrian Institute of Technology GmbH, (Zühlsdorf et al., 2024a)).....   | 39 |
| Abbildung 9: Dampferzeugung mit Wärmepumpentechnologie auf unterschiedlichen Druckniveaus (Quelle: AIT Austrian Institute of Technology GmbH, (Zühlsdorf et al., 2024a)) .....  | 39 |
| Abbildung 10: Geeignete Dampftemperaturen für verschiedene Kältemittel (Annahme: 10 K Mindesttemperaturdifferenz zwischen kritischer Temperatur und Dampftemperatur) (Dusek et al., 2021) .....   | 40 |
| Abbildung 11: Vergleich zwischen Stromkosten (Spotmarktpreis + Gebühren) und PV-Stromgestehungskosten basierend auf (Austrian Power Grid AG, 2024) und (Kost et al., 2024) ....   | 42 |
| Abbildung 12: Einsparungen von CO <sub>2</sub> -Emissionen, Endenergiebedarf und Betriebskosten in Abhängigkeit vom COP einer HTWP im Vergleich zu einem Gaskessel .....  | 43 |
| Abbildung 13: Überblick über den Weg zu einer Dekarbonisierungsstrategie (Quelle: AIT Austrian Institute of Technology GmbH, (Zühlsdorf et al., 2024b)) .....   | 44 |
| Abbildung 14: Schematische Darstellung der untersuchten R600 HTHP (links) und ausgewertete Gütegrade (rechts) (Quelle: TU Graz).....  | 49 |

## Literaturverzeichnis

- Arpagaus C.: Hochtemperatur-Wärmepumpen. Marktübersicht, Stand der Technik und Anwendungspotenziale. VDE Verlag, Berlin, Deutschland, 2018.
- Austrian Power Grid AG: Day-Ahead Preise, <https://markttransparenz.apg.at/markt/Markttransparenz/Uebertragung/EXAA-Spotmarkt>, (abgerufen am 20 August 2024).
- Biermayer P., Dißauer C., Eberl M., Enigl M., Fechner H., Fürnsinn B., Jaksch-Fliegenschnee M., Leonhartsberger K., Moidl S., Prem E., Schmidl C., Strasser C., Weiss W., Wittmann M., Wonisch P., Wopienka E.: Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2020. Biomasse, Photovoltaik, Solarthermie, Wärmepumpen und Windkraft. In: BMK (Hrsg.): Berichte aus der Energie- und Umweltforschung. 18/2021. BMK, Wien, Österreich, 2021.
- Dusek S., Wilk V., Hubmann F., Verdnik M., Rieberer R., Zühlsdorf B.: Reduktion des Energiebedarfs durch den Einsatz von Hochtemperaturwärmepumpen in Industrieprozessen. In: 18. Symposium Energieinnovation, Graz, Österreich, 14.-16.02.2024.
- Dusek S., Laueremann M., Helminger F., Wilk, V.: Analysis of a steam generating high temperature heat pump for industrial waste heat recovery, In: 13<sup>th</sup> IEA Heat Pump Conference, Jeju, Südkorea, 26.-29.04.2021.
- E-Control: Natural gas. The role of natural gas for businesses, <https://www.e-control.at/en/industrie/gas/gaspreis/grosshandelspreise>, (abgerufen am 20 August 2024).
- ecop Technologies GmbH: Rotation Heat Pump, <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2022/07/hthpannex58ecopv2.pdf>, (abgerufen am 6 August 2024).
- finanz.at: CO2-Preis - CO2-Steuern in Österreich 2024, <https://www.finanz.at/steuern/co2-steuern/>, (abgerufen am 20 August 2024).
- Geyer R., Knöttner S., Diendorfer C., Drexler-Schmid G.: IndustRiES. Energieinfrastruktur für 100 % Erneuerbare Energie in der Industrie. In: Klima- und Energiefonds der österreichischen Bundesregierung (Hrsg.): Wien, Österreich, 2021.
- Hartl M., Biermayr P., Schneeberger A., Schöfmann P.: Österreichische Technologie- und Umsetzungsroadmap für Wärmepumpen. In: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.), Berichte aus Energie- und Umweltforschung. 8/2016, Wien, Österreich, 2016.
- DryFiciency, <https://dryficiency.eu/>, (abgerufen am 28 August 2024).
- IEA HPT Annex 58: Task 1 – Technologies, <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/task1/>, (abgerufen am 6 August 2024a).

- IEA HPT Annex 58: Task 3 Applications and Transition– Strategies for the conversion to HTHP-based process heat supply. Guideline for the development of a decarbonization strategy, 2024b.
- JCGM: Guide to the expression of uncertainty in measurement – Part 6: Developing and using measurement models, 2020.
- Kost C., Müller P., Schweiger J. S., Fluri V. und Thomsen, J.: Studie Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien. In: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Hrsg.), Freiburg, Deutschland, 2024.
- Längauer, A., Adler, B., Rakusch, C. und Ponweiser, K.: COP tests of a Rotation Heat Pump, in: • ISBN: 978-1-7138-0876-3 Proceedings of 25<sup>th</sup> IIR International Congress of Refrigeration (ICR 2019), Montreal, Canada, 2019.
- Poulsen J. L., Pedersen E. N., Dusek S., Windholz B., Köfing C., Müller Holm F., Olsen G., Radisch N., Anagnostou T., Kaida T., Ramirez M., Zondag H., Arteconi A., Abbasi S.: IEA HPT Annex 58 - High-Temperature Heat Pumps Task 4 - Definition and Testing of Heat Pump Specifications. Recommendations for defining and testing of specifications for HTHPs in commercial projects. In: Heat Pump Centre (Hrsg.): HPT -AN58 - 5, DOI: 10.23697/1p9r-0768, Borås, Schweden, 2024.
- OCHSNER Energie Technik: Ultra high temperature heat pump for direct steam production, <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2024/08/20240522annex58templatesuppliertechologyrev3iwwdstwin-steamtechnology-002.pdf>, (abgerufen am 5 August 2024a).
- OCHSNER Energie Technik: Ultra-high temperature heat pump, <https://heatpumpingtechnologies.org/annex58/wp-content/uploads/sites/70/2024/08/20240522annex58templatesuppliertechologyrev3iwwdstechology-003.pdf>, (abgerufen am 5 August 2024b).
- Statistik Austria: Nutzenergieanalyse Österreich 1993-2020. Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, [http://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/energie\\_umwelt\\_innovation\\_mobilitaet/energie\\_und\\_umwelt/energie/nutzenergieanalyse/index.html](http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/energie_und_umwelt/energie/nutzenergieanalyse/index.html), (abgerufen am 25. Februar 2022), Wien, Österreich, 2021.
- Umweltbundesamt: Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger, <https://secure.umweltbundesamt.at/co2mon/co2mon.html>, Aktualisierung 2023 (abgerufen am 29. Jänner 2024).
- Umweltbundesamt: Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger, <https://secure.umweltbundesamt.at/co2mon/co2mon.html>, 2021, (abgerufen am 13. April 2022).

- Verdnik M., Rieberer R.: Influence of operating parameters on the COP of an R600 high-temperature heat pump. In: *International Journal of Refrigeration*, 140, 103–111, <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.05.010>, 2022.
- Verdnik M., Eliskases P., Rieberer, R.: Vereinfachtes Simulationsmodell einer NH3-HTWP in einem Molkereibetrieb, In: *Proceedings Deutsche Kälte-Klima-Tagung 2023*, Hannover, Deutschland, 2023.
- Wilk V., Arnitz A., Rieberer, R.: Industrial Heat Pumps Second Phase. Task 1: Austrian Report, In: *IEA Heat Pump Technology Programme Annex 48*, 2019a.
- Wilk V., Helminger F., Dusek S., Lauer mann M., Fleckl T.: Dampferzeugung aus Abwärme mit Wärmepumpen, In: *Proceedings of Deutsche Kälte-Klima-Tagung 2019*, Ulm, Germany, 2019b.
- Zühlsdorf B., Poulsen J. L., Dusek S., Wilk V., Krämer J., Rieberer R., Verdnik M., Demeester T., Vieren E., Magni C., Abedini H., Leroy C., Yang L., Andersen M. P., Elmegaard B., Turunen-Saaresti T., Uusitalo A., De Carlan F., Gachot C., Schlosser F., Klöppel S., Abu Khass O., Schaffrath R., Wittstadt U., Henninger S., Teles de Oliveira H., Kaida T., Ramirez M., Lycklama a Nijeholt J.-A., Schlemminger C., Moen O. M., Lee G., Arpagaus C.: IEA HPT Annex 58 - High-Temperature Heat Pumps Task 1 – Technologies. Task Report. In: *Heat Pump Centre (Hrsg.): HPT-AN58-4*, DOI: 10.23697/dn21-0b02, Borås, Schweden, 2023.
- Zühlsdorf B., Poulsen J. L., Armato V., Arpagaus C., Schlosser F., Dusek S., Hubmann F., Lauer mann M., Wilk V., Madsbøll H., Moen O. M., Verdnik M., Rieberer R., Elmegaard B., Stathopoulos P., Ramirez, M.: IEA HPT Annex 58 High-Temperature Heat Pumps Task 2-Integration Concepts. Task Report. In: *Heat Pump Centre (Hrsg.): HPT-AN58-3*, DOI: 10.23697/h7x0-tq45, Borås, Schweden, 2024a.
- Zühlsdorf B., Poulsen J. L., Armato V., Madsbøll H., Dusek S., Drexler-Schmid G., Fibi B., Knöttner S. B., Riedl J., Wilk V., Rieberer R., Verdnik M., Leroy C., Yang L., Fang S., Wang Q., Andersen M. P., Elmegaard B., Müller Holm F., Turunen-Saaresti T., Stathopoulos P., Benkert S., Wittstadt U., Schlosser F., Arpagaus C., Nawaz K. und Wang P.: IEA HPT Annex 58 - High-Temperature Heat Pumps Task 3 – Applications and Transition, Task Report. In: *Heat Pump Centre (Hrsg.): HPT -AN58 - 4*, DOI: 10.23697/dn21-0b02, Borås, Schweden, 2024b.

## Abkürzungen

|      |   |
|------|---|
| COP  | Coefficient of Performance                  |
| FAT  | Factory Acceptance Test                     |
| GWP  | Global Warming Potential/Treibhauspotential |
| HTWP | Hochtemperatur-Wärmepumpen                  |
| ODP  | Ozon Depletion Potential/Ozonabbaupotential |
| SAT  | Site Acceptance Test                        |
| SIT  | Site Integration Test                       |
| TRL  | Technology Readiness Level                  |

## Parameter und Variablen

|           |                                       |
|-----------|---------------------------------------|
| $h$       | Spezifische Enthalpie, J/kg           |
| $P_{el}$  | Elektrische Leistung, W               |
| $\dot{Q}$ | Heizleistung, W                       |
| $T$       | Temperatur, K                         |
| $T_{lm}$  | mittlere logarithmische Temperatur, K |
| $\dot{V}$ | Volumenstrom, m <sup>3</sup> /s       |
| $v$       | Gütegrad, -                           |
| $\rho$    | Dichte, kg/m <sup>3</sup>             |

## Subskripts

|        |                |
|--------|----------------|
| aus    | Austritt       |
| Carnot | Carnot-Prozess |
| ein    | Eintritt       |
| Lorenz | Lorenz-Prozess |
| Q      | Quelle         |
| S      | Senke          |



