

IEA Wärmepumpentechnologien (HPT) Annex 54: Wärmepumpen- systeme mit Kältemitteln mit niedrigem Treibhauspotential

T. Natiesta, C. Köfinger,
R. Rieberer, M. Verdnik,
F. Zach, M. Stadler, P. Vidovic

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

56/2023

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter nachhaltigwirtschaften.at

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Copyright und Haftung:

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist.

Nutzungsbestimmungen: nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/

IEA Wärmepumpentechnologien (HPT) Annex 54: Wärmepumpensysteme mit Kältemitteln mit niedrigem Treibhauspotential

Ing. Thomas Natiesta, MSc, Ing. Christian Köfinger, MSc,
Ao.Univ.-Prof. Dr. René Rieberer, Dipl.-Ing. Manuel Verdnik, BSc
Technische Universität Graz

DI Franz Zach, Ing. Mathias Stadler, Patrick Vidovic
AEA - Österreichische Energieagentur

Wien und Graz, Februar 2023

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Programm FORSCHUNGSKOOPERATION INTERNATIONALE ENERGIEAGENTUR. Es wurde vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) initiiert, um Österreichische Forschungsbeiträge zu den Projekten der Internationalen Energieagentur (IEA) zu finanzieren.

Seit dem Beitritt Österreichs zur IEA im Jahre 1975 beteiligt sich Österreich aktiv mit Forschungsbeiträgen zu verschiedenen Themen in den Bereichen erneuerbare Energieträger, Endverbrauchstechnologien und fossile Energieträger. Für die Österreichische Energieforschung ergeben sich durch die Beteiligung an den Forschungsaktivitäten der IEA viele Vorteile: Viele Entwicklungen können durch internationale Kooperationen effizienter bearbeitet werden, neue Arbeitsbereiche können mit internationaler Unterstützung aufgebaut sowie internationale Entwicklungen rascher und besser wahrgenommen werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements der beteiligten Forschungseinrichtungen ist Österreich erfolgreich in der IEA verankert. Durch viele IEA Projekte entstanden bereits wertvolle Inputs für europäische und nationale Energieinnovationen und auch in der Marktumsetzung konnten bereits richtungsweisende Ergebnisse erzielt werden.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist es, die Projektergebnisse einer interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, was durch die Publikationsreihe und die entsprechende Homepage www.nachhaltigwirtschaften.at gewährleistet wird.

DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Programm FORSCHUNGSKOOPERATION INTERNATIONALE ENERGIEAGENTUR. Es wurde vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie initiiert, um Österreichische Forschungsbeiträge zu den Projekten der Internationalen Energieagentur (IEA) zu finanzieren.

Seit dem Beitritt Österreichs zur IEA im Jahre 1975 beteiligt sich Österreich aktiv mit Forschungsbeiträgen zu verschiedenen Themen in den Bereichen erneuerbare Energieträger, Endverbrauchstechnologien und fossile Energieträger. Für die Österreichische Energieforschung ergeben sich durch die Beteiligung an den Forschungsaktivitäten der IEA viele Vorteile: Viele Entwicklungen können durch internationale Kooperationen effizienter bearbeitet werden, neue Arbeitsbereiche können mit internationaler Unterstützung aufgebaut sowie internationale Entwicklungen rascher und besser wahrgenommen werden.

Dank des überdurchschnittlichen Engagements der beteiligten Forschungseinrichtungen ist Österreich erfolgreich in der IEA verankert. Durch viele IEA Projekte entstanden bereits wertvolle Inputs für europäische und nationale Energieinnovationen und auch in der Marktumsetzung konnten bereits richtungsweisende Ergebnisse erzielt werden.

Ein wichtiges Anliegen des Programms ist es, die Projektergebnisse einer interessierten Fachöffentlichkeit zugänglich zu machen, was durch die Publikationsreihe und die entsprechende Homepage www.nachhaltigwirtschaften.at gewährleistet wird.

DI Michael Paula

Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	8
2	Abstract	9
3	Ausgangslage	10
4	Projekthalt - IEA HPT Annex 54	11
4.1.	Partnerländer	11
4.2.	Taskuntergliederung	12
4.3.	Aufgabenstellung des österreichischen Teilprojektes im Task/Annex	13
4.3.1.	Überprüfung des Standes der Technik (AP1)	13
4.3.2.	Fallstudien und Designrichtlinien zur Optimierung von Komponenten und Systemen (AP2)	13
4.3.3.	Überprüfung der Auswirkungen von Designoptimierungen und Weiterentwicklungen auf die LCCP-Reduktion (AP3)	14
4.3.4.	Ausblick für 2030 (AP4)	14
4.3.5.	Kommunikation und Dissemination (AP5).....	14
4.3.6.	Bereits erbrachte Vorleistungen (AP6).....	14
4.4.	Österreichische Kooperation	14
4.5.	Spezifische Projektziele.....	15
4.6.	Vorgangsweise und Methoden	16
5	Nationale Beiträge und Ergebnisse	17
5.1.	Kältemittel und deren Eigenschaften	17
5.1.1.	Definition von Low-GWP-Kältemittel	17
5.1.2.	Sicherheitsklassen von Kältemitteln.....	17
5.1.3.	Thermodynamische Eigenschaften.....	18
5.1.4.	Kältemittelsituation in Österreich	18
5.1.5.	Alternativen zu derzeit eingesetzten Kältemitteln.....	19
5.2.	Forschungsprojekte zu Low-GWP-Kältemitteln.....	23
5.3.	R290 (Propan) als Alternative zu R410A	24
5.3.1.	Vergleich von R410A und R290	24
5.3.2.	Anpassungen am Kältekreis.....	27
5.4.	Simulationsstudie zur Umrüstung auf R290	29
5.4.1.	Kältekreis	29
5.4.2.	Auslegungspunkt und untersuchte Betriebsbedingungen	30
5.4.3.	Grundlegendes R410A-System	31
5.4.4.	Erforderliche Änderungen für die Verwendung von R290 im Vergleich zu R410A... ..	32
5.4.5.	Reduktion der Kältemittelfüllmenge	33
5.5.	LCCP-Reduktion durch Umstieg auf R290.....	34
5.5.1.	LCCP-Berechnungsmethode	34

5.5.2.	LCCP-Berechnungstools.....	35
5.5.3.	LCCP-Berechnungsergebnisse	35
5.6.	Low-GWP-Kältemittelmarkt - Ausblick bis 2030	39
5.6.1.	Österreichischer Wärmepumpenmarkt – bisherige Entwicklung und Prognosen	39
5.6.2.	Ergebnisse der StakeholderInnen-Workshops	41
5.7.	Publikationen	47
5.7.1.	Task-Berichte und Annual Progress Report 2022	47
5.7.2.	Bachelorarbeit zu LCCP-Analysen.....	48
5.7.3.	Artikel in Fachzeitschriften	48
6	Inputs aus dem internationalen Projekt	49
6.1.	USA.....	49
6.2.	Deutschland	49
6.3.	Frankreich	50
6.4.	Japan	50
7	Vernetzung und Ergebnistransfer	51
7.1.	Einbindung der Zielgruppen.....	51
7.1.1.	StakeholderInnen-Workshops.....	51
7.1.2.	Vorträge bei Wärmepumpenkursen.....	51
7.1.3.	Weiterbildung im Umgang mit brennbaren Kältemitteln	51
7.2.	Relevanz und Nutzen der Ergebnisse.....	52
7.3.	Verwertung der Ergebnisse.....	52
8	Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen.....	53

1 Kurzfassung

Aufgrund der in der F-Gase-Verordnung (EU) Nr. 517/2014 (EU, 2014) geforderten Mengenreduktion von teilfluorierten Kohlenwasserstoffen (für 2020 um 37% und 2030 um 79% gemessen am gesamten CO₂-Äquivalent der zwischen 2009 und 2012 im Durchschnitt verbrauchten F-Gase) kommt es zu einer Verknappung gängiger Kältemittel. Der im April 2022 vorgelegte Vorschlag zur Novellierung dieser Verordnung sieht darüber hinaus Verwendungsverbote für Kältemittel mit einem GWP von über 750 bzw. von über 150 je nach Anlagenkonfiguration (Split oder Monoblock) und Kältemittelmenge vor, sofern damit die Einhaltung von Sicherheitsnormen möglich ist. Der Einsatz von Kältemitteln mit niedrigem GWP (in weiterer Folge Low-GWP-Kältemittel genannt) ist aber häufig mit Herausforderungen, z.B. Brennbarkeit, verbunden.

In diesem Projekt wurden daher im Zuge einer Literaturrecherche jene Low-GWP-Kältemittel identifiziert und analysiert, die Potenzial für den Einsatz in Heizungswärmepumpen aufweisen. Anhand von Wärmepumpen-/ Kältekreisimulationen wurden die für eine Umstellung von konventionellen Kältemitteln auf das brennbare Kältemittel R290 (gilt als besonders geeignetes Low-GWP-Kältemittel) nötigen Anpassungen des Wärmepumpendesigns näher untersucht. Als Vergleichssystem fungierte ein Kältekreis mit dem in Österreich bei Wärmepumpen derzeit am häufigsten eingesetzten Kältemittel R410A. Im nächsten Schritt wurde der Kältekreis insbesondere hinsichtlich der Reduktion der Kältemittelmenge optimiert. In weiterer Folge wurden das Vergleichssystem und das optimierte R290-System hinsichtlich ihrer Life Cycle Climate Performance (LCCP) verglichen. Hierbei wurden die direkten (Kältemittelverluste) sowie indirekten CO₂-äquivalenten Lebenszyklusemissionen (verursacht durch Produktionsprozesse, Stromverbrauch im Betrieb, etc.) berücksichtigt. Durch die internationale Vernetzung mit den anderen am IEA HPT Annex 54 teilnehmenden Staaten (Südkorea, Japan, Italien, Schweden und die USA) konnten auch Forschungs- und Marktaktivitäten auf internationaler Ebene berücksichtigt werden.

Ein Highlight des nationalen Beitrags stellen die Aktivitäten hinsichtlich des Ausblicks bis 2030 zur Marktentwicklung von Wärmepumpen mit Low-GWP-Kältemittel dar. In vier nationalen StakeholderInnen-Workshops wurden die Markterwartungen mit den teilnehmenden ExpertInnen diskutiert. Es gab sich ein breites Meinungsbild, das keine engere Festlegung auf eine bestimmte Aussage zum Ausblick für 2030, jedoch auf die relevanten Einflussfaktoren zulässt. Die weitere Entwicklung hängt beispielsweise von möglichen Verboten konventioneller Kältemittel durch die in Begutachtung befindliche Novellierung der F-Gase-Verordnung oder einer dringend notwendigen Novelle der nationalen Kälteanlagenverordnung ab.

Bezüglich der Dissemination wären die thematische Verbindung mit der Lehre am Institut für Wärmetechnik an der TU Graz (Projektpartner), die im Zusammenhang mit dem IEA HPT Annex 54 entwickelte Weiterbildung im Umgang mit brennbaren Kältemitteln und die regulären AIT-Wärmepumpenkurse zu nennen. Ergebnisworkshops mit politischen EntscheidungsträgerInnen und anderen relevanten StakeholderInnen aus der Wärmepumpen- und Kältetechnikbranche wurden durchgeführt, um die Erkenntnisse aus dem Projekt den relevanten Personenkreisen zugänglich zu machen und um wertvolle Inputs aus der Praxis in das Projekt zu integrieren.

2 Abstract

The F-Gas regulation (EU) No 517/2014 (EU, 2014) prescribes a phase-down of partly fluorinated hydrocarbons (for 2020 by 37% and 2030 by 79% compared to the total CO₂-equivalent of all gases used in average between 2009 and 2012). This shortage of refrigerants leads to challenges for the heat pump market. The proposal for the amendment of the F-Gas Regulation presented in April 2022 contains bans on the use of refrigerants with a GWP of more than 750 or of more than 150, depending on the system configuration (split or monobloc) and refrigerant quantity, if this is compatible with safety standards. This applies insofar as compliance with safety standards is possible. However, the use of low-GWP refrigerants is often associated with challenges, e.g. flammability.

In this project, literature research was therefore used to identify and analyse refrigerants with low GWP that show potential for use in domestic heat pumps. By means of simulations, the necessary adaptations of the heat pump design for a conversion from conventional refrigerants to the (flammable) refrigerant R290, which is often mentioned as a particularly suitable low-GWP refrigerant, were investigated in more detail. A refrigeration circuit with the refrigerant R410A, which is currently the most commonly used refrigerant in heat pumps in Austria, served as a comparison system. The refrigeration circuit was optimized in particular with regard to the reduction of the refrigerant quantity. Subsequently, the two systems were compared with regard to their Life Cycle Climate Performance (LCCP), which takes into account the direct (refrigerant losses) and indirect (CO₂-equivalent life cycle emissions caused by production processes, electricity consumption during operation, etc.) CO₂-equivalent life cycle emissions.

Due to the international networking with the other countries participating in IEA HPT Annex 54 (South Korea, Japan, Italy, Sweden and the USA), research and market activities could also be taken into account at the international level.

A highlight of the national project are the activities regarding the outlook until 2030 for the market development of heat pumps with low-GWP refrigerants. The market expectations were discussed with the participating experts in four stakeholder workshops. A broad range of opinions emerged, which does not allow for a narrower definition of a specific statement on the 2030 outlook, but on the main influencing factors. Further developments depend, for example, on possible bans on conventional refrigerants in the new version of the F-Gas Regulation, which is currently being reviewed, or a possible amendment to the National Refrigeration Ordinance, which has been the subject of much discussion.

With regard to dissemination, the thematic link with teaching at the Institute of Thermal Engineering at Graz University of Technology (project partner), the further training in the handling of flammable refrigerants developed in connection with IEA HPT Annex 54 and the regular AIT heat pump courses shall be mentioned. Results workshops with policy makers and other relevant stakeholders from the heat pump and refrigeration sector were conducted in order to make the findings from the project accessible to the relevant groups of stakeholders and to get valuable inputs for this project from the industry.

3 Ausgangslage

Durch die Nutzung von Wärme aus Umgebungsluft, Erdreich, Grundwasser oder Abwärme zur Beheizung von Wohn- und Gewerbebauten nehmen Wärmepumpensysteme unter Verwendung von elektrischer Energie mit günstiger CO₂-Bilanz eine wichtige Rolle zur Erreichung der Klimaziele ein. Aufgrund von Verknappung bzw. Verteuerung von derzeit eingesetzten „Standard-Kältemitteln“ kommt diese Technologie jedoch zunehmend unter Druck, weshalb sog. „Low-GWP“-Kältemittel immer mehr in den Fokus rücken.

Der Einsatz von Low-GWP-Kältemitteln in Wärmepumpen und Kälteanlagen ist auch für die österreichische Wärmepumpenbranche von großer Bedeutung. In Europa werden Kältemittel über die F-Gase-Verordnung (EU, 2014) im Rahmen des dort genannten „Phase-Down“-Konzeptes basierend auf dem CO₂-Äquivalent reduziert. Über Quotenregelungen erfolgt eine Mengenreduktion von Kältemitteln mit hohem GWP und damit verbunden, kommt es zu Preissteigerungen einzelner Kältemittel. Der Einsatz von Low-GWP-Kältemitteln ist daher für die Branche essentiell und stellt diese auch vor Herausforderungen, sowohl im Anlagendesign und der Komponentenverfügbarkeit als auch hinsichtlich der Erfüllung von sicherheitsrelevanten Anforderungen, insbesondere beim Einsatz von brennbaren Kältemitteln.

Vor diesem Hintergrund wurde das vorliegende Kooperationsprojekt im Technology Collaboration Program (TCP) Heat Pumping Technologies (HPT) der Internationalen Energieagentur (IEA), das als 54. Projekt in diesem TCP den offiziellen Namen „IEA HPT Annex 54“ trägt, ins Leben gerufen.

Der internationale IEA HPT Annex 54 zielt demnach darauf ab, den in der F-Gase-Verordnung (EU, 2014) beschriebenen Phase-Down von Kältemitteln mit hohem GWP zu unterstützen. Ein Fokus des Projektes ist die Untersuchung und Optimierung von Wärmepumpenkomponenten und -systemen in Hinsicht auf die Verwendbarkeit geeigneter Low-GWP-Kältemittel.

4 Projektinhalt - IEA HPT Annex 54

Das übergeordnete Ziel des IEA HPT Annex 54 ist die Förderung der Anwendung von Low-GWP-Kältemitteln, um den Ausstieg aus der Verwendung von Kältemitteln mit hohem Treibhauspotenzial zu beschleunigen. Dies soll u.a. durch Konstruktionsrichtlinien für optimierte Wärmepumpenkomponenten und -systeme für Low-GWP-Kältemittel, durch darauf aufbauende Life Cycle Climate Performance (LCCP)-Analysen sowie durch Untersuchungen hinsichtlich der Marktentwicklungen von Wärmepumpen mit Low-GWP-Kältemitteln erreicht werden. In einem Ausblick bis 2030 soll die bis dahin vorliegende Verfügbarkeit von Low-GWP-Kältemitteln abgeschätzt werden. Der Fokus dieser internationalen IEA-Kooperation liegt dabei auf Klimaanlage und Wärmepumpensystemen für Wohn- und Gewerbegebäude.

4.1. Partnerländer

Der IEA HPT Annex 54 ist eine Kooperation von acht Ländern, die in Tabelle 4-1 mit den jeweiligen nationalen Konsortialführern angegeben sind.

Tabelle 4-1: Internationale Zusammensetzung mit den nationalen Konsortialführern des IEA HPT Annex 54 Projekts

Ländername	Institution
USA (Operating Agent)	U.S. DEPARTMENT OF ENERGY BUILDING TECHNOLOGIES PROGRAM
Deutschland	Division Energy System
Österreich	AIT Austrian Institute of Technology GmbH
Frankreich	Direction of Development and Partnerships Thermodynamic Systems
Japan	NEDO
Südkorea	Chung Ang University
Italien	Italian National Research Council
Schweden	Swedish Energy Agency

4.2. Taskuntergliederung

Der internationale IEA HPT Annex 54 ist in fünf Tasks gegliedert, die mit Namen und Inhalt in Tabelle 4-2 gelistet sind.

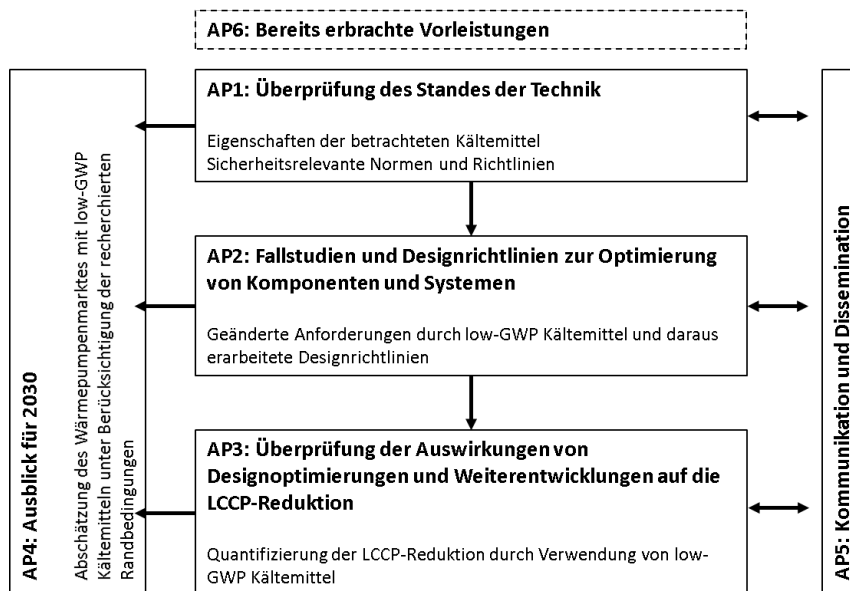
Tabelle 4-2: Taskuntergliederung des internationalen IEA HPT Annex 54

Nummer	Name	Inhalt
Task 1	Überprüfung des Standes der Technik	<ul style="list-style-type: none"> • Zusammenfassung „natürlicher“ Kältemittel und kürzlich eingeführter HFOs • Identifizierung von Low-GWP-Kältemitteln und Aufschlüsselung wichtiger thermodynamischer Eigenschaften • Gegenüberstellung von Low-GWP-Kältemitteln und derzeit verwendeten Kältemitteln in Bezug auf sicherheitsrelevante Eigenschaften
Task 2	Fallstudien und Designrichtlinien zur Optimierung von Komponenten und Systemen	<ul style="list-style-type: none"> • Nötige konstruktive Änderungen werden erarbeitet • Verschiedene Systemkonfigurationen werden definiert, die durch Simulationen untersucht werden • Vergleich der durch die Simulation gewonnen Messdaten mit jenen von bereits verwendeten Kältemitteln
Task 3	Überprüfung der Auswirkungen von Designoptimierungen und Weiterentwicklungen auf die LCCP-Reduktion	<ul style="list-style-type: none"> • Untersuchung der erarbeiteten Designrichtlinien hinsichtlich Life Cycle Climate Performance • Simulation und Berechnung des TEWI-Wertes • Beleuchten der Auswirkungen unterschiedlicher „CO₂-Belastungen“ der Antriebsenergie (Strommix)
Task 4	Ausblick für 2030	<ul style="list-style-type: none"> • Identifizierung möglicher Märkte • Abschätzung der Einsatzgrenzen und Prognosen zur Entwicklung des Wärmepumpenmarktes
Task 5	Kommunikation und Dissemination	<ul style="list-style-type: none"> • Aufbereitung der Ergebnisse • AEA-Workshop mit Bundes- und LandesvertreterInnen • Integration der Ergebnisse in Lehrveranstaltungen des IWT an der TU Graz • Abschlussbericht

4.3. Aufgabenstellung des österreichischen Teilprojektes im Task/Annex

Das österreichische Teilvorhaben ist in sechs Arbeitspakete (AP) strukturiert, die sich an die Tasks des internationalen Projektes anlehnen. Sie hängen wechselseitig voneinander ab, wie in Abbildung 4-1 dargestellt.

Abbildung 4-1: Darstellung des österreichischen Teilvorhabens im Annex



4.3.1. Überprüfung des Standes der Technik (AP1)

Der Stand der Technik und die aktuell durchgeführten Forschungsaktivitäten hinsichtlich Low-GWP-Kältemittel in Heizungswärmepumpen sind Gegenstand des ersten Arbeitspakets. Inhalte sind u.a. die Recherche zu konstruktiven Aspekten auf Komponenten- und Systemebene, die aktuellen sicherheitsrelevanten Normen und Richtlinien (z.B. EN 378) insbesondere mit Bezug auf maximal erlaubte Kältemittelfüllmengen sowie die Darstellung und der Vergleich der thermodynamischen (z.B. Wärmeübergang) und sicherheitsrelevanten Eigenschaften (z.B. Brennbarkeit) von Low-GWP-Kältemitteln und derzeit verwendeten Kältemitteln.

4.3.2. Fallstudien und Designrichtlinien zur Optimierung von Komponenten und Systemen (AP2)

Dieses Arbeitspaket baut auf AP1 auf und beinhaltet Untersuchungen zu den konstruktiven Anforderungen an Wärmepumpensystemen bei Verwendung von Low-GWP-Kältemitteln und darauf abzuleitende Designrichtlinien. Es kommen thermodynamische Simulationen zur Untersuchung verschiedener Komponenten zur Minimierung der Kältemittelfüllmenge zum Einsatz.

4.3.3. Überprüfung der Auswirkungen von Designoptimierungen und Weiterentwicklungen auf die LCCP-Reduktion (AP3)

Dieses Arbeitspaket beinhaltet die Untersuchung der in AP2 optimierten Systemkonfigurationen hinsichtlich des Einflusses der verwendeten Kältemittel auf die Life Cycle Climate Performance (LCCP) mittels Simulationstools.

4.3.4. Ausblick für 2030 (AP4)

Untersuchungen zur bisherigen Marktentwicklung von Wärmepumpen mit Low-GWP-Kältemittel und zu Anhaltspunkten hinsichtlich der künftigen Marktentwicklung sind die Schwerpunkte dieses Arbeitspakets. Der gewählte Zeithorizont ist analog zum internationalen Projekt das Jahr 2030. Insbesondere die Verfügbarkeit von Kältemitteln, z.B. in Zusammenhang mit der F-Gase-Verordnung, sowie künftig zu erwartende weitere Verwendungs- und Verfügbarkeitsbeschränkungen finden dabei Berücksichtigung.

4.3.5. Kommunikation und Dissemination (AP5)

Dieses Arbeitspaket dient der praxisorientierten Aufbereitung und Kommunikation der Projekthinhalte beispielsweise im Rahmen von AIT-Wärmepumpenkursen. Workshops mit Bundes- und LandesvertreterInnen sowie politischen EntscheidungsträgerInnen dienen dazu, Bewusstsein für die Thematik der Low-GWP-Kältemittel zu schaffen. Durch die universitäre Lehre im Rahmen von Lehrveranstaltungen des IWT an der TU Graz (hauptsächlich Wärmepumpentechnik) erfolgt die Dissemination auf akademischer Ebene.

4.3.6. Bereits erbrachte Vorleistungen (AP6)

Die Teilnahme an internationalen Workshops und Meetings im Rahmen der 25th International Conference of Refrigeration in Montreal (26.-30. August 2019) erfolgte vor dem offiziellen Projektbeginn und fällt somit in dieses Arbeitspaket.

4.4. Österreichische Kooperation

Das nationale Konsortium bestand aus dem Center for Energy des AIT Austrian Institute of Technology GmbH, der Österreichischen Energieagentur (AEA) und dem Institut für Wärmetechnik (IWT) der TU Graz. Alle drei Institute haben umfangreiche Erfahrungen in der Abwicklung von internationalen Forschungsprojekten und arbeiten schon seit langem in zahlreichen nationalen und internationalen Projekten erfolgreich zusammen. Synergien aus den Kompetenzen aller beteiligten PartnerInnen konnten bestens genutzt werden.

Tabelle 4-3: Lead und involvierte Partner in den Arbeitspaketen innerhalb des Konsortiums

Arbeitspakete auf nationaler Ebene	Konsortialpartner
Überprüfung des Standes der Technik (AP1)	AEA, AIT, IWT

Arbeitspakete auf nationaler Ebene	Konsortialpartner
Fallstudien und Designrichtlinien zur Optimierung von Komponenten und Systemen (AP2)	IWT, AEA, AIT
Überprüfung der Auswirkungen von Designoptimierungen und Weiterentwicklungen auf die LCCP-Reduktion (AP3)	AIT, AEA, IWT
Ausblick für 2030 (AP4)	AEA, AIT, IWT
Kommunikation und Dissemination (AP5)	AIT, AEA, IWT
Bereits erbrachte Vorleistungen (AP6)	AIT

4.5. Spezifische Projektziele

Die Projektziele/-inhalte des nationalen Beitrags zum IEA HPT Annex 54 sind in Tabelle 4-4 angegeben. Die Ziele des nationalen Projektes wurden derart gewählt, dass ein optimaler Transfer von Erkenntnissen in den internationalen IEA HPT Annex 54 möglich wurde.

Tabelle 4-4: Projektziele des nationalen IEA HPT Annex 54

Task	Ziele
1	<ul style="list-style-type: none"> Recherche zu Low-GWP-Kältemitteln Gegenüberstellung von Low-GWP-Kältemitteln und deren thermophysikalischen Eigenschaften, Verfügbarkeit, Einsatzgrenzen und Brennbarkeit/Toxizität Ermittlung von Anlagenkonfigurationen für neue Kältemittel
2	<ul style="list-style-type: none"> Definition sicherheitsrelevanter und konstruktionstechnischer Anforderungen an Wärmepumpen durch Low-GWP-Kältemittel Entwicklung von Designrichtlinien basierend auf den Anforderungen Untersuchung und Optimierung von zu definierenden Systemkonfigurationen
3	<ul style="list-style-type: none"> Untersuchung der Life Cycle Climate Performance von Wärmepumpen mit Low-GWP-Kältemitteln Vergleich von aktuell verwendeten Kältemitteln und zukünftigen Low-GWP-Kältemitteln
4	<ul style="list-style-type: none"> Ermittlung des Marktpotenzials von Wärmepumpen mit Low-GWP-Kältemitteln bis 2030 Ermittlung der Verfügbarkeit von Kältemitteln bis 2030 samt möglicher Engpässe Ermittlung der möglichen Entwicklung von Regularien, die den Einsatz von Kältemitteln beschränken
5	<ul style="list-style-type: none"> Einbringung der österreichischen Beiträge in internationale ExpertInnenmeetings und Stärkung der internationalen Sichtbarkeit der österreichischen Wärmepumpenforschung Information der österreichischen StakeholderInnen über die Projektaktivitäten sowie Verbreitung der nationalen und internationalen Ergebnisse und Erkenntnisse Erfüllung der Berichtspflichten auf nationaler sowie internationaler Ebene

Task	Ziele
	<ul style="list-style-type: none"> • Einhaltung des Zeit- und Kostenplans • Erreichung der Projektziele
6	<ul style="list-style-type: none"> • Teilnahme an Annex-Meetings vor dem Start des nationalen Projekts

4.6. Vorgangsweise und Methoden

Zur Bewältigung der gestellten Aufgaben wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Methoden genutzt, die in Tabelle 4-5 zusammengestellt sind.

Tabelle 4-5: Eingesetzte Methoden im nationalen IEA HPT Annex 54

Task	Methoden
1	<ul style="list-style-type: none"> • Technologiescreening/Marktrecherche • Literaturrecherche • Befragungen relevanter HerstellerInnen von Wärmepumpen und Kältemitteln sowie Forschungsinstitutionen
2	<ul style="list-style-type: none"> • Literaturrecherche (Normen und Richtlinien) • Zusammenfassung von Simulationsergebnissen (EES, Dymola) • Simulationstechnische Untersuchung der gewählten Komponenten basierend auf bestehenden Simulationsmodellen
3	<ul style="list-style-type: none"> • Berechnungen, z.B.: <ul style="list-style-type: none"> ○ Pack Calculation Tool von IPU ○ Residential HP LCCP von AHRI
4	<ul style="list-style-type: none"> • Literaturrecherche und ExpertInneninterviews
5	<ul style="list-style-type: none"> • Teilnahme an nationalen und internationalen Veranstaltungen • Organisation von Verbreitungsmaßnahmen (Workshops, Publikationen) • Berichtslegung
6	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellung einer Präsentation und Teilnahme an einem Meeting

5 Nationale Beiträge und Ergebnisse

Die nationalen Beiträge zum IEA HPT Annex 54 fokussieren sich auf Kältemittel für Heizungs-Wärmepumpen im Gebäudebereich. Kältemittel für andere Einsatzzwecke (z.B. Brauchwasserbereitung, Hochtemperatur-Wärmepumpen für industrielle Zwecke etc.) werden nicht im Detail behandelt. Diese Einsatzzwecke werden exemplarisch bei den entsprechenden Kältemitteln genannt, die Aufzählungen stellen jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Im Folgenden sind die Ergebnisse thematisch zusammengefasst, auf eine Bezugnahme zu einzelnen Arbeitspaketen wurde zwecks Lesbarkeit und Nutzen für die Zielgruppe dieses Berichts bewusst verzichtet.

5.1. Kältemittel und deren Eigenschaften

In diesem Abschnitt werden die derzeit am häufigsten in Heizungs-Wärmepumpen eingesetzten Kältemittel sowie deren zu Beginn des Projektes identifizierte Low-GWP-Alternativen aufgelistet und hinsichtlich ihrer thermodynamischen und sicherheitsrelevanten Eigenschaften verglichen.

5.1.1. Definition von Low-GWP-Kältemittel

Da es keine einheitliche Definition für Low-GWP-Kältemittel gibt, wurde im Rahmen des nationalen Beitrags ein geeigneter Grenzwert festgelegt: Da ein GWP-Wert von 150 in einer Vielzahl von für den Wärmepumpenbereich relevanten Regularien (z.B. F-Gase-Verordnung) in unterschiedlichen Zusammenhängen als Grenzwert genannt wird, wurde dieser im nationalen Beitrag zur Definition von Low-GWP-Kältemitteln gewählt. Da nur wenige der derzeit verfügbaren Kältemittel dieser strengen Definition gerecht werden, wurde auch eine Definition für Low-GWP-Kältemittel „im weiteren Sinn“ eingeführt. Da der Grenzwert $GWP < 750$ in den erwähnten Regularien ebenfalls häufig Anwendung findet, wurde dieser im nationalen Beitrag zur Definition von Low-GWP-Kältemitteln „im weiteren Sinn“ gewählt. Kältemittel mit einem $GWP < 150$ können in diesem Kontext somit als Low-GWP-Kältemittel „im engeren Sinn“ bezeichnet werden.

Die GWP-Werte für Kältemittel in diesem Bericht basieren auf dem 4. Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) und wurden aus Bitzer (2020) entnommen.

5.1.2. Sicherheitsklassen von Kältemitteln

Zwei relevante Eigenschaften, die die Sicherheit von Kältemitteln betreffen, sind deren Brennbarkeit und Toxizität. Bezüglich dieser beiden Parameter werden Kältemittel gemäß ISO 817:2014 und ASHRAE Standard 34-2019 (ASHRAE, 2019) in Sicherheitsklassen eingeteilt.

Die Toxizität wird mit den Buchstaben A oder B gekennzeichnet. Geringe Toxizität (Klasse A) liegt vor, wenn 400 ppm des jeweiligen Kältemittels in der Luft keine negativen Auswirkungen auf die meisten ArbeitnehmerInnen haben, die dieser Konzentration täglich, während eines 8-Stunden-Arbeitstages bzw. einer 40-Stunden-Arbeitswoche ausgesetzt sind. Ansonsten gilt die Toxizität als erhöht (Klasse B) (Pohlmann, 2018).

Hinsichtlich der Brennbarkeit werden Kältemittel in vier Klassen (1, 2, 2L und 3) eingeteilt. Klasse 1 umfasst nicht brennbare Kältemittel. Klasse 2 umfasst entzündliche Kältemittel, die eine untere Explosionsgrenze von mindestens 3,5 Vol.-% und eine Verbrennungswärme kleiner als 19 MJ/kg aufweisen, wobei die Klasse 2L (weniger leicht entzündlich) durch eine maximale Flammgeschwindigkeit von 10 cm/s gekennzeichnet ist. Die Klasse 3 umfasst hochentzündliche Kältemittel mit einer unteren Explosionsgrenze kleiner 3,5 Vol.-% oder einer Verbrennungswärme über 19 MJ/kg (Bitzer, 2020a).

5.1.3. Thermodynamische Eigenschaften

Werden Kältemittel anhand ihrer thermodynamischen Eigenschaften verglichen, sind insbesondere der Sättigungsdruck und die volumetrische Kälteleistung relevant.

Sättigungsdruck

Die Betriebstemperaturen von Wärmepumpen werden von der Temperatur der Wärmequelle und der Temperatur der Wärmesenke bestimmt. Die Wärmequelle kann bei Luft-Wärmepumpen die Umgebungsluft sein, deren Temperatur stark von den klimatischen Bedingungen, der aktuellen Wetterlage sowie von der Jahres- und Tageszeit abhängt. Bei Erd-Wärmepumpen dient Erdreich, bei Grundwasser-Wärmepumpen das Grundwasser als Wärmequelle (beide zeigen eine jahreszeitliche Abhängigkeit mit einer Spitze typischerweise im Herbst). Darüber hinaus können auch andere Wärmequellen wie industrielle Abwärme oder Abwasser genutzt werden. Die benötigte Temperatur auf der Wärmesenkenseite hängt vor allem vom verwendeten Wärmeverteilungssystem und von der thermischen Qualität der Gebäudehülle ab. Bei gegebenen Senken- und Quellentemperaturen ist die Konfiguration der Wärmepumpe entscheidend für die auftretenden Verdampfungs- und Kondensationstemperaturen. Die relevanten Druckniveaus der Wärmepumpe (Verdampfungs- und Kondensationsdruck) hängen vom Sättigungsdruck des verwendeten Kältemittels ab und geben einen ersten Aufschluss über die Verwendbarkeit von Komponenten. Sind die Sättigungsdrücke zweier Kältemittel ähnlich, ist davon auszugehen, dass die Bauteile hinsichtlich der mechanischen Belastung mit beiden Kältemitteln eingesetzt werden können (zusätzlich sind noch die Materialverträglichkeit sowie sicherheitsrelevante Aspekte zu beachten).

Volumetrische Kälteleistung

Die nach Gl. 1 ermittelte volumetrische Kälteleistung (q_0) eines Kältemittels bestimmt den für eine bestimmte Kühl- bzw. Heizleistung notwendigen Kältemittelvolumenstrom und gibt somit Aufschluss über die notwendige Größe der notwendigen Systemkomponenten (z.B. Sauggasvolumenstrom des Kompressors). Zur Auswertung werden die Stoffdaten Satttdampfdichte (ρ'') und Verdampfungsenthalpie bei konstantem Druck ($h'' - h'$) benötigt:

$$q_0 = \rho'' \cdot (h'' - h')|_{p=const.} \quad \text{Gl. 1}$$

5.1.4. Kältemittelsituation in Österreich

In Österreich sind konventionelle Kältemittel auf Basis von Fluorkohlenwasserstoffen (HFKW) noch weit verbreitet (KPC, 2020). Das am häufigsten verwendete Kältemittel ist R410A. Es wird von allen 36 WärmepumpenherstellerInnen (inkl. ImporteurInnen) in Österreich verwendet, deren

Wärmepumpen in der Liste der förderfähigen Wärmepumpen aufgeführt sind (KPC, 2020). Der Trend zu neuen Kältemitteln, die die herkömmlichen Kältemittel (siehe unten) ersetzen, ist jedoch bereits erkennbar: Acht WärmepumpenherstellerInnen bzw. -importeurlInnen verwenden R290 (Propan) in mindestens einem ihrer Wärmepumpenmodelle und vier WärmepumpenherstellerInnen bzw. -importeurlInnen haben Erfahrung mit R32, das als Ersatz für R410A Verwendung findet (siehe 5.1.5).

Tabelle 5-1 listet für insgesamt neun Kältemittel (inkl. GWP) die Anzahl an WärmepumpenherstellerInnen, welche Wärmepumpen mit dem jeweiligen Kältemittel anbieten, sowie die Anzahl von (förderfähigen) Wärmepumpen, die das jeweilige Kältemittel enthalten (Stand Januar 2020) (KPC, 2020). Das einzige Kältemittel mit einem GWP unter 150 ist Propan – R290. Vier weitere Kältemittel weisen ein GWP unter 750 auf: R32, R452B, R454B und R513A. Bisher kommt davon aber nur R32 in nennenswertem Ausmaß zum Einsatz.

Tabelle 5-1: Anzahl der HerstellerInnen und Modelle von in Österreich förderfähigen Wärmepumpen nach verwendeten Kältemitteln (basierend auf (KPC, 2020))

Kältemittel	GWP	Anzahl HerstellerInnen	Anzahl Modelle	davon:			
				Luft/ Wasser	Sole/ Wasser	Direktver- dampfer/ Wasser	Wasser/ Wasser
R134a	1430	6	29	0	21	0	8
R290	3	8	37	34	2	0	1
R32	675	4	96	90	6	0	0
R407C	1774	14	284	105	108	12	59
R410A	2088	36	1442	831	396	14	201
R449A	1397	1	2	2	0	0	0
R452B	698	1	2	2	0	0	0
R454B	466	1	5	5	0	0	0
R513A	631	1	1	1	0	0	0
Summe:		36	1898	1070	533	26	269

5.1.5. Alternativen zu derzeit eingesetzten Kältemitteln

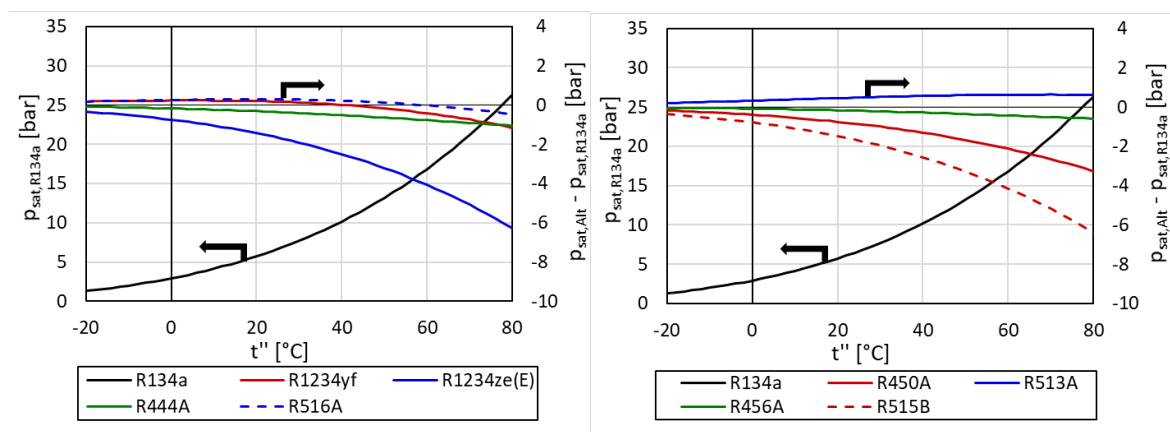
Eigenschaften von R134a und mögliche Alternativen

R134a (GWP = 1430) war eines der ersten chlorfreien HFKW-Kältemittel, das umfassend getestet wurde. Es wird für Verdampfungstemperaturen im Bereich von 0 °C und Kondensationstemperaturen von bis zu 85 °C eingesetzt. Zu den verfügbaren Alternativen zu R134a mit einem GWP < 150 gehören

die Kältemittel R1234yf (GWP = 4), R1234ze(E) (GWP = 7) und R516A (GWP = 142), die als A2L eingestuft sind. Eine Alternative (R444A, GWP = 92) befindet sich in Entwicklung (Bitzer, 2020). Die nicht entflammaren Optionen zeichnen sich durch deutlich höhere GWP-Werte aus, angefangen bei R515B (Solstice® N15, Honeywell (2020)) mit einem GWP von 293. R450A (Solstice® N13, Honeywell (2014), R513A (Opteon™ XP10, Chemours (2018)) und das sich in Entwicklung befindliche R456A (Bitzer, 2020) haben ein GWP im Bereich von 600-700.

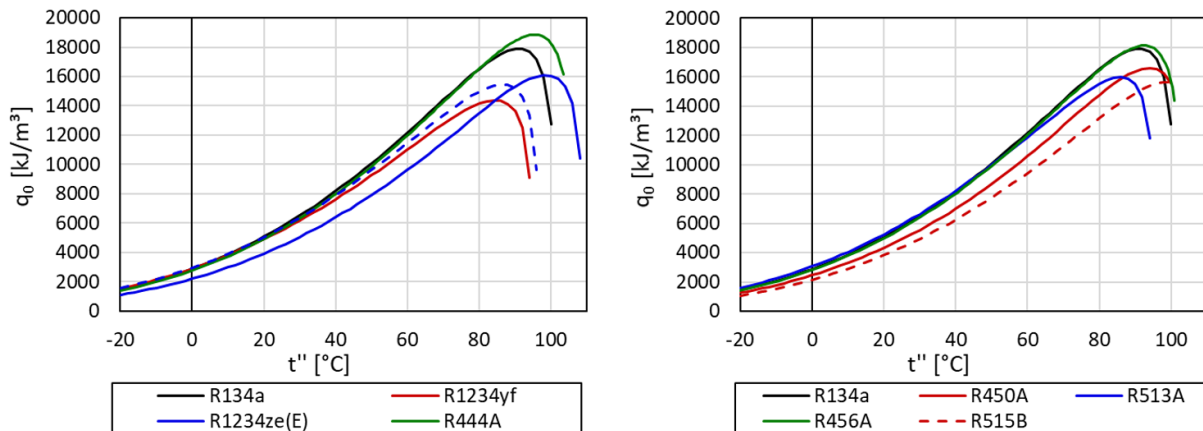
Hinsichtlich der Sättigungsdrücke ist bei den Alternativen zu R134a mit GWP < 150 in Abbildung 5-1 (links) zu erkennen, dass R1234yf, R444A und R516A ähnliche Sättigungsdrücke wie R134a aufweisen, während der Sättigungsdruck von R1234ze(E) deutlich niedriger ist. Bei den A1-klassifizierten Alternativen (siehe Abbildung 5-1 rechts) haben R513A und R456A ähnliche Drücke, während R450A und R515B niedrigere Drücke aufweisen.

Abbildung 5-1: Sättigungsdrücke von brennbaren Alternativen zu R134a mit GWP < 150 (links) und nicht brennbaren Alternativen (rechts). Stoffwerte für R134a, R1234yf, R1234ze(E), R450A, R513A aus Engineering Equation Solver (EES, 2019), Daten für R444A, R516A, R515B und R456A aus Refprop (Lemmon, 2018)



Die in Abbildung 5-2 dargestellten volumetrischen Kälteleistungen von R134a und Alternativen dazu zeigen ähnliche Werte für R134a, R1234yf und R444A (Abbildung 5-2 links) sowie für R134a, R513A und R456A (siehe Abbildung 5-2 rechts).

Abbildung 5-2: Volumetrische Kälteleistung von brennbaren Alternativen zu R134a mit GWP < 150 (links) und nicht brennbaren Alternativen (rechts). Stoffwerte für R134a, R1234yf, R1234ze(E), R450A, R513A aus EES (EES, 2019), Daten für R444A, R516A, R515B und R456A aus Refprop (Lemmon, 2018)

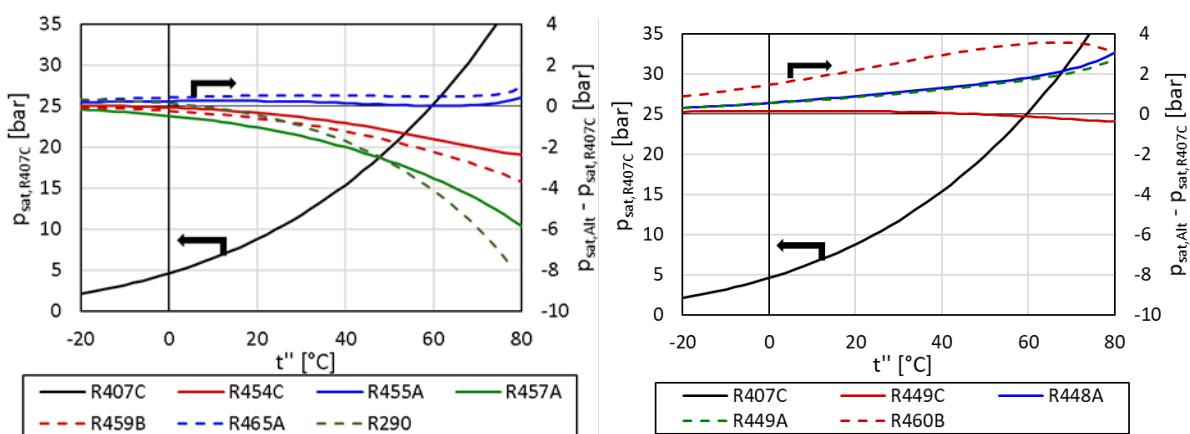


Eigenschaften von R407C und mögliche Alternativen

R407C (GWP = 1774) wird hauptsächlich in Wärmepumpen und Kälteanlagen zur Normalkühlung verwendet und zeichnet sich laut KKA (2011) durch einen relativ großen Temperaturgleit von 7,1 K bei 1 bar aus. Die Alternativen mit GWP-Werten unter 150, R454C (Opteon™ XL20, Chemours (2016)), R455A (Solstice® L40X, Honeywell (2017)), R457A (Arkema ARM-20a) und das 2018 als Entwicklungsprodukt gelistete R459B (Bitzer, 2018) sind brennbar (A2L). R465A (Arkema ARM-25) ist auch brennbar (A2) (Bitzer, 2020). R448A (Solstice® N40 (Honeywell, 2014)), R449A (Opteon™ XP40 (Chemours, 2018)), R449C (Opteon™ XP20 (Chemours, 2019)) und das sich in Entwicklung befindliche R460B (Bitzer, 2018) sind nicht brennbar, ihre GWP-Werte liegen jedoch im Bereich von 1300.

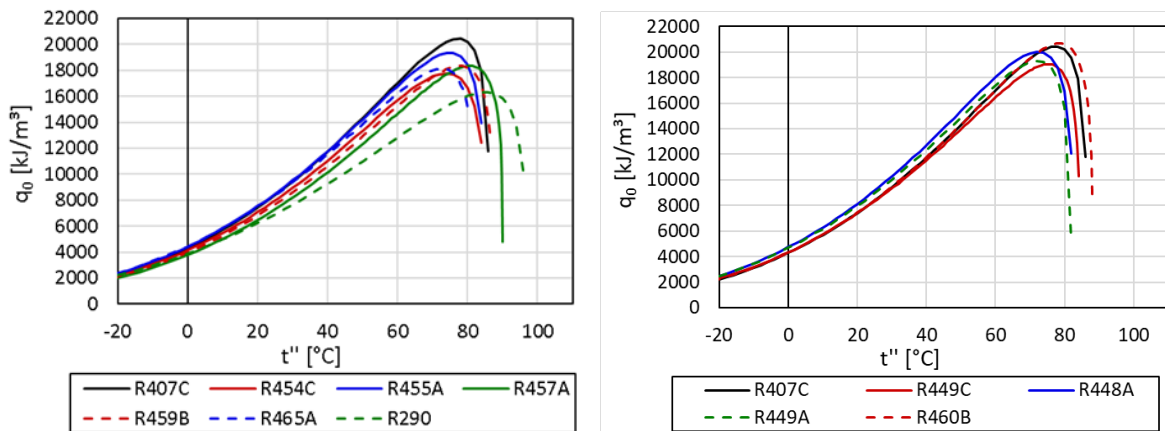
Hinsichtlich der Sättigungsdrücke der Alternativen zu R407C mit GWP < 150 (Abbildung 5-3) weisen R407C, R454C und R455A ähnliche Werte auf. Bei den nicht brennbaren Alternativen (Abbildung 5-3 rechts) zeigt R449C die beste Übereinstimmung mit R407C.

Abbildung 5-3: Sättigungsdrücke von brennbaren Alternativen zu R407C mit GWP < 150 (links) und nicht brennbaren Alternativen (rechts). Stoffwerte für R407C, R454C, R455A, R448A und R449A aus EES (EES, 2019), Daten für R457A, R459B, R465A, R460B und R449C aus Refprop (Lemmon, 2018)



Die in Abbildung 5-4 dargestellten volumetrischen Kälteleistungen zeigen mit Ausnahme von R290 (Abbildung 5-4 links) gute Übereinstimmung mit R407C.

Abbildung 5-4: Volumetrische Kälteleistung von brennbaren Alternativen zu R407C mit $GWP < 150$ (links) und nicht brennbaren Alternativen (rechts). Stoffwerte für R407C, R454C, R455A, R448A und R449A entnommen aus EES (EES, 2019), Daten für R457A, R459B, R465A, R460B und R449C entnommen aus Refprop (Lemmon, 2018)



Eigenschaften von R410A und mögliche Alternativen

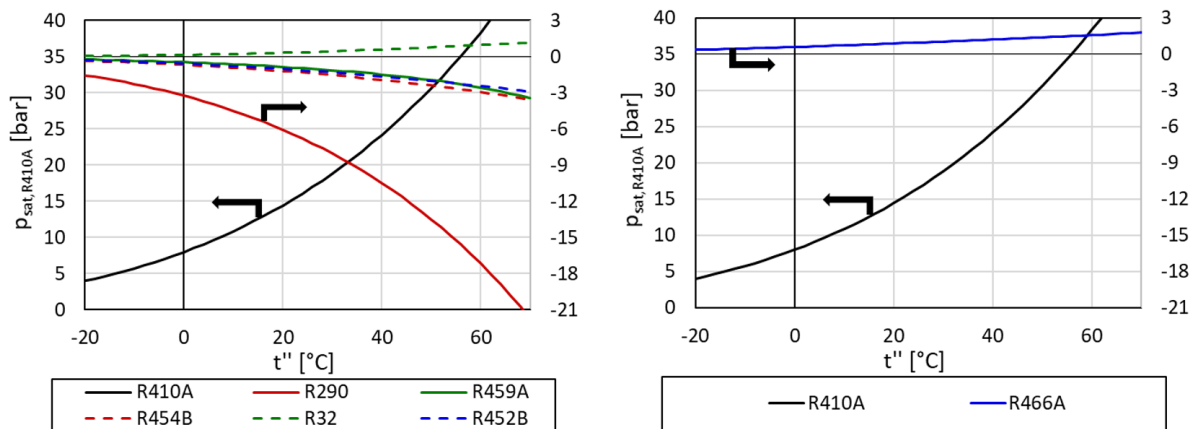
R410A ($GWP = 2088$) ist das in österreichischen Heizungswärmepumpen am häufigsten eingesetzte Kältemittel. Es ist ein nahezu azeotropes Gemisch aus 50% R32 und 50% R125 mit einem geringen Temperaturgleit (0,1 K). Die Einstufung in die Sicherheitsklasse A1 ermöglicht den Einsatz ohne weitere Sicherheitsmaßnahmen.

Außer R290 weist keines der derzeit infrage kommenden Ersatzkältemittel ein $GWP < 150$ auf. Die Kältemittel R454B (Opteon™ XL41, Chemours (2016)), R32 und R452B (Opteon™ XL55, Chemours (2016)) und Solstice® L41y, Honeywell (2018)) sowie R465A (Arkema ARM-25) gehören der Sicherheitsklasse A2L an und sind somit brennbar. R466A ist die einzige nicht brennbare Alternative, hat aber ein GWP von ca. 700. R290 (Propan) ist mit einem GWP von 3 das einzige Kältemittel mit niedrigem GWP , aber es ist als A3 eingestuft. Im Bericht von Bitzer (Bitzer, 2018) wird über die Anwendung von R290 in kleinen Klimaanlage und Wärmepumpen mit eher geringen Leistungen berichtet. Aufgrund seiner Entflammbarkeit müssen strengere Füllmengenbegrenzungen, Sicherheitsmaßnahmen für elektrische Anlagen und Anforderungen an den Aufstellungsort berücksichtigt werden.

Die in Abbildung 5-5 dargestellten Sättigungsdrücke der Alternativen Kältemittel im Vergleich zu R410A zeigen mit Ausnahme von R290 ähnliche Werte wie R410A.

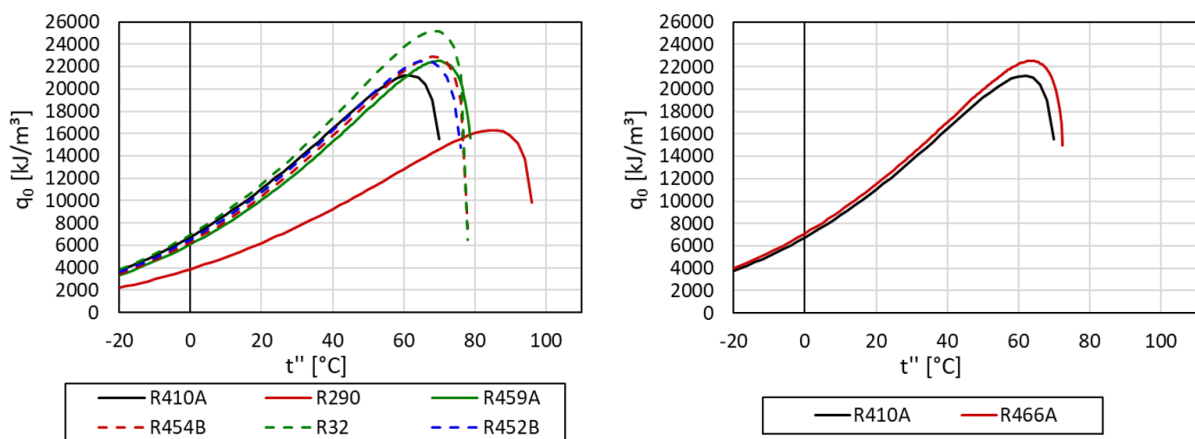
Abbildung 5-5: Sättigungsdrücke von brennbaren Alternativen zu R410A mit $GWP < 150$ (links) und der nicht brennbaren Alternative R466A (rechts). Stoffwerte für R410A, R290, R454B, R32

und R452B entnommen aus EES (2019), Daten für R466A und R459A aus Refprop (Lemmon, 2018)



Auch bei den in Abbildung 5-6 dargestellten volumetrischen Kälteleistungen zeigen die Alternativen Kältemittel mit Ausnahme von R290 ähnliche Werte wie R410A.

Abbildung 5-6: Volumetrische Kälteleistungen von brennbaren Alternativen zu R410A mit GWP < 150 (links) und der nicht brennbaren Alternative R466A (rechts). Stoffwerte für R410A, R290, R454B, R32 und R452B aus EES (EES, 2019), Daten für R466A und R459A aus Refprop (Lemmon, 2018)



5.2. Forschungsprojekte zu Low-GWP-Kältemitteln

Nachfolgend wird eine Übersicht über nationale Forschungsprojekte, die sich direkt oder indirekt mit Wärmepumpen mit Low-GWP-Kältemittel befassen, gegeben.

Aufgrund des ökologischen Ansatzes des Forschungsprojekts **GreenHP** (EC, 2016) wurde in der im Rahmen des Projekts entwickelten 30-kW-Luft/Wasser-Wärmepumpe das Kältemittel R290 (GWP=3) verwendet. GreenHP befasste sich mit der Integration von Wärmepumpen in bestehende Gebäude in städtischen Gebieten, wobei die Wärmepumpen mit bereits bestehenden Heizsystemen kompatibel sein sowie niedrige Installations- und Betriebskosten aufweisen mussten. Ein wichtiger Forschungsschwerpunkt lag auf der Kältetechnik der Anlagen: Aufgrund der Entflammbarkeit von R290 wurde die Kältemittelmenge u.a. durch die Entwicklung innovativer Verdampfer und

Verflüssiger auf 65 g pro kW thermischer Leistung reduziert. Die Energieeffizienz wurde durch hocheffizientes Wärmetauscher- und Ventilator-Design sowie durch die Nutzung eines modulierenden Scrollverdichter-Prototyps mit sog. Enhanced Vapour Injection (EVI) optimiert. So konnte ein SCOP von 3,3 für mittleres Klima und 55°C Anwendung erreicht werden (Zottl, 2016).

Im österreichischen F&E-Projekt **eco2jet** (IESTA, 2017) wurde eine Wärmepumpe für den Einsatz in Schienenfahrzeugen entwickelt. Das Institut für Wärmetechnik ist ein Partner des Projektkonsortiums.

Im Rahmen der Projekte **HotCycle** (FFG Nr.: 848892) (Moisi et al., 2018) und **TransCrit** (FFG Nr.: 865083) (Rieberer et al., 2021) wurde der Einsatz von R600 in Hochtemperaturwärmepumpen untersucht. R600 zeichnet sich durch einen niedrigen GWP-Wert von 4 aus und gilt hinsichtlich der Zersetzungsprodukte bei der Freisetzung in die Atmosphäre als unproblematisch. Aufgrund seiner Entflammbarkeit gehört R600 zur Sicherheitsklasse A3, die zusätzlichen Maßnahmen zum Schutz vor Brand- und Explosionsgefahren erfordert.

5.3. R290 (Propan) als Alternative zu R410A

Da R290 das einzige Low-GWP-Kältemittel „im engeren Sinne“ ($GWP < 150$) am österreichischen Wärmepumpenmarkt und R410A das derzeit in österreichischen Wärmepumpen am häufigsten eingesetzte Kältemittel ist, fokussiert der österreichische Beitrag auf die Thematik des Ersatzes von R410A durch R290 in künftig hergestellten Heizungswärmepumpen (d.h. kein Ersatz in Bestandsanlagen).

R290 ist ein natürliches Kältemittel mit einem vernachlässigbaren GWP von 3. Aufgrund der hohen Entflammbarkeit (Schutzklasse A3) müssen Sicherheitsmaßnahmen berücksichtigt werden. Laut Bitzer (Bitzer, 2018) sind Kälteanlagen mit R290 seit vielen Jahren weltweit in Betrieb, vor allem im industriellen Bereich. Mittlerweile wird R290 auch in kleineren Kompaktanlagen (Klimageräte, Wärmepumpen) mit geringerer Kältemittelfüllung eingesetzt. Auch in gewerblichen Kälteanlagen und Kältemaschinen wird es immer häufiger eingesetzt.

Ausgehend von den thermodynamischen und sicherheitsspezifischen Anforderungen bei der Verwendung von R290 werden in diesem Abschnitt mögliche Anpassungen des Kältekreislaufes und Strategien zur Reduzierung der Kältemittelfüllmenge zusammengefasst.

5.3.1. Vergleich von R410A und R290

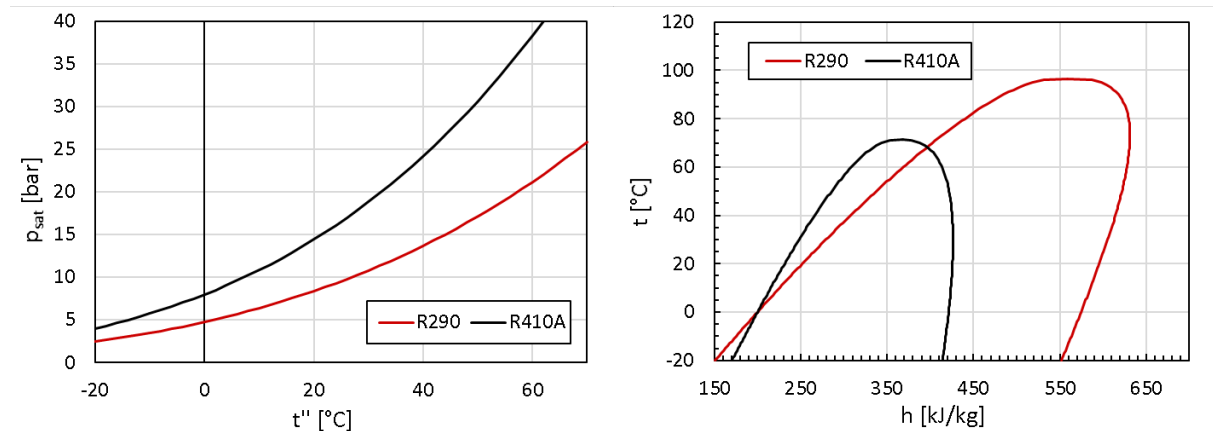
Die wichtigsten Unterschiede zwischen R290 und R410A sind die hohe Entflammbarkeit von R290 (Sicherheitsklasse A3) im Vergleich zum nicht entflammaren R410A (A1) und die deutlich geringere volumetrische Kälteleistung von R290 (siehe Abbildung 5-8). Um die gleiche Heizleistung zu erreichen, benötigt eine Wärmepumpe mit R290 daher einen Verdichter mit größerem Sauggasvolumenstrom. Außerdem müssen die Durchmesser der Kältemittelleitungen größer sein, wenn ähnliche Strömungsgeschwindigkeiten angestrebt werden.

Thermodynamischer Vergleich zwischen R290 und R410A

In Abbildung 5-7 (links) ist der Sättigungsdruck von R290 und R410A in Abhängigkeit von der Taupunkttemperatur dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Druckniveau von R290 deutlich

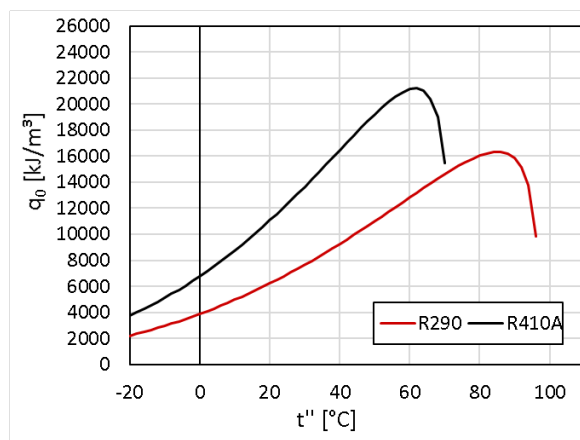
niedriger ist als von R410A. Dies spiegelt sich auch in den unterschiedlichen kritischen Werten wider: $p_{krit} = 42,5 \text{ bar}$, $t_{krit} = 96,7 \text{ °C}$ für R290 und $p_{krit} = 49 \text{ bar}$, $t_{krit} = 71,3 \text{ °C}$ für R410A. Der Vergleich der t/h -Diagramme der beiden Kältemittel in Abbildung 5-7 (rechts) zeigt die höhere Verdampfungsenthalpie von R290 und den bereits erwähnten Unterschied in den kritischen Temperaturen.

Abbildung 5-7: Sättigungsdruck in Abhängigkeit von der Taupunkttemperatur (links) und t/h-Diagramme (rechts) der Kältemittel R290 und R410A. Eigenschaftsdaten entnommen aus (EES, 2020)



Die nach Gl.1 berechnete volumetrische Kälteleistung von R290 und R410A ist in Abbildung 5-8 dargestellt, wobei deutlich geringere Werte für R290 ersichtlich sind.

Abbildung 5-8 : Volumetrische Kälteleistungen von R290 und R410A in Abhängigkeit der Taupunkttemperatur, Daten entnommen aus (EES, 2020)



Zum Vergleich der Eigenschaften von Wärmeübergang und Druckabfall können aus bekannten Korrelationen Kennzahlen abgeleitet werden. Die Dittus-Boelter-Korrelation für den einphasigen Wärmeübergang (α_{sp}) nach Gl. 2 kann so umgerechnet werden (Gl. 3), dass die Kennzahl für den einphasigen Wärmeübergang (F_α) in Gl. 4 nur noch von den Kältemiteleigenschaften Prandtl-Zahl (Pr), Wärmeleitfähigkeit (k) und dynamische Viskosität (μ) abhängig ist. Re bezeichnet die Reynoldszahl, d den Durchmesser des betrachteten Rohrs und G den Kältemittelmassenstrom.

$$\alpha_{SP} = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \cdot k \cdot d^{-1} \quad \text{Gl. 2}$$

$$\alpha_{SP} = F_{\alpha} \cdot G^{0.8} \cdot d^{0.2} \quad \text{Gl. 3}$$

$$F_{\alpha} = 0.023 \cdot Pr^{0.4} \cdot k \cdot \mu^{-0.8} \quad \text{Gl. 4}$$

Ein ähnlicher Ansatz kann verfolgt werden, ausgehend vom Druckabfall (Δp_{SP}) in der turbulenten Einphasenströmung nach Blasius (Gl. 5), wobei L die Länge des betrachteten Rohrs bezeichnet. Durch Umformen (Gl. 6) ergibt sich die Kennzahl für den einphasigen Druckabfall ($F_{\Delta p}$) in Gl. 7, die nur von den Kältemiteleigenschaften spezifisches Volumen (v) und dynamische Viskosität (μ) abhängt.

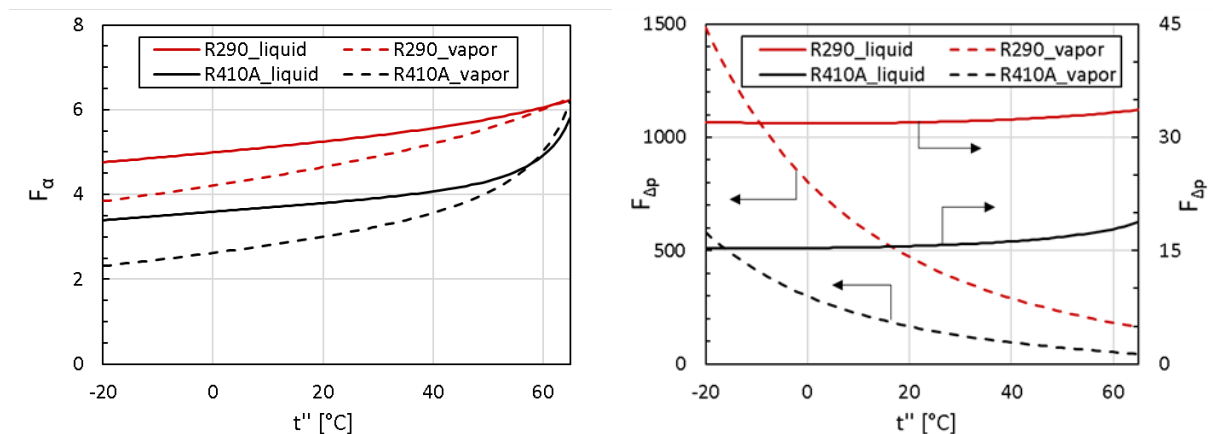
$$\Delta p_{SP} = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{G^2 \cdot v}{2} \quad \text{Gl. 5}$$

$$\Delta p_{SP} = F_{\Delta p} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{G^{1.75} \cdot L}{d^{1.25}} \quad \text{Gl. 6}$$

$$F_{\Delta p} = 0.1582 \cdot 10^6 \cdot v \cdot \mu^{0.25} \quad \text{Gl. 7}$$

Diese Kennzahlen werden für die flüssige und die dampfförmige Phase getrennt berechnet. Der Wärmeübergang ist in Abbildung 5-9 (links) und der Druckabfall in Abbildung 5-9 (rechts) dargestellt. Was den Wärmeübergang betrifft, so weisen die höheren Werte für R290 auf bessere Wärmeübertragungseigenschaften als R410A hin. Dies wirkt sich in der Praxis durch eine kleinere erforderliche Wärmeübertragungsfläche bei bestimmter Last aus. Betrachtet man den Druckverlust, so weisen die höheren Werte für R290 auf einen höheren Druckverlust hin, der einen größeren Durchmesser der Kältemittelleitungen erforderlich macht.

Abbildung 5-9: Vergleich der Wärmeübertragungseigenschaften (links) und der Druckverlusteigenschaften (rechts) in Abhängigkeit der Taupunkttemperatur von R290 und R410A. Stoffdaten aus (EES, 2020)



Maximale Füllmengen lt. Norm

Die Bestimmung der maximalen Kältemittelfüllmenge von Wärmepumpen ist in erster Linie in folgenden Normen geregelt:

- IEC 60335-2-40: Elektrische Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke - Sicherheit; Teil 2-40: Besondere Anforderungen an elektrische Wärmepumpen, Klimageräte und Luftentfeuchter
- EN 378: Kälteanlagen und Wärmepumpen - Sicherheits- und Umwelanforderungen

Laut diesen Normen errechnet sich die maximale Füllmenge aus verschiedenen Parametern. Für Wärmepumpen, die im Außenbereich aufgestellt sind, wird keine Füllmengenbegrenzung angegeben. Für Wärmepumpen, die in Innenräumen aufgestellt sind, hängt die maximale Füllmenge im Wesentlichen von der Art des Aufstellungsraums, vom Raumvolumen und der Belüftungsart des Aufstellungsraumes ab. Als absoluter Maximalwert ergibt sich für R290 unter gewissen Voraussetzungen eine maximale Füllmenge von bis zu 5 kg. Ohne besondere Vorkehrungen des Aufstellungsraumes (eine minimale Raumgröße muss gegeben sein) ist bei Beachtung konstruktiver Vorschriften eine Füllmenge von 150 g zulässig (Rath et al., 2020).

Öl und Materialkompatibilität

Der Verdichterhersteller Bitzer stellt technische Informationen für den Einsatz von R290 in seinen halbhermetischen Verdichtern zur Verfügung (Bitzer, 2020) und gibt folgende Hinweise: R290 ist in Kombination mit gängigen Metallen und Elastomeren unkritisch. Zink und Legierungen mit Magnesiumgehalten über 2% sollten vermieden werden. Die außerordentlich hohe Löslichkeit in Schmierstoffen verringert die Ölviskosität im Verdichter. Dies kann zu einem starken Ausgasungseffekt im Ölsumpf und zu unzureichender Schmierung bei Druckabfall, Schaumbildung und verminderter Leistung sowie starkem Verschleiß führen. Aus diesem Grund sollte Öl mit ausreichend hoher Viskosität verwendet werden, die Kältemittelfüllung sollte so niedrig wie möglich sein und der Einbau einer Ölsumpfheizung wird empfohlen. Es ist auf eine ausreichend hohe Sauggasüberhitzung zu achten, die Verdichteraustrittstemperatur muss bei Kolbenverdichtern mindestens 20 K und bei Kompaktschraubenverdichtern 30 K über der Kondensationstemperatur liegen.

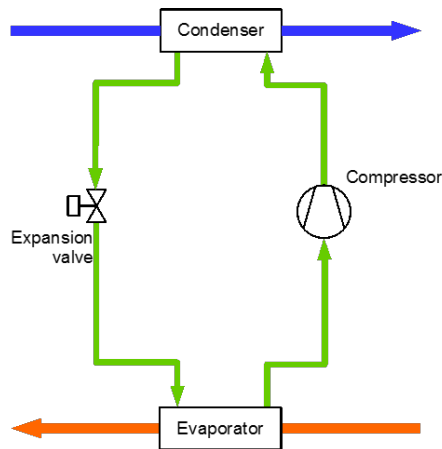
5.3.2. Anpassungen am Kältekreis

Die Auslegung des Kältekreises hat Einfluss auf die Effizienz der Wärmepumpe und weitere wichtige Aspekte. In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse des Vergleichs von den im Folgenden beschriebenen drei R290-Kältekreisläufen mit thermodynamischen Simulationen, die im Rahmen von IEA HPT Annex 50 durchgeführt wurden, vorgestellt (Zottl, 2020).

Single-Stage

Der einstufige Kältekreislauf stellt den einfachsten Aufbau und die einfachste Regelung des Kältekreises dar (siehe Abbildung 5-10).

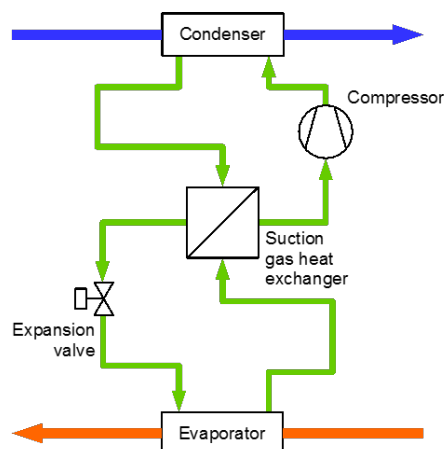
Abbildung 5-10: Einstufiger Kältekreislauf mit englischer Beschriftung: "Compressor" = Verdichter "Condenser" = Verflüssiger (=), „Expansion valve" = Expansionsventil, "Evaporator" = Verdampfer (Zottl, 2020)



iHX (interner Wärmetauscher)

Der Sauggaswärmetauscher überhitzt das Sauggas und unterkühlt gleichzeitig das flüssige Kältemittel aus dem Verflüssiger, bevor das Sauggas in den Verdichter eintritt (siehe Abbildung 5-11). Da R290 für einen sicheren Verdichterbetrieb eine erhebliche Überhitzung erfordert, ist der Einsatz des iHX eine gute Option.

Abbildung 5-11: Kältekreislauf mit iHX mit englischer Beschriftung: "Compressor" = Verdichter "Condenser" = Verflüssiger, „Expansion valve" = Expansionsventil, "Evaporator" = Verdampfer, "Suction gas heat exchanger" = interner Wärmetauscher (Zottl, 2020)



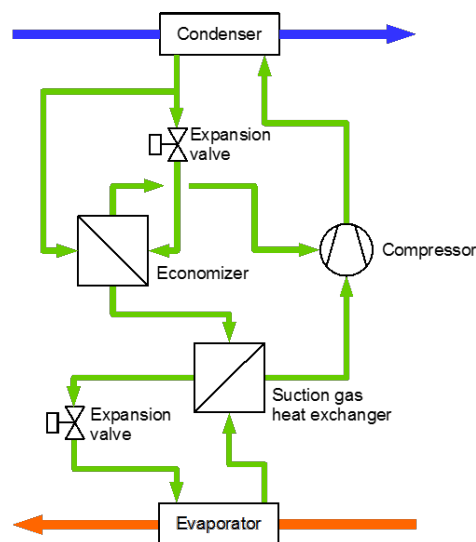
EVI (enhanced vapour injection)

Kältekreisläufe mit EVI (siehe Abbildung 5-12) sind mit einem zweistufigen Verdichter mit einem Einspritzanschluss, einem zweiten Expansionsventil und einem Economizer ausgestattet. Ein Teil des Kältemittels wird im ersten Expansionsventil auf Verdampfungsdruck und ein anderer Teil im zweiten

Expansionsventil auf Zwischendruckniveau entspannt. Der Kältemittelanteil auf Zwischendruckniveau wird im Economizer verdampft und gelangt über den Einspritzanschluss in den Verdichter.

Je nach vorliegendem Druckverhältnis wird die spezifische Verdichterarbeit reduziert. Die Einspritzung in den Verdichter auf Zwischendruckniveau führt zu einer Absenkung der Verdichter-Austrittstemperatur, was der Lebensdauer des Schmiermittels zugutekommt (Zottl, 2020).

Abbildung 5-12: Kältekreis mit EVI mit englischer Beschriftung: "Compressor" = Verdichter mit Heißgaseinspritzung "Condenser" = Verflüssiger, „Expansion valve" = Expansionsventil, "Evaporator" = Verdampfer, "Suction gas heat exchanger" = interner Wärmetauscher, „Economizer" = Verdampfer auf Zwischendruckniveau (Zottl, 2020)



5.4. Simulationsstudie zur Umrüstung auf R290

In diesem Abschnitt werden die Maßnahmen zur Anpassung einer R410A-Luft/Wasser-Wärmepumpe für die Nutzung von R290 mittels Simulation untersucht. Zur Modellierung der Wärmepumpe wird das Modelica-basierte Softwarepaket TIL Suite (TLK-Thermo, 2020) in der Simulationsumgebung Dymola verwendet. Detaillierte Informationen zum Aufbau des Simulationsmodells sind im Nationalen Task 2-Bericht (Verdnik et al., 2022) zusammengefasst.

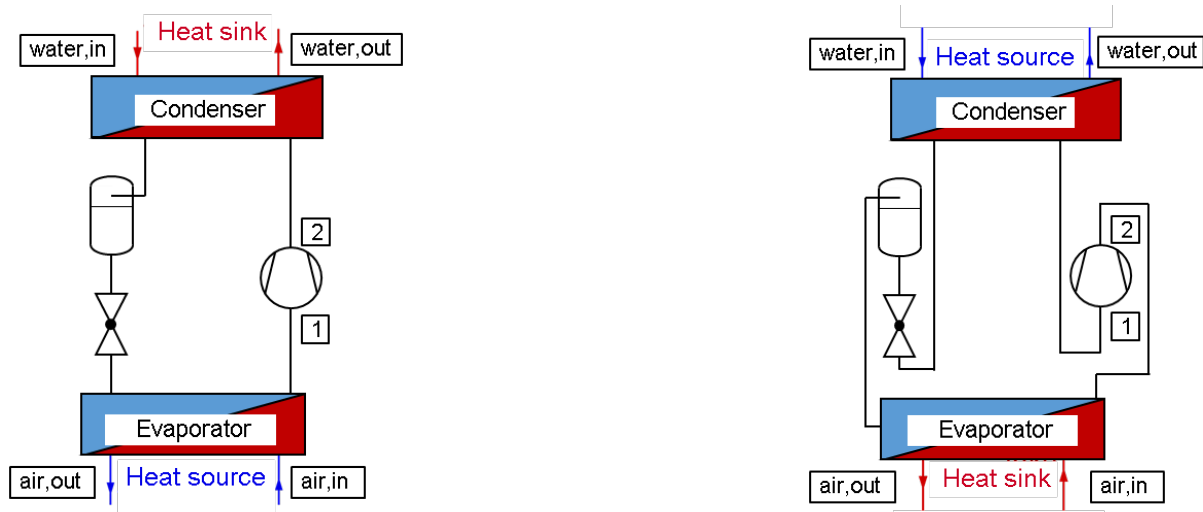
In einem ersten Schritt wird das R410A-Basissystem untersucht. Um die notwendigen Anpassungen aufgrund der unterschiedlichen thermodynamischen Eigenschaften aufzuzeigen, wird das System anschließend ohne Anpassungen bei der Verwendung von R290 analysiert. Im letzten Schritt werden die Komponenten für R290 und die Reduzierung der Kältemittelfüllung optimiert. Die Spezifikationen des Systems sowie die verbesserte Verdampfergeometrie beruhen auf den Ergebnissen des europäischen Forschungsprojekts GreenHP (Zottl, 2016).

5.4.1. Kältekreis

In Abbildung 5-13 ist der Kältekreis der Wärmepumpe dargestellt. Der einstufige Kreislauf ist mit einem Hochdruck-Sammler ausgestattet, die Kältemittelüberhitzung von 5 K am Verdampferaustritt

wird durch das Expansionsventil geregelt. In Abbildung 5-13 (links) ist der Kältekreis im Heizbetrieb dargestellt. Um das Abtauen des Verdampfers zu untersuchen, wird der Kreislauf umgekehrt, wie in Abbildung 5-13 (rechts) dargestellt.

Abbildung 5-13: Kältekreis der Wärmepumpe im Heizbetrieb (links) und in der Abtaukonfiguration (rechts) mit englischer Beschriftung: „Heat sink“ = Wärmesenke, "water,in" = Wärmesenkeneintritt, "water,out" = Wärmesenkenaustritt, "Condenser" = Verflüssiger, "Evaporator" = Verdampfer, „Heat source“ = Wärmequelle, "air,in" = Wärmequelleneintritt, "air,out" = Wärmequellenaustritt



Der Verdichter wird nach dem Effizienzansatz modelliert, wobei der volumetrische Wirkungsgrad, der isentrope Gesamtwirkungsgrad und der innere isentrope Wirkungsgrad als Funktion des Druckverhältnisses vorgegeben wurden. Die Wärmetauscher werden mit der Finite-Volumen-Methode modelliert. Als Kondensator wird in allen Konfigurationen ein Plattenwärmeübertrager verwendet. Volumina der Ein- und Auslässe werden bei der Berechnung der Kältemittelmasse nicht berücksichtigt.

Der Wärmeübergang wird anhand von der TIL-Suite hinterlegten Korrelationen berechnet (basierend auf Longo et al. (2015) für die Kältemittelseite und Martin (2010) für die Wasserseite), der Druckverlust im Kondensator wird vernachlässigt.

5.4.2. Auslegungspunkt und untersuchte Betriebsbedingungen

Die Wärmepumpe wird in vier Betriebspunkten im Heizbetrieb untersucht. Um den Abtaubetrieb zu untersuchen, wird der Zyklus gemäß Abbildung 5-13 (rechts) umgedreht. In Tabelle 5-2 sind die Wärmequellen- und Wärmesenken-Temperaturen der untersuchten Betriebspunkte aufgeführt, die Heizleistung von 30 kW wird durch Anpassen der Verdichterdrehzahl innerhalb der zulässigen Grenzen eingestellt. Die Dimensionierung des Verdampfers ermöglicht eine Verdampfungstemperatur von -17 °C im Auslegungspunkt. Als Medium für die Umgebungsluft wird trockene Luft verwendet.

Tabelle 5-2: Simulierte Betriebspunkte

Betriebspunkt	Wärmequelle (Luft) Eintritt/Austritt	Wärmesenke (Wasser) Eintritt/Austritt
H1 (Auslegung)	-10/-15 °C	47/55 °C
H2	-8,3/-9,4 °C	30/35 °C
H3	1,7/0,6 °C	30/35 °C
H4	8,3/6,1 °C	30/35 °C
DF (Abtauen)	35/30 °C (Heizkreislauf)	-5/40 °C (Umgebungsluft)

5.4.3. Grundlegendes R410A-System

Das Basissystem verwendet einen Scrollverdichter mit einer Verdrängung von 24,8 m³/h bei 2.900 min⁻¹. Die verwendeten Wirkungsgradkurven wurden aus Herstellerangaben (Bitzer, 2021) berechnet. Als Kondensator kommt ein Plattenwärmetauscher zum Einsatz, der Verdampfer ist als Lamellen-Rohr-Wärmetauscher ausgeführt, bei dem die Volumina für Verteiler und Umlenkrohre basierend auf Annahmen berücksichtigt wurden.

Die Kältemittelmasse im Verdampfer, im Kondensator und pro Meter der Flüssigkeitsleitung sowie die Verdichterdrehzahl, die Heizleistung und der erreichte COP des R410A-Systems sind in Tabelle 5-3 aufgeführt. Für die Kältemittelmasse im Verdampfer ist in Klammern die angenommene Masse des Kältemittels im Verteiler und in den Sammlern angegeben. Das R410A-Basissystem erreicht Leistungszahlen zwischen 2,10 und 5,14. Hinsichtlich der Kältemittelmasse ist festzustellen, dass das große Innenvolumen des Verdampfers zu einer hohen Kältemittelmasse von über 5 kg in diesem Bauteil während des Abtaubetriebs führt. Da der im Kältekreis installierte Sammler (siehe Abbildung 5-13) als Puffer fungiert, um genügend Kältemittel für alle Betriebsbedingungen bereitzustellen, muss der Sammler diese zusätzliche Kältemittelfüllung aufnehmen. Darüber hinaus ist zu beachten, dass in der vorliegenden Studie nur die Kältemittelfüllung im Verdampfer und Kondensator untersucht wird. Um die Kältemittelfüllung in der Flüssigkeitsleitung zu berücksichtigen, wird die Masse des Kältemittels pro Meter Flüssigkeitsleitung angegeben. Das Kältemittel im Innenvolumen des Verdichters und das im Verdichteröl gelöste Kältemittel, das die Kältemittelfüllung des Systems weiter erhöhen würde, wurde nicht berücksichtigt.

Tabelle 5-3: Ergebnisse für das grundlegende R410A-System (*Heizleistung > 30kW)

Betriebspunkt	Kältemittelmenge (R410A) im			Kompressor-drehzahl [min ⁻¹]	Heizleistung [kW]	COP [-]
	Verdampfer (wovon Verteiler und Sammler) [kg]	Konden-sator [kg]	1m Flüssigkeits-leitung (d _i =16 mm) [kg]			
H1	1,26 (0,61)	0,55	0,17	3610	30,0	2,10
H2	1,30 (0,60)	0,47	0,20	3150	30,0	3,45

H3	1,59 (0,58)	0,47	0,20	2335	30,0	4,38
H4*	2,00 (0,57)	0,48	0,20	2030 (min)	31,2	5,14
DF (Abtauung)	5,42 (0,48)	0,16	0,22	2900	N/A	N/A

5.4.4. Erforderliche Änderungen für die Verwendung von R290 im Vergleich zu R410A

Um die notwendigen Änderungen zur Anpassung des Kältekreislaufes an R290 zu demonstrieren, werden die Folgen eines alleinigen Wechsels des Kältemittels auf R290 ohne jegliche Änderungen am R410A-System dargestellt. Tabelle 5-4 listet die Kältemittelmasse in den untersuchten Komponenten, die Kältemittelströmungsgeschwindigkeit in der Saugleitung, die Verdichterdrehzahl und die erreichte Heizleistung auf. Auf eine Auswertung des COP wurde in diesem Fall verzichtet, da der verwendete Verdichter für R290 nicht verfügbar ist. Da die Kältemittelfüllung entscheidend für die notwendigen Sicherheitsmaßnahmen ist und die Kältemittelmasse im Verdampfer während des Abtaubetriebs mit fast 2 kg bewertet wird, werden Maßnahmen zur Füllungsreduzierung an dieser Komponente untersucht.

Tabelle 5-4: Ergebnisse des nicht angepassten R410A-Systems mit R290 (*Heizleistung < 30 kW)

Betriebspunkt	Kältemittelmenge (R290) im			Strömungsgeschwindigkeit in Saugleitung [m/s]	Kompressor-drehzahl [min ⁻¹]	Heizleistung [kW]
	Verdampfer (wovon Verteiler und Sammler) [kg]	Kondensator [kg]	1m Flüssigkeitsleitung (d _i =16 mm) [kg]			
H1*	0,50 (0,27)	0,23	0,09	19	4350 (max)	20,6
H2*	0,55 (0,27)	0,20	0,09	20	4350	23,5
H3	0,62 (0,26)	0,20	0,09	19	4020	30,0
H4	0,75 (0,25)	0,20	0,09	16	3370	30,0
DF (Abtauung)	1,94 (0,23)	0,05	0,10	14	2900	N/A

Neben den unterschiedlichen Sicherheitsanforderungen haben die unterschiedlichen thermodynamischen Eigenschaften folgende Konsequenzen:

- Die Verwendung von R290 führt zu einer deutlich geringeren Kältemittelmasse in den untersuchten Komponenten im Vergleich zu R410A.
- Die Heizleistung ist deutlich geringer, selbst bei der maximalen Verdichterdrehzahl von 4350 min⁻¹ werden im Betriebspunkt H1 nur 21 kW erreicht. Dies ist auf die geringere

volumetrische Kälteleistung (Heizleistung) von R290 im Vergleich zu R410A zurückzuführen, wie in Abbildung 5-8 zu erkennen ist.

- Der höhere Volumenstrom von R290 aufgrund der geringeren volumetrischen Kälteleistung erfordert im Vergleich zu R410A größere Rohrleitungsdurchmesser, wenn ähnliche Kältemittelflussgeschwindigkeiten angestrebt werden.
- Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der Kältemittel muss die Dimensionierung des Expansionsgeräts sorgfältig überprüft werden.

5.4.5. Reduktion der Kältemittelfüllmenge

Die hinsichtlich der Kältemittelfüllmenge signifikanteste Änderung betrifft die Verwendung eines MPE-Wärmetauschers (Multi-Port Extruded Tube) als Verdampfer. Die Volumina in Verteilern und Sammlern wurde basierend auf Annahmen berücksichtigt. Um die Nennheizleistung zu erreichen, wird ein Verdichter mit größerem Hubraum verwendet. Die Kompressorwirkungsgrade wurden mit Herstellerangaben (Bitzer, 2021) für R134a ausgewertet, da für R290 keine Daten verfügbar waren.

Tabelle 5-5 listet die Kältemittelmasse in den untersuchten Komponenten, die Verdichterdrehzahl, die Heizleistung und den COP des füllungsoptimierten R290-Systems auf.

Tabelle 5-5: Ergebnisse des verbesserten R290 Systems

Betriebspunkt	Kältemittelmenge (R290) im			Kompressordrehzahl [min ⁻¹]	Heizleistung [kW]	COP [-]
	Verdampfer (wovon Verteiler und Sammler) [kg]	Kondensator [kg]	1m Flüssigkeitsleitung (d _i =16 mm) [kg]			
H1	0,31 (0,22)	0,20	0,09	2335	30,0	2,54
H2	0,31 (0,22)	0,20	0,09	1610	30,0	3,62
H3	0,34 (0,21)	0,20	0,09	1130	30,0	4,41
H4*	0,38 (0,21)	0,20	0,09	937	30,0	5,05
DF (Abtauung)	1,30 (0,18)	0,05	0,10	1450	N/A	N/A

Die Verwendung eines MPE-Verdampfers ermöglicht die Reduzierung der Kältemittelmasse im Bauteil von 0,75 auf 0,38 kg im Heizbetrieb und von 1,94 auf 1,30 kg im Abtaubetrieb im Vergleich zur Basis-Variante (Lamellen-Rohr-Wärmetauscher) (siehe Tabelle 5-4). Eine Alternative zur Umkehrung des Kältekreislaufes für die Abtauung wäre eine Heißgasabtauung. Dadurch könnte die Kältemittelmasse im Verdampfer während der Abtauung noch weiter reduziert werden.

Die erreichten Leistungszahlen liegen im Bereich zwischen 2,54 und 5,05. Im Vergleich zum R410A-System (siehe Tabelle 5-3) erreicht das R290-System einen höheren COP bei großen Temperaturhüben (Arbeitspunkt H1), während das R410A-System einen etwas höheren COP bei niedrigen Temperaturhüben (Arbeitspunkt H4) aufweist.

5.5. LCCP-Reduktion durch Umstieg auf R290

In diesem Kapitel werden die Auswirkungen des in 5.4 simulierten Umstiegs von R410A (Basissystem) auf R290 (optimiertes R290-System) auf die Life Cycle Climate Performance (LCCP) (Lebenszyklus-Klimaperformanz) beschrieben. Detaillierte Informationen zur Umsetzung der LCCP-Analysen sind im Nationalen Task 3-Bericht (Natiesta et al., 2023) zusammengefasst.

Die LCCP-Analyse ist eine Methode zur Bewertung der Menge an Treibhausgasen, die während der Lebensdauer eines Systems erzeugt und freigesetzt werden. Dabei werden alle Emissionen von der Herstellung über die Laufzeit bis zur Entsorgung berücksichtigt.

Die anfallenden Emissionen werden in direkte und indirekte Emissionen unterteilt. In der LCCP-Analyse werden einzelne Emissionsanteile getrennt berechnet und zum Schluss zur LCCP aufsummiert.

- Direkte Emissionen: Dazu gehören die jährlichen Kältemittelverluste durch Leckagen während des Betriebs der Anlage, die Verluste bei der Entsorgung am Ende des Lebenszyklus und die Reaktionsprodukte aus dem endgültigen Abbau des Kältemittels.
- Indirekte Emissionen: Zu den indirekten Emissionen gehören die Emissionen, die durch die Nutzung der Anlage während ihrer Lebensdauer freigesetzt werden. Dazu gehören Emissionen durch den Stromverbrauch der Anlage, aber auch Emissionen aus der Geräteherstellung/-Entsorgung und der Kältemittelherstellung.

Die LCCP hängt von zahlreichen Inputparametern in Bezug auf Klimadaten, Strommix und weiteren Faktoren ab. Für die LCCP-Berechnungen müssen zahlreiche Annahmen getroffen werden. Diese empirisch ermittelten Werte sind somit mit einem gewissen Maß an Unsicherheit behaftet. Daher sind die berechneten LCCP-Werte nicht als exakte Vorhersage zu verstehen, sondern eher als ein Vergleichswert für verschiedene Systeme (Hwang et al., 2016).

Die häufig verwendete TEWI-Berechnungsmethode baut auf dem gleichen Berechnungsschema auf, lässt jedoch die Emissionen bei Herstellung und Recyclen unberücksichtigt.

5.5.1. LCCP-Berechnungsmethode

Die Berechnungen der LCCP liefern Werte in kg CO_{2e} (CO₂-Äquivalent) oder kg CO_{2e}/kWh. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, müssen die auf Annahmen basierenden Eingabewerte für zu vergleichende Systeme gleich sein.

$$LCCP = \text{Direkte Emissionen} + \text{Indirekte Emissionen}$$

$$\text{Direkte Emissionen} = C * (L * ALR + EOL) * (GWP + Adp.GWP)$$

$$\text{Indirekte Emissionen} = L * AEC * EM + \sum (m * MM) + \sum (mr * RM) + C * (1 + L * ALR) * RFM + C * (1 - EOL) * RFD$$

- C = Kältemittelmenge (kg)
- L = Durchschnittliche Anlagenlebensdauer (Jahre)
- ALR = Durchschnittliche Leckagerate (% der Kältemittelmenge pro Jahr)
- EOL = End-Of-Life (Lebensende-)Kältemittelverluste (% der Kältemittelmenge)
- GWP = Global Warming Potential (kg CO_{2e}/kg)
- Adp. GWP = GWP der atmosphärischen Abbauprodukte der Kältemittel
- AEC = Jährlicher Energieverbrauch (kWh/Jahr)
- EM = Strom-Emissionsfaktor (kg CO_{2e}/kWh)
- m = Massen der verbauten Materialien (kg)
- MM = Spezifische CO_{2e}-Emissionen bei der Materialherstellung (kg CO_{2e}/kg)
- mr = Massen der zu entsorgenden Materialien (kg)
- RM = Spezifische CO_{2e}-Emissionen bei der Materialentsorgung (kg CO_{2e}/kg)
- RFM = Spezifische CO_{2e}-Emissionen bei der Kältemittelherstellung (kg CO_{2e}/kg)
- RFD = Spezifische CO_{2e}-Emissionen bei der Kältemittelentsorgung (kg CO_{2e}/kg)

5.5.2. LCCP-Berechnungstools

Für die Durchführung der LCCP-Analysen wurden folgende zwei Tools verwendet:

Pack Calculation Pro

Mit dieser Software kann für einen bestimmten Standort u.a. der jährliche Energieverbrauch von Kälte- und Wärmepumpensystemen anhand der hinterlegten Klimadaten berechnet werden. Des Weiteren berücksichtigt *Pack Calculation Pro* den Anlagenbetrieb in unterschiedlichen Teillastzuständen. Da dieses Tool nur den TEWI und somit einige der indirekten Emissionen (z.B. Geräteherstellung) nicht berücksichtigt, wurden letztere mit dem *IIR-LCCP-Calculation-Tool* (siehe unten) berechnet.

IIR-LCCP-Calculation-Tool

Mit dem vom International Institute of Refrigeration (IIR) den internationalen Projektteilnehmern zur Verfügung gestellten Excel-Tool können LCCP-Analysen durchgeführt werden. Die einzelnen Emissionsanteile werden separat berechnet, gemeinsam mit der LCCP tabellarisch ausgewiesen und zur visuellen Veranschaulichung in Diagrammen dargestellt. Im nationalen Beitrag diente dieses Tool zur Berechnung einiger der indirekten Emissionen (z.B. Geräteherstellung). Da im *IIR-LCCP-Calculation-Tool* nur für die USA Klimadaten und Strom-Emissionsfaktoren vorhanden sind, erfolgte die Berechnung des Hauptanteils der Emissionen mit dem oben genannten Tool *Pack Calculation Pro*. Wie oben erwähnt, wurden mit dem *IIR-LCCP-Calculation-Tool* jene Emissionen (z.B. durch Geräteherstellung) berechnet, die im *Pack Calculation Pro* keine Berücksichtigung finden.

5.5.3. LCCP-Berechnungsergebnisse

Das R410A-Basissystem und das optimierte R290-System wurden angelehnt an die für die Systemsimulationen in Task 2 festgelegten Parameter in *Pack Calculation Pro* definiert. Danach erfolgten Berechnungen verschiedener Zwischenergebnisse und schlussendlich der LCCP-Werte.

Indirekter LCCP durch Stromverbrauch

Zur Berechnung der indirekten CO_{2e}-Emissionen durch den Stromverbrauch der untersuchten Systeme wurde ein Betriebsjahr auf stündlicher Basis simuliert. Für die Simulationen wurde für beide Systeme das gleiche jährliche Lastprofil und die gleichen Klimadaten (Wien, Hohe Warte) verwendet. Dank der guten thermodynamischen Eigenschaften erzielt das optimierte R290-System einen um etwa 18% niedrigeren (elektrischen) Energieverbrauch als das R410A-Basissystem (ca. 12 MWh/Jahr statt ca. 15 MWh/Jahr).

Die indirekten CO_{2e}-Emissionen durch den Stromverbrauch der untersuchten Systeme wurde für eine angenommene Lebensdauer von 15 Jahren mit einem Strom-Emissionsfaktor von 0,06 kg CO_{2e}/kWh ermittelt. Letzterer wurde im Vorfeld unter Einbeziehung österreichischer Klimaziele als Mittelwert der zu erwartenden Strom-Emissionsfaktoren bis 2036 (fiktiver Anlagenbetrieb von 2022 bis 2036) berechnet.

Mit ca. 20 Tonnen CO_{2e} (R410A-Basissystem) bzw. ca. 17 Tonnen CO_{2e} (optimiertes R290-System) haben die indirekten Emissionen durch den elektrischen Energieverbrauch der Systeme während ihrer Lebensdauer einen großen Anteil am TEWI: etwa 35% (R410A-Basissystem) bzw. fast 100% (optimiertes R290-System).

Direkte Emissionen durch Kältemittelverluste

Da im Zuge der in der Simulationsstudien die Kältemittelmenge nicht für alle Komponenten ermittelt worden war, wurde zur Ermittlung der in den Systemen enthaltenen Gesamtkältemittelmengen folgende Abschätzungsmethode gewählt: Die Kältemittelfüllmenge des R410A-Basissystems wurde auf Basis von Erfahrungswerten geschätzt und für die Kältemittelmenge des optimierten R290-Systems wurde die Kältemittelfüllmenge des GreenHP-Prototyps (Zottl, 2016) herangezogen. Der Erfahrungswert bezüglich der Kältemittelfüllmenge des R410A-Basissystems wurde als mittlere spezifische Kältemittelmenge von 18 Luft/Wasser-Wärmepumpen mit dem Kältemittel R410A, von denen die entsprechenden Herstellerdaten (aus anderen Projekten) bekannt waren, abgeschätzt. Der ermittelte Mittelwert beträgt 440 g R410A/kW Auslegungswärmeleistung, was bei einer Heizleistung von 30 kW einer absoluten Kältemittelmenge von 13,2 kg entspricht. Die Kältemittelmenge des GreenHP-Prototyps (30 kW Heizleistung) beträgt 1,9 kg bzw. 63 g R290/kW Auslegungsheizleistung.

Die durchschnittliche Lebensdauer der beiden Systeme wurde, wie oben erwähnt, mit 15 Jahren, die jährliche Leckagerate mit 4% und jene bei der Geräteentsorgung mit 15% angenommen (IIR, 2016). Da für Österreich keine exakten Daten vorliegen, wurden diese „Standard“-Werte verwendet, es ist jedoch davon auszugehen, dass in Österreich die tatsächlichen Kältemittelverluste, insbesondere die jährliche Leckage-Rate im Mittel niedriger anzusetzen wären.

Die CO_{2e}-Emissionen des Basissystems aufgrund von Kältemittelleckagen während des Betriebs und beim Recyclen der Anlagen belaufen sich auf etwa 38 Tonnen CO_{2e}, das sind etwa 65% des TEWI des Basissystems. Der entsprechende Wert des optimierten R290-Systems beträgt nur 8 kg CO_{2e}, was einen vernachlässigbaren Anteil am TEWI darstellt. Der Grund für die niedrigen Werte des optimierten R290-Systems ist eindeutig der sehr niedrige GWP des Kältemittels R290 (GWP = 3).

Indirekte Emissionen bei Herstellung und Entsorgung

Jener Anteil an der LCCP, der auf die Geräteherstellung/Entsorgung und Kältemittelherstellung zurückzuführen ist, wurde mit dem *IIR-LCCP-Calculatation-Tool*, welches auf IIR (2016) aufbaut, berechnet. Die im Berechnungstool enthaltenen Annahmen hinsichtlich der materialtechnischen

Zusammensetzung der beiden Geräte und materialspezifischer Emissionsfaktoren für Herstellung und Entsorgung der verbauten Materialien lauten wie folgt (siehe auch IIR, 2016):

Der Anteil an Stahl beträgt 46%, der Anteil an Aluminium 12%, der Anteil an Kupfer 19% und der Anteil an Kunststoffen 23%. Die herstellungsspezifischen Emissionsfaktoren werden für Stahl mit 1,43 kg CO_{2e}/kg, für Aluminium 4,5 kg CO_{2e}/kg, für Kupfer 2,78 kg CO_{2e}/kg und für Kunststoffe 2,61 kg CO_{2e}/kg angegeben. Die Emissionswerte der Geräteherstellung beziehen sich auf Neumaterial ohne recycelten Anteil. Für die Entsorgung von Metallen wird ein Emissionsfaktor von 0,07 kg CO_{2e}/kg angesetzt, für das Recyclen von Kunststoffen 0,01 kg CO_{2e}/kg.

Für die Herstellung von R410A wurde ein Emissionsfaktor von 17,12 kg CO_{2e}/kg, für die Herstellung von R290 ein Wert von 0,08 kg CO_{2e}/kg angenommen (IIR, 2018). Aufgrund fehlender Daten zu den indirekten Emissionen bei der Kältemittelentsorgung musste letztere vernachlässigt werden.

Da für beide der zu untersuchenden Systeme dieselbe Gerätemasse (230 kg) und auch dieselbe Materialverteilung angenommen wurde, sind die Ergebnisse hinsichtlich der Gerätefabrikation/Entsorgung für beide Systeme gleich. Die Ergebnisse der beiden zu vergleichenden Systeme in der gegenständlichen Kategorie unterscheiden sich somit ausschließlich hinsichtlich der Emissionen bei der Kältemittelherstellung:

Im Vergleich zu den direkten CO_{2e}-Emissionen und zu den durch den Stromverbrauch verursachten indirekten CO_{2e}-Emissionen sind die indirekten CO_{2e}-Emissionen der Wärmepumpenherstellung von etwa 817 kg CO_{2e} und -Entsorgung (13 kg CO_{2e}) als gering anzusehen.

Ähnliches gilt für die Kältemittelherstellung, welche etwa 226 kg CO_{2e} (Basissystem) bzw. nur 0,15 kg CO_{2e} (optimiertes R290-System) verursacht. Der sehr niedrige Wert für R290 ist plausibel, da Propan als Nebenprodukt bei der Erdgasverarbeitung und Erdölraffination anfällt und somit kaum zusätzliche Energie für die Herstellung benötigt.

Insgesamt belaufen sich die CO_{2e}-Emissionen aus der Herstellung und der Entsorgung der Anlagen sowie der Herstellung des Kältemittels auf etwa 1056 kg CO_{2e} (Basissystem) bzw. etwa 831 kg CO_{2e} (optimiertes R290-System). Das optimierte R290-System schneidet auch hier besser ab als das Basissystem, die Einsparung beträgt etwa 21%.

LCCP

Die Summe aus dem TEWI und den Emissionen bei Herstellung und Entsorgung ergibt die LCCP. Die LCCP des Basissystems beträgt demnach etwa 60 Tonnen CO_{2e}, während die LCCP des optimierten R290-Systems bei 17,4 Tonnen CO_{2e} liegt. Letztere ist um etwa 16 Tonnen CO_{2e} geringer als jene des Basissystems, was einer Emissionseinsparung um 71% entspricht. In Tabelle 5-6 sind die einzelnen Komponenten, der TEWI und die LCCP gelistet.

Diese Werte zeigen, dass das optimierte R290-System (dank dem sehr kleinen GWP von 3) nicht nur hinsichtlich der direkten CO_{2e}-Emissionen (Kältemittelleckagen) besser abschneidet, sondern auch aufgrund der besseren thermodynamischen Eigenschaften und der dadurch verbesserten Energieeffizienz CO_{2e}-Emissionen einspart.

Um die Bedeutung dieser Werte besser zu verstehen, wurde ein Vergleich mit einer Gasheizung angestellt. Bei gleicher Ausgangssituation (z.B. Lebensdauer, Heizwärmebedarf etc.) emittiert eine Gasheizung etwa 128 Tonnen CO_{2e}. Im Vergleich dazu liegen der TEWI des Basissystems und des

optimierten R290-Systems bei 46% bzw. 13% dieses Wertes. Aus Gründen der Vereinfachung wurden bei diesem Vergleich keine Herstellungs-/Entsorgungsemissionen und kein Gasschlupf, dessen Berücksichtigung die Klimabilanz vieler Gasheizungen erheblich verschlechtert, berücksichtigt.

Der Ersatz einer Gasheizung durch das R410A-Basissystem führt also laut dieser Abschätzung zu einer 54%-igen Verringerung der CO_{2e}-Emissionen, während der Ersatz durch ein optimiertes R290-System eine Verringerung der CO_{2e}-Emissionen um 87 % erzielt. Die Abweichungen zwischen dem R410A-Basissystem und dem optimierten R290-System unterstützt die Forderung nach dem Ersatz konventioneller Kältemittel durch Low-GWP-Kältemittel. Eine generelle Reduzierung der Kältemittelfüllmenge (bei konventionellen Kältemitteln) und eine generelle Verringerung der Leckageraten stellen jedoch auch valide Ansätze zur Verbesserung der LCCP von Wärmepumpensystemen dar.

Darüber hinaus ist zu erwähnen, dass die tatsächlichen Leckageraten und die Recycling-Kältemittelverluste bei Haushaltswärmepumpen in Österreich geringer sein dürften als in dieser Untersuchung angenommen. Da die exakte Leckagesituation in Österreich nicht bekannt ist, wurden die Annahmen in dieser Untersuchung entsprechend der Empfehlung des IIR getroffen. Weiterführende Untersuchungen zur tatsächlichen Leckagesituation in Österreich sind daher dringend zu empfehlen.

Tabelle 5-6: CO_{2e}-Emissionsanteile, TEWI und LCCP des Basissystems und des optimierten R290-Systems

CO _{2e} -Emissionsanteil	Einheit	R410A-Basissystem	Optimiertes R290-System
Kältemittelleckage	[kg CO _{2e}]	15.828,0	3,0
Kältemittelverluste bei der Entsorgung	[kg CO _{2e}]	22.423,0	5,0
Stromverbrauch	[kg CO _{2e}]	20.282,0	16.572,0
TEWI	[kg CO_{2e}]	58.533,0	16.580,0
Geräteherstellung	[kg CO _{2e}]	817,4	817,4
Geräteentsorgung	[kg CO _{2e}]	12,9	12,9
Kältemittelherstellung	[kg CO _{2e}]	226,0	0,15
Indirekte Emissionen durch Herstellung und Entsorgung	[kg CO _{2e}]	1056,3	830,5
LCCP	[kg CO_{2e}]	43 026,9	27 305,4

5.6. Low-GWP-Kältemittelmarkt - Ausblick bis 2030

5.6.1. Österreichischer Wärmepumpenmarkt – bisherige Entwicklung und Prognosen

Die vergangenen Jahre waren in Österreich von einem starken Anstieg der Wärmepumpen-Verkaufszahlen gekennzeichnet. Während in den 1980er-Jahren hauptsächlich Brauchwasser-Wärmepumpen installiert wurden, steigt jetzt besonders die Anzahl der Heizungswärmepumpen (teils auch inkl. Warmwasserbereitung) an (Abbildung 5-14). Dieser Trend wird auch bis 2030 anhalten, wie bereits 2015 in drei Szenarien ermittelt wurde (Abbildung 5-15).

Abbildung 5-14: Jährlich installierte Wärmepumpenanlagen in Österreich (BMK, 2021b)

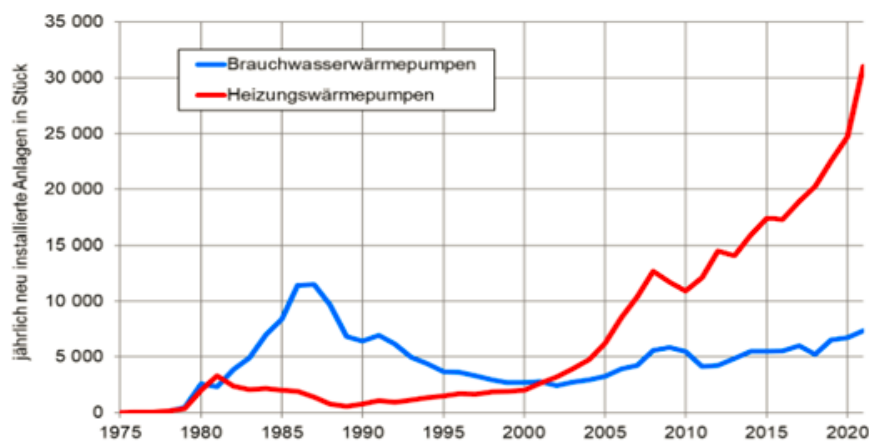
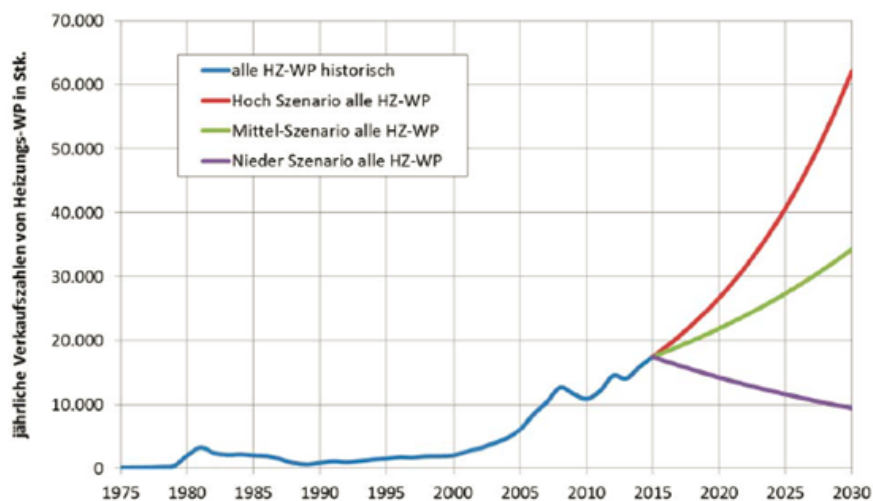


Abbildung 5-15: Jährlich installierte Heizungs-Wärmepumpenanlagen in Österreich bis 2015 und Szenarien bis 2030 (bmvit, 2016)



Die Szenarien aus dem Jahr 2015 für 2021 für die Anzahl der installierten Heizungswärmepumpen lauteten demnach:

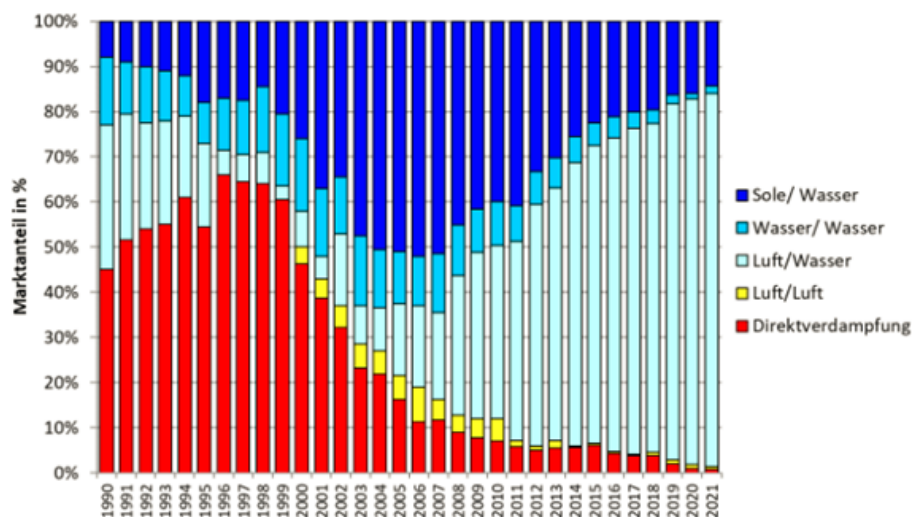
- Szenario Hoch: 28.987 Stück

- Szenario Mittel: 22.847 Stück
- Szenario Niedrig: 13.674 Stück

Die tatsächliche Zahl für 2021 waren 31.011 Stück und damit sogar höher als im Szenario Hoch. Damit ist es wahrscheinlich, dass auch die Zahl für 2030 übertroffen wird, umso mehr, wenn die derzeitige Gaskrise und die damit verbundenen noch stärkeren Anstrengungen zum Ausstieg aus Gas, aber wohl auch aus Öl, in Betracht gezogen werden. Das Szenario Hoch ergab für 2030 eine Zahl von 61.000 Stück.

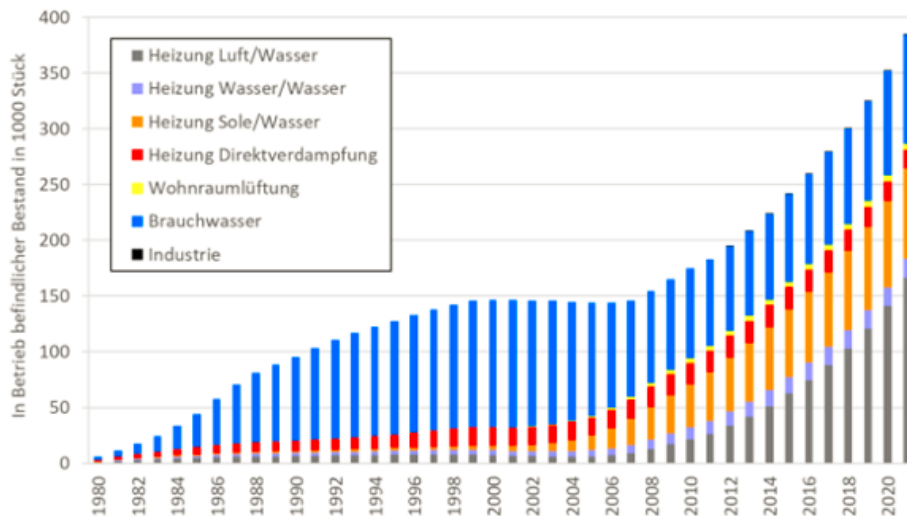
Interessant in diesem Zusammenhang ist auch die Analyse der Wärmepumpen nach Bautyp bzw. Wärmequelle. Während in den 1990er-Jahren die Direktverdampfersysteme eine tragende Rolle spielten, so sind diese heute beinahe gänzlich verschwunden. Aufgrund der einfacheren Installierbarkeit, besonders wichtig in der Sanierung, haben die Luft/Wasser-Wärmepumpen mittlerweile über 80% Marktanteil, gemessen an der Stückzahl (Abbildung 5-16).

Abbildung 5-16: Aufteilung der installierten Heizungswärmepumpen nach Bautyp bzw. Wärmequelle (BMK, 2021b)



Dieser Trend zeigt sich verzögert auch in den Bestandszahlen, wo Luft/Wasser-Wärmepumpen inzwischen auch mehr als 40% ausmachen (Abbildung 5-17).

Abbildung 5-17: Bestandszahlen der Wärmepumpensysteme in Österreich nach Einsatzzweck, Bautyp und Wärmequelle (BMK, 2021b)



5.6.2. Ergebnisse der StakeholderInnen-Workshops

Für die Abschätzung möglicher Entwicklungen auf dem österreichischen Kältemittelmarkt in Richtung Low-GWP-Kältemittel wurden in StakeholderInnen-Workshops Meinungsbilder der teilnehmenden ExpertInnen erhoben.

Wärmepumpenmarkt allgemein

Die Prognosen der befragten ExpertInnen zur Entwicklung der Absatzzahlen für Wärmepumpen decken sich mit der zuvor gebrachten Analyse, nämlich, dass diese auch 2030 über dem Hoch-Szenario aus 2015 (61.000 Heizungswärmepumpen) liegen werden. Alle ExpertInnen gehen von Installationszahlen zwischen 80.000 und 100.000 aus.

Noch wichtiger ist aber die Analyse der wesentlichen Einflussfaktoren auf die zukünftigen Entwicklungen am Wärmepumpenmarkt. Diese sind für die Abschätzung der zukünftigen Nachfrage und des zukünftigen Angebots von Wärmepumpen essenziell. Limitierende Faktoren sind laut den ExpertInnen dabei nicht die nachfrageseitig, sondern ausschließlich angebotsseitig zu verorten:

- regional unterschiedliche Regulative: Hier werden vor allem unterschiedliche Interpretationen der Kälteanlagenverordnung in den Bundesländern genannt. Die Kälteanlagenverordnung stammt im Wesentlichen aus 1969 (Bundesrecht, 2022). Seit damals gab es wesentliche technische Weiterentwicklungen.
- Verfügbarkeit von Komponenten des Kältekreis (v.a. Kompressoren): Überwiegend wird dies als vorübergehendes Problem mit Dauer einiger Monate bis weniger Jahre angesehen. Unsichere globale Entwicklungen wie die anhaltende Corona-Krise, die Ukraine-Krise, eventuell entstehende Spannungen zwischen China und Taiwan etc. erlauben kaum Prognosen über die weitere Entwicklung bei Produktion und Transport von Komponenten.
- FacharbeiterInnenmangel: Der Mangel an entsprechend ausgebildeten FachhandwerkerInnen für die Installation von Wärmepumpenanlagen wird als das gravierendste und am längsten anhaltende Problem beschrieben. Durch notwendige Ausbildungszeiten kann dieser Mangel nicht schnell behoben werden. Da nicht nur statt Gasheizungen vermehrt Wärmepumpen eingesetzt werden müssen (und viele

Fachhandwerker auf Gasheizungen spezialisiert sind), sondern auch die Anzahl der neu installierten Heizungssysteme insgesamt steigen muss, um die Klimaziele der Bundesregierung zu erreichen, ist diesem Thema nicht allein durch Umschulungen (welche auch aufwändig sind) beizukommen.

Preise oder Verfügbarkeiten von (Low-GWP-)Kältemitteln werden nach Einschätzung aller ExpertInnen keine Rolle bei den Marktentwicklungen spielen.

Einflussfaktoren auf den künftigen Einsatz von Low-GWP-Kältemitteln

Welche Low-GWP-Kältemittel in welchem Ausmaß eingesetzt werden, hängt laut den ExpertInnen besonders von folgenden Aspekten ab:

Verfügbarkeit von Komponenten des Kältekreis

Für jedes Kältemittel müssen zuerst die notwendigen Komponenten entwickelt und zugelassen werden. Prüfungen, die für die Zulassung notwendig sind, dauern mehrere Jahre. Die Zeit von der Erforschung eines Kältemittels bis zur Verfügbarkeit von Wärmepumpen mit diesem Kältemittel dauert entsprechend lange. Allerdings werden Forschungen nach Ansicht der ExpertInnen durch die Unsicherheit zukünftiger regulatorischer Entwicklungen behindert. Dies betrifft vor allem Einschränkungen hinsichtlich der beiden folgend genannten Punkte.

Sicherheit – Brennbarkeit und Giftigkeit

Brennbarkeit ist bei vielen natürlichen Kältemitteln ein Thema. Damit sind speziell hohe Füllmengen grundsätzlich problematisch. Dies zeigt sich auch darin, dass bei gewerblichen Kühlschränken seit langer Zeit R290 ohne Probleme eingesetzt wird. Bei Großanlagen, etwa in der Industrie oder auch in Wärmenetzen, sind verstärkte Sicherheitsvorkehrungen vorhanden, Lüftungssysteme sind Pflicht und es können daher brennbare oder auch giftige brennbare Kältemittel wie Ammoniak R717 leichter eingesetzt werden. Teils wird hier von den ExpertInnen auch angemerkt, dass Wärmepumpen mit brennbaren Kältemitteln meist noch nicht das Alter erreicht haben, in dem Reparaturanfälligkeit oder Austausch eine merkbare Rolle spielen. Erfahrungen in einigen Jahren könnten demnach die Meinung über brennbare Kältemittel negativ beeinflussen.

Abbauprodukte wie TFA – Trifluoressigsäure

Manche HFOs produzieren als Abbauprodukt TFA. Durch eine zukünftige überarbeitete REACH-Verordnung könnte es in einigen Jahren zu Einschränkungen bei Kältemitteln kommen, die sich in der Atmosphäre zu TFAs zersetzen. Die Kältemittel, die sich entweder bereits seit Langem auf dem Markt befinden, gerade in Einführung oder noch in der Forschung sind, sind in unterschiedlichem Maß von TFA betroffen. Teilweise ist der Anteil von TFA als Abbauprodukt von Kältemitteln aber noch nicht hinreichend erforscht (Behringer et al., 2021).

Das deutsche Umweltbundesamt stellt zum Thema TFA folgendes fest (Behringer et al., 2021):

- TFA stellen eine zunehmende Belastung des Grund- und Trinkwassers dar.
- TFA ist ein langlebiger Stoff.
- Es existieren weder natürliche Mechanismen noch vertretbare technische Verfahren zur Entfernung von TFA aus Trinkwasser.
- Eine Minimierung des Eintrags von TFA in die Umwelt ist daher notwendig.

Die Gefahr hinsichtlich eines Verbots der HFOs hinsichtlich TFA-Bildung wird von den befragten ExpertInnen unterschiedlich eingeschätzt. Der Vorteil durch die Anwendung unbrennbarer Kältemittel mit guten thermodynamischen Eigenschaften für Wärmepumpen, welche wiederum helfen, CO₂ und eine Reihe von Luftschadstoffen aus der Atmosphäre freizuhalten, indem weniger fossile Energieträger verbrannt werden, müssen demnach diesem potenziellen Schaden gegenübergestellt werden.

Angemerkt wird von den ExpertInnen auch, dass in Ozeanen etwa 270 Mio. Tonnen TFA natürlichen Ursprungs gelöst sind (Christoph, 2002). Für viele Anwendungsbereiche stellen HFOs, die TFA produzieren, ein gutes Kältemittel mit geringer Brennbarkeit dar.

Regulative Vorgaben

Regulative Vorgaben sollten die genannten Aspekte wie Brennbarkeit, GWP, Giftigkeit etc. abbilden. Da dies aber letztlich immer auch politische Entscheidungen sind, sind sie separat zu behandeln.

Der derzeitige Entwurf einer Novellierung der F-Gase-Verordnung (Der Grüne Deal, 2022) wird ab 2025 bzw. 2027 einen wesentlichen Einfluss auf die Wahl von Kältemitteln für Wärmepumpen haben: Die vorgeschlagene Verordnung würde bestimmte stationäre Split-Klimaanlagen und Split-Wärmepumpen verbieten:

- Ab dem 1. Januar 2025 Mono-Splitgeräte, die fluorierte Treibhausgase mit einem GWP von 750 oder mehr enthalten oder zu ihrem Funktionieren benötigen, wobei die Menge der fluorierten Treibhausgasen weniger als 3 kg beträgt
- Ab dem 1. Januar 2027 Splitgeräte mit einer Nennleistung von bis zu 12 kW (einschließlich), die fluorierte Treibhausgase mit einem GWP von 150 oder mehr enthalten oder zu ihrem Funktionieren benötigen, außer wenn dies zur Einhaltung von Sicherheitsnormen erforderlich ist.
- Ab dem 1. Januar 2027 Splitgeräte mit einer Nennleistung von mehr als 12 kW, die fluorierte Treibhausgase mit einem GWP von 750 oder mehr enthalten oder zu ihrem Funktionieren benötigen, außer wenn dies zur Einhaltung von Sicherheitsnormen erforderlich ist.

HFKW-Kältemittel würden dabei nach dem 4. Sachstandsbericht (PCC, 2007) beurteilt und daher würde auch R32 wie ein Kältemittel mit einem GWP < 750 behandelt werden, obwohl der aktuelle 6. Sachstandsbericht (IPCC, 2022) einen Wert über 750 ausweist. Aus Sicht des BMK wird es in diesem Punkt auch im Laufe der derzeitigen Diskussionen auf EU-Ebene auch zu keinen Veränderungen mehr kommen.

Eine große Barriere für den österreichischen Markt wird in der immer noch gültigen Kälteanlagenverordnung aus 1969 (Bundesrecht, 2022b) gesehen. Diese kennt keine Klasse 2L. Eine Überarbeitung inkl. einer angemessenen Differenzierung in A2L-, A2 und A3-Kältemittel ist daher dringend geboten. Nach Auskunft des BMK ist ein Diskussionsprozess zur Neufassung einer Kälteanlagenverordnung nach jahrelangen Bemühungen am Widerstand mehrerer BranchenvertreterInnen gescheitert. Ein allfälliger neuer Entwurf müsste nach den derzeitigen Gepflogenheiten sozialpartnerschaftlich verhandelt und der Begutachtung zugeführt werden. Solch ein Unterfangen kann sich der Erfahrung nach jahrelang hinziehen.

Weiters erschwert die Menge an Normen und Gesetzen, die sich nach Auskunft der ExpertInnen auch in einigen Punkten widersprechen, die Situation für Kältemittel- und WärmepumpenherstellerInnen in Österreich. So gelten im Gewerbebereich etwa der MAK-Wert lt. Grenzwertverordnung

(Bundesrecht, 2022a) und der praktische Grenzwert laut ÖKKV (WKO, 2014). Weiters kommen die EN 378 (EN 378, 2020) und die IEC 60335-2-40 (IEC 60335-2-40, 2014) bzw. IEC 60335-2-89 (IEC 60335-2-89, 2015) zur Anwendung.

Aussagen über die Marktanteile der Kältemittel 2030 sind aufgrund der vielen genannten Unwägbarkeiten und daraus resultierender stark divergierender Einschätzungen nicht möglich. Besonders bei R290 gehen aufgrund dessen Brennbarkeit die Einschätzungen von einem Verbot bis zu einem Marktanteil über 50% weit auseinander.

Derzeit favorisierte Low-GWP-Kältemittel – Einsatzgebiete, Vor- und Nachteile

Es folgt nun eine Darstellung von Vor- und Nachteilen wichtiger Kältemittel aus technischer und rechtlicher Perspektive.

In der folgenden Aufzählung haben die meisten Kältemittel zwar ein GWP unter 150, aber es sind auch solche mit Werten über 150 dabei. Das GWP ist jeweils nach dem 4. Sachstandsbericht des IPCC angegeben und wurden aus Bitzer (2020) entnommen.

R32 (GWP = 675) A2L („Übergangskältemittel“)

R32 (CH_2F_2 – Difluormethan) wird bereits jetzt in vielen Wärmepumpen verwendet, der Marktanteil, gemessen an eingetragenen Produkten in der GET-Datenbank (GET, 2022), liegt bei etwa 13%. Es wird wegen seines GWP, das zwischen jenem vieler natürlicher Kältemittel ($\text{GWP} \sim 10$) und den derzeit meistverwendeten ($\text{GWP} \sim 2.000$) liegt, auch als Übergangskältemittel bezeichnet. Seit dem letzten IPCC-Bericht (IPCC, 2022) liegt das GWP dieses Kältemittels über 750 und ist damit auch im weiteren Sinn kein Low-GWP-Kältemittel mehr: $\text{GWP}_{\text{AR4}} = 675$, $\text{GWP}_{\text{AR5}} = 677$, $\text{GWP}_{\text{AR6}} = 771$. R32 wird bis 2027 ein wichtiges Kältemittel bleiben, bei > 12 kW Systemen auch über 2027 hinaus (laut dem derzeitigen Entwurf der novellierten F-Gase-Verordnung gilt das GWP nach dem 4. Sachstandsbericht (IPCC, 2007)). Spätestens ab dem Verbot lt. momentanem Entwurf der F-Gase-VO (EU, 2022), der gegenüber der derzeitigen Verordnung (EU, 2014) wesentliche Änderungen (Verschärfungen) für das zulässige GWP von Wärmepumpen enthält, per 01.01.2027 wird R-32 jedoch bei Splitgeräten unter 12 kW Leistung weitgehend verschwinden (außer wenn die Einhaltung von Sicherheitsnormen mit Kältemitteln mit $\text{GWP} < 150$ nicht möglich ist).

R32 ist ein gut geeignetes, verbreitetes Substitut für R410A. Sein Sättigungsdruck und seine volumetrische Kälteleistung ist fast ident mit den Werten von R410A (HPT Annex 54, 2022). R32 bildet nach dem Bericht von Behringer (Behringer, 2021) kein TFA.

R290 – Propan (GWP = 3) A3

R290, besser bekannt als Propan (C_3H_8), ist heute bereits ein häufig eingesetztes Kältemittel für Wärmepumpen (ca. 3,5% der Wärmepumpen in der GET-Datenbank (GET, 2022)). Viel häufiger wird es jedoch bereits in gewerblichen Kühlmöbeln eingesetzt. Es weist teils vergleichbare thermodynamische Eigenschaften wie R410A auf, allerdings auch einen um 50% niedrigeren Sättigungsdampfdruck.

Die Zukunft von R290 als Kältemittel wird sehr unterschiedlich bewertet. Viele Hersteller setzen bereits darauf. Teilweise wird R290 als jenes Low-GWP-Kältemittel mit dem höchsten Marktpotenzial bis 2030 gesehen. Die Einschätzung reicht hier von 15% bis über 50% Marktanteil. Andererseits existieren Bedenken hinsichtlich größerer Anlagen und hier speziell bei nicht hermetisch dichten

Anlagen (Split-Geräten) sowie innen aufgestellten Geräten – aufgrund der Brennbarkeit. Wenn zahlreiche R290-Wärmepumpen in ein Alter kommen, das größere Wartungsarbeiten erfordert, könnte die Problematik evident werden und es könnte dann zu Einschränkungen kommen, so die Meinung einiger ExpertInnen.

Nach der Norm EN 378-1:2016 (EN378-1, 2019) ist die maximale R290-Füllmenge abhängig von Raumtyp, dem Aufstellort und der Größe der Maschine sowie vom Besetzungsgrad. Split-Anlagen und innenliegende Systeme haben niedrigere Grenzen. Für hermetisch dichte, außenliegende Systeme gibt es keine Grenzen, 25 kg werden aber oftmals als freiwillige Grenze angesetzt (Task 1 Bericht) (HPT Annex 54, 2022). Als natürliches Kältemittel ohne Fluor bildet auch R290 kein TFA.

R454C (GWP = 148) A2L

R454C ist eine Mischung aus 21,5% R32 und 78,5% R1234yf. Ein Hersteller bietet in Österreich Luft/Wasser- und Sole/Wasser-Wärmepumpen mit diesem Kältemittel an. Teilweise wird diesem Kältemittel ein hohes Potenzial bis 2030 zugeordnet. Jedoch könnte es aufgrund der Bildung von TFA aus regulatoriver Sicht zu Einschränkungen kommen.

R454B (GWP = 466) A2L

R454B ist ein Gemisch aus 68,9% R32 und 31,1% R1234yf. Es enthält damit dieselben Komponenten die R454C, aber in einem anderen Mischungsverhältnis. Dieses bedingt ein höheres GWP als bei R454C, aber dafür ist es von der Bildung von TFA in geringerem Ausmaß betroffen, da R32 kein TFA bildet.

R454B ist das favorisierte Kältemittel für einige große internationale WärmepumpenherstellerInnen. Es ist in Großwärmepumpen bereits in vielen Bereichen im Einsatz. Vereinzelt werden in Österreich auch schon Luftwärmepumpen mit diesem Kältemittel angeboten.

R1234yf (GWP = 4) A2L

R1234yf weist einen ähnlichen Sättigungsdampfdruck und eine vergleichbare volumetrische Kälteleistung wie R134a auf und kommt derzeit als Kältemittel v.a. im Bereich von KFZ zum Einsatz. Für Großwärmepumpen ist es ebenso ein mögliches Kältemittel, wobei R1234ze geeigneter erscheint. Für den Haushaltsbereich fehlt derzeit noch die Zulassung der Komponenten. R1234yf bildet als Abbauprodukt TFA (Trifluoressigsäure). Dieser Aspekt wird aber bei KFZ viel kritischer gesehen als bei stationären Anlagen, da es hier im Allgemeinen zu größeren unkontrollierten Kältemittelverlusten kommt. Das bedeutet demnach, dass ein Verbot in stationären Anlagen (und somit aller Kältemittel, die TFA produzieren) erst dann sinnvoll erscheint, wenn dieses auch für mobile Anlagen, wie eben für KFZ, eingeführt würde.

R1233zd(E) (GWP = 5) A1

R1233zd wird bei besonders großen Anlagen bis zu 2 MW eingesetzt. Die physikalischen Eigenschaften erfordern, dass der Kältekreis im Vakuum operiert. Es bildet kaum TFA (Behringer, 2021).

R717 – NH₃ Ammoniak (GWP = 0) B2L

R717 hat für viele Anwendungen gute thermodynamische Eigenschaften. Das Problem ist seine Giftigkeit und auch die Brennbarkeit. Potenzial wird nach wie vor in industriellen Anwendungen gesehen.

R717 wird außerdem häufig in Großanwendungen im Kälte- und Wärmebereich eingesetzt. Ein Beispiel ist die Kälteanlage mit Wärmerückgewinnung am Geflügelschlachthof Titz in Feldbach/Österreich. Die Kälteanlage mit einer Kälteleistung von 2.400 kW ermöglicht durch Wärmerückgewinnung eine Hochtemperaturheizung (bis 95 °C), eine Wasservorwärmung (bis 35 °C) und ein Wärmeverteilsystem auf Solebasis (25 °C) mit einer Gesamtleistung von 1.700 kW (BMNT, 2018).

R744 – CO₂ (GWP = 1) A1

R744 ist dann ein gutes Kältemittel, wenn eine hohe senkenseitige Spreizung gegeben ist

Die Kältekreise sind besonders für kleine Anlagen verhältnismäßig teuer wegen des notwendigen technischen Aufwands infolge hoher auftretender Drücke. Die Leistungs- bzw. Arbeitszahlen für Heizen sind eher gering, bessere Werte werden für Brauchwasser-Wärmepumpen erreicht.

Zusammengefasst ist R744 bei Einzelanlagen, wo die Temperaturen gut zu den physikalischen Eigenschaften von CO₂ passen, geeignet, im Massensegment jedoch nicht. Vorteilhaft sind natürlich die Unbrennbarkeit, das niedrige GWP und im Vergleich zu vielen HFO-Kältemitteln der Umstand, dass kein TFA gebildet wird.

R600a – C₄H₁₀ Isobutan (GWP = 3) A3

R600a ist derzeit neben Haushaltskühlschränken bei Hochtemperatur-Gewerbemaschinen im Einsatz. Für Heizungswärmepumpen ist es aufgrund der thermodynamischen Eigenschaften nur beschränkt sinnvoll.

R1234ze(E) (GWP = 7) A2L

Dieses Kältemittel wird v.a. im Industriebereich für Großwärmepumpen eingesetzt. Es weist einen niedrigeren Sättigungsdampfdruck und eine geringere volumetrische Kälteleistung auf als R134a und R1234yf. Es produziert etwa 10% TFA als Abbauprodukt und ist damit weniger von dieser Problematik betroffen als einige andere HFO-Kältemittel (Behringer, 2021). Im Haushaltsbereich wird es aus heutiger Sicht zu keinem Einsatz kommen.

Eine mögliche Anwendung von R1234ze sind Hochtemperatur-Wärmepumpen. So wurden z.B. im Stahlwerk Marienhütte in Graz/Österreich zwei große Hochtemperatur-Wärmepumpen installiert, die die Abwärme aus der Stahlproduktion zurückgewinnen und das Fernwärmenetz versorgen. Die Vorlauftemperatur beträgt bis zu 95 °C, die Heizleistung bis zu 3,3 MW. Die Wärmequellentemperaturen liegen bei etwa 30°C (Arnitz et al., 2019).

R718 – Wasser (GWP = 0) A1

Für Wasser als Kältemittel gibt es bisher kein relevantes Anwendungsfeld. Vereinzelt gibt es Anlagen für Bürokühlung, die im Vakuumbereich operieren.

R600 – C₄H₁₀ Butan (GWP = 3) A3

Aufgrund der thermodynamischen Eigenschaften ist R600 aus derzeitiger Sicht bei Heizungswärmepumpen nicht einsetzbar. Ein großes Anwendungsfeld wird im Bereich der Hochtemperatur-Wärmepumpen gesehen.

R1336mzz(Z) (GWP = 9) A1

R1336mzz(Z) ist besonders für sehr hohe Temperaturen (bei ca. 160°C) ein geeignetes Kältemittel. Darunter bietet es gegenüber Alternativen wie R1233zd, welches bessere volumetrische Kälteleistung aufweist, keine Vorteile. Daher wird im Haushalts- und Gewerbebereich kein Anwendungsfeld gesehen.

R513A (GWP = 631) A1

R513A besteht aus 44% R134a und 56% R1234yf und wird als Ersatzkältemittel für R134a eingesetzt. Der Vorteil ist der geringere GWP, der Nachteil ein höheres TFA-Aufkommen. Derzeit wird eine Luft-Wärmepumpe in Österreich mit R513A angeboten (GET, 2022).

5.7. Publikationen

5.7.1. Task-Berichte und Annual Progress Report 2022

Im Rahmen des nationalen Beitrags wurden vier Task-Berichte (Country Reports) verfasst und in den IEA HPT Annex 54 eingebracht. Diese Beiträge werden voraussichtlich Anfang 2023 zusammen mit den Beiträgen der anderen teilnehmenden Länder als Annual Report 2022 auf der Webseite¹ des IEA HPT Annex 54 veröffentlicht werden. Eine Veröffentlichung der einzelnen nationalen Task-Berichte ist von seiten des internationalen Projektes nicht vorgesehen, erfolgte jedoch auf nationaler Ebene im Rahmen des Online-Weiterbildungsangebots² des AIT.

Zach F. et al. (2022): Task 1: State of the Art³

Die Studie gibt einen Überblick über Low-GWP-Kältemittel für Wärmepumpen im Bereich Haushalt und Gewerbe und vergleicht Kältemittel entlang wichtiger physikalischer Eigenschaften.

Verdnik M. et al. (2022): Task 2: Design guidelines for optimization of components and systems of Low GWP heat pumps⁴

Dieser Bericht listet Sicherheitsanforderungen und Konstruktionsrichtlinien bei Verwendung des Kältemittels R290 (Propan) auf und zeigt notwendige Veränderungen im Vergleich zu R410A im Rahmen einer Simulationsstudie.

Natiesta T. et al. (2023): Task 3: Review of design optimization and advancement impacts on LCCP reduction⁵

¹ <https://heatpumpingtechnologies.org/annex54/documents/>

² www.waermepumpe-weiterbildung.at

³ <https://waermepumpe-weiterbildung.at/mod/resource/view.php?id=1461>

⁴ <https://waermepumpe-weiterbildung.at/mod/resource/view.php?id=1462>

⁵ <https://waermepumpe-weiterbildung.at/mod/resource/view.php?id=1569>

Dieser Bericht vergleicht die beiden in Task 2 definierten Kältekreise hinsichtlich ihrer Life Cycle Climate Performance (LCCP). Die LCCP des mit R290 betriebenen Kältekreis und des Basissystems mit R410A wurde mit dem Softwaretool *Pack Calculation Pro* und dem *IIR-LCCP-Calculation-Tool* berechnet.

Zach F. et al. (2022): Task 4: Outlook 2030⁶

Dieser Bericht beschreibt, basierend auf Literaturanalysen und Expertenbefragungen, die zu erwartenden Entwicklungen auf dem Österreichischen Wärmepumpenmarkt bis 2030. Dazu werden Einflussfaktoren auf das Wärmepumpen-Marktpotenzial insgesamt und auf das Marktpotenzial bzw. die grundsätzliche Einsetzbarkeit diverser Kältemittel beschrieben. Weiters fasst der Bericht wesentliche thermodynamische Eigenschaften von Kältemitteln zusammen, die bis 2030 aus Expertensicht neu bzw. verstärkt eingesetzt werden.

5.7.2. Bachelorarbeit zu LCCP-Analysen

Gattermayer M. (2022): Einfluss einer Photovoltaikanlage auf die Ergebnisse einer LCCP Analyse einer Wärmepumpenanlage in einem Einfamilienhaus, Bachelorarbeit, Fachhochschule Technikum Wien

Diese Bachelorarbeit untersucht die Auswirkungen einer Photovoltaik (PV)-Anlage auf die Ergebnisse der LCCP einer Wärmepumpenanlage in einem Einfamilienhaus. Dabei wird der Strombedarf der Wärmepumpenanlage und der Stromertrag der Photovoltaikanlage berechnet und LCCP-Analysen verschiedener Varianten mit und ohne PV-Anlage. Fachzeitschriften

5.7.3. Artikel in Fachzeitschriften

Zach F. et al. (2022): Wärmepumpen und die eingesetzten Kältemittel – Ausblick zur Marktentwicklung bis 2030

Der Artikel⁷ präsentiert die wesentlichen Ergebnisse des IEA HPT Annex 54 praxisnah. Der Schwerpunkt liegt auf der künftigen Entwicklung des österreichischen Wärmepumpen- und Kältemittelmarkts bis 2030 sowie auf Vor- und Nachteilen ausgewählter Low-GWP Kältemitteln.

⁶ <https://waermepumpe-weiterbildung.at/mod/resource/view.php?id=1463>

⁷ Veröffentlichung im TGA Planerjahrbuch 2022 (<https://industriemedien.at/shop/produkt/tga-planerjahrbuch-2023>) und in der Januarausgabe 2023 des TGA Fachmagazins (noch nicht online verfügbar)

6 Inputs aus dem internationalen Projekt

Im Zuge der Aktivitäten im internationalen IEA HPT Annex 54 werden von den teilnehmenden Ländern verschiedene Aspekte des Projektes in unterschiedlicher Tiefe und teilweise mit unterschiedlicher Schwerpunktlegung behandelt. Insbesondere Länderspezifika kommen dabei zum Tragen. Während das nationale Projekt bereits Mitte 2022 zu Ende war, wurde das internationale Projekt bis Ende 2023 verlängert. Die Aktivitäten des nationalen Projektes lagen somit jenen im internationalen Projekt meist voraus. Erst gegen Projektende des nationalen Projektes waren Inputs anderer Länder verfügbar. Diese beziehen sich auf die Arbeiten in Task 1, Task 2 und Task 3. Die internationalen Aktivitäten in Task 4 sind für das Jahr 2023 geplant. Der internationale Annex wurde bis Ende 2023 verlängert.

Die nun vorliegenden Erkenntnisse und Ergebnisse sind im 2021 Progress Annual Report (Tao, C., Yunho, H., 2022) veröffentlicht und unten zusammengefasst. Für weiterführende Informationen stehen dieser Bericht und weitere Dokumente auf der internationalen Annex-Webseite⁸ zur Verfügung.

6.1. USA

Das Projektteam in den USA entwickelte in Task 1 eine Kältemittel-Datenbank u.a. für Low-GWP-Kältemittel. Damit können die für verschiedene Einsatzgebiete hinsichtlich thermodynamischer Eigenschaften und Umweltschutz am besten geeigneten Kältemittelkandidaten ermittelt werden. Für den Einsatz von Low-GWP-Kältemittel erforderliche Wärmepumpen-Systemanpassungen fanden Berücksichtigung. Des Weiteren wurden vier Untersuchungssysteme festgelegt, mit denen die thermodynamischen Eigenschaften und Umweltauswirkungen verschiedener Kältemittel analysiert wurden.

6.2. Deutschland

Der Überblick über die neuesten öffentlichen und innovativen Wärmepumpenprojekteermöglichte, den Stand der Technik von Wärmepumpen auf dem deutschen und europäischen Markt zu analysieren.

Unabhängig von den untersuchten Datenbanken wurden von allen verfügbaren Wärmepumpentypen in diesen Datenbanken nur die Luft/Wasser-Wärmepumpentypen aufgrund ihrer großen Marktrelevanz analysiert.

Die Analyse der auf dem Markt erhältlichen Wärmepumpen ermöglicht eine sehr vielfältige, aber auch sehr relevante Analyse, um Einführungsprozesse für neu entwickelte Wärmepumpen auf der Basis von Kältemitteln mit niedrigem Treibhausgasausstoß zu verstehen, aber auch um zu erkennen, welche Wirkungsgrade für diese Kältemittel erwartet werden können.

⁸ <https://heatpumpingtechnologies.org/annex54/documents/>

Es konnte festgestellt werden, dass viele Wärmepumpenmodelle, die zukunftssichere Low-GWP-Kältemittel verwenden, bereits auf dem Markt erhältlich sind. In Bezug auf die Effizienz sind Wärmepumpen mit Low-GWP-Kältemitteln ähnlich gegenüber den üblichen Kältemitteln, und die Unterschiede liegen höchstens in der ersten Nachkommastelle.

6.3. Frankreich

Das nationale Annex-Team in Frankreich stellte in 30 Prüfstandstests wärmetechnische Untersuchungen an Verdampfern und Verflüssigern (jeweils Rippenrohr-) in Kältekreislagen mit den Kältemitteln R410A, R32 und R454B an. In weiterer Folge wurden die Prüfstandsergebnisse zur Validierung von Simulationsergebnissen (Software EVAP-COND) verwendet. Bei der Wärme-/Kälteleistung lagen die Abweichungen von den experimentell ermittelten Werten unter 2,5%. Die simulierten Temperatur- und Druckentwerte lag bei allen drei Kältemitteln nahe an den experimentell ermittelten Werten. Mit diesen Untersuchungen konnte auch die Einsetzbarkeit der EVAP-COND-Software als zuverlässiges Simulations-Tool für Rippenrohr-Wärmeaustauscher nachgewiesen werden. Die Untersuchungen zeigten des Weiteren, dass mit dem untersuchten Wärmetauscher-Design sowohl R410A als auch R454B ohne Anpassungen zur Anwendung kommen können. Für den Einsatz von R32 werden hingegen Anpassungen als erforderlich angesehen.

6.4. Japan

Das nationale Projektteam in Japan setzte einen zweistufigen Prozess zur LCCP-Bewertung von Wärmepumpen bzw. Klimaanlage mit Low-GWP-Kältemitteln ein. Der 2021 Country Progress Report beschreibt in erster Linie die Vorbereitungsschritte für die LCCP-Bewertung, sowie das für die Untersuchungen angewandte Konzept, das sowohl auf Felddaten als auch auf angenommenen Parametern beruht.

Für die Simulationen wurde ein repräsentatives Split-Klimaanlagen-Modell gewählt und ähnlich wie bei den österreichischen Aktivitäten als Basismodell mit konventionellem Kältemittel festgelegt. Das Basismodell wurde dann auf den Einsatz mit Low-GWP-Kältemittel hin optimiert. Die untersuchten Kältemittel sind R290, R32, R454C (und R22, R410A). Basierend auf den Simulationsberechnungen dieser Referenzsysteme wurde ein vereinfachtes Berechnungstool entwickelt.

7 Vernetzung und Ergebnistransfer

7.1. Einbindung der Zielgruppen

Die Einbindung der Zielgruppen erfolgte laufend durch die Veranstaltung von Wärmepumpen-Schulungen und schwerpunktmäßig gegen Ende der Projektlaufzeit in Form von StakeholderInnen-Workshops mit VertreterInnen der verschiedenen Zielgruppen. Die Hauptzielgruppen sind das Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), die österreichische Wärmepumpenbranche inkl. Planender und Ausführender, VertreterInnen aus dem Bereich Kältemittel sowie Studierende und ForscherInnen.

7.1.1. StakeholderInnen-Workshops

Es wurden im Mai und Juni 2022 insgesamt vier Workshops mit ExpertInnen zum Thema Wärmepumpen und Kältemittel durchgeführt. Daraus konnten umfangreiche Erkenntnisse zu den Themen Entwicklung des Wärmepumpenmarktes bis 2030 in Österreich allgemein, derzeitige und potenzielle Einsatzgebiete sowie Vor- und Nachteile diverser Low-GWP-Kältemittel und zu Einflussfaktoren auf die Marktanteile diverser Kältemittel bis 2030 gewonnen werden. Zur Frage des Marktanteils von Kältemitteln im Jahr 2030 wurde ein breites Meinungsbild gesammelt, das aufgrund der Heterogenität jedoch keine konkreten Aussagen erlaubt. Zur Vorbereitung der Befragungen österreichischer ExpertInnen im Wärmepumpen- und Kältemittelbereich im Rahmen der StakeholderInnen-Workshops wurde den ExpertInnen vorab ein Fragebogen zur Vorbereitung übermittelt, um die Gespräche effizienter und zielgerichteter gestalten zu können. In den ersten drei Workshops wurden VertreterInnen von Wärmepumpe Austria, der ÖGKT (Österr. Gesellschaft für Kältetechnik) sowie ExpertInnen aus diversen Wärmepumpenherstellerfirmen, Kältemittelherstellerfirmen und Heizungsbauunternehmen befragt. Am vierten Workshop nahmen VertreterInnen des BMK teil. Einleitend wurden bei den Workshops die Projektergebnisse (mit Schwerpunkt Szenarien zur Entwicklung des Wärmepumpen- und Kältemittelmarkts in Österreich bis 2030) als Input für die Diskussion präsentiert.

7.1.2. Vorträge bei Wärmepumpenkursen

Im Rahmen des AIT-Weiterbildungsmoduls für PlanerInnen und InstallateurInnen „M09: Kältemittel und ihre Umweltauswirkungen“, das unter anderem Teil der Wärmepumpen-Weiterbildungen „K01: Planung, Errichtung und Wartung von Wärmepumpen mit Kategorie II-Zertifizierung“ und „K05: Inbetriebnahme und Wartung von Wärmepumpen und Klimaanlage mit Kategorie II-Zertifizierung“ ist, wurden während der Projektlaufzeit den KursteilnehmerInnen neben den bisher gebräuchlichen synthetischen Kältemitteln auch die im IEA HPT Annex 54 untersuchten Low-GWP-Kältemittel vermittelt.

7.1.3. Weiterbildung im Umgang mit brennbaren Kältemitteln

Da einige Low-GWP-Kältemittel (Ersatzkältemittel für die vom Phase-Down betroffenen Kältemittel mit hohem GWP) der Sicherheitsklasse **A2L** (z.B. R32) oder **A3** angehören und somit **brennbar** sind,

bestehen sicherheitstechnische Hürden für den Einsatz dieser Kältemittel. Um diesen Barrieren entgegenzuwirken, wurde in Kooperation mit der Österreichischen Akademie der Kältetechnik eine 3-tägige Schulung im Umgang mit brennbaren Kältemitteln entwickelt. Die Hauptzielgruppen sind KältetechnikerInnen, ServicetechnikerInnen und InstallateurInnen. Die Weiterbildung beinhaltet u.a. folgende **Themen**:

- Richtlinien, Gesetze und Normen zu brennbaren Kältemitteln
- Stoffeigenschaften von brennbaren Kältemitteln
- Klassifizierung/Kategorien von brennbaren Kältemitteln
- Gefahren durch brennbare Kältemittel
- Handhabung von brennbaren Kältemitteln während des Betriebs
- Sicherheitsdatenblätter, Notfallmaßnahmen
- Werkzeuge und technische Ausrüstung für den Eingriff in Kältekreise mit entflammbaren Kältemitteln
- Transport und Recycling von Kälteanlagen mit brennbaren Kältemitteln und brennbaren Kältemitteln selbst
- Maßnahmen im Falle von Leckagen
- Praktisches Arbeiten mit brennbaren Kältemitteln (Rückgewinnung, Evakuierung, Abdrücken mit Stickstoff, Dichtheitsprüfung, Befüllen von Wärmepumpen und Kälteanlagen mit Kältemittel)

7.2. Relevanz und Nutzen der Ergebnisse

Die im Zuge der Annex-Aktivitäten generierten Erkenntnisse wurden den Zielgruppen des IEA HPT Annex 54 im Zuge von StakeholderInnen-Workshops und im Rahmen des AIT-Weiterbildungsprogramms im Bereich Wärmepumpe kommuniziert. Die InstallateurInnen und HaustechnikplanerInnen, welche die oben genannte Weiterbildung im Umgang mit brennbaren Kältemitteln besucht haben, verfügen nun über wichtige Kenntnisse für den richtigen Umgang mit brennbaren Kältemitteln. Des Weiteren konnte in diesen Zielgruppen das Interesse für diese Thematik geweckt werden, das bei Folgeprojekten weiter angesprochen werden kann. Dies wirkt sich positiv auf die Akzeptanz und folglich auf die Marktverbreitung von Wärmepumpen mit Low-GWP-Kältemitteln aus.

7.3. Verwertung der Ergebnisse

Es gibt zahlreiche konkrete Vorstellungen und Vorhaben zur Übertragung von Projekterkenntnissen in die Normung und die FTI-Politik. Aufgrund der noch in Schwebelage befindenden rechtlichen Rahmenbedingungen, der langen Umsetzungszeiträume und der Tatsache, dass das internationale Projekt hinter dem nationalen Projekt lag, werden die Erkenntnisse aus diesem IEA HPT Annex 54 erst in einigen Jahren in der Normung eingeflossen sein. Die Relevanz der Ergebnisse und Erfahrungen aus dem abgeschlossenen Projekt wird insbesondere nach Abschluss des internationalen Projektes und nachdem wichtige legislative Entscheidungen getroffen worden sind, gut beurteilbar sein.

8 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen

Wie auf internationaler Ebene hat auch in Österreich die Bedeutung des Einsatzes von Wärmepumpen mit Low-GWP-Kältemitteln in den letzten Jahren erheblich zugenommen und durch die Klimaziele stark an Bedeutung gewonnen. Die in der F-Gase-Verordnung geforderte Mengenreduktion von Kältemitteln mit hohem GWP kann global gesehen eine Schlüsselrolle zur Bekämpfung des Klimawandels spielen. Dies trifft insbesondere auf den Einsatz von Kältemitteln in Ländern mit weniger strengen Regeln zur Vermeidung von direkten Kältemittlemissionen bzw. in denen die Einhaltung dieser Regeln nicht ausreichend kontrolliert werden kann zu.

Im Rahmen einer Simulationsstudie wurden die notwendigen Änderungen einer mit R410A betriebenen Wärmepumpe zum Betrieb mit R290 gezeigt und Maßnahmen zur Füllmengenreduzierung aufgezeigt. Dabei wurde deutlich, dass größere Modifikationen in Betracht gezogen werden müssen. Neben der sicherheitstechnischen Vorkehrung aufgrund der Brennbarkeit von R290 ist aufgrund der geringeren volumetrischen Kälteleistung von R290 ein Verdichter mit größerem Hubraum erforderlich. Weitere Änderungen betreffen größere Rohrleitungsdurchmesser und die Dimensionierung des Expansionsgeräts muss überprüft werden. Vor allem aus Sicherheitsgründen haben Technologien zur Reduzierung der Kältemittelmenge ein großes Potenzial und werden auch in Zukunft von großer Bedeutung sein. Viele Komponenten wie Verdichter, Verflüssiger, Sammler, Expansionsventil und Verdampfer müssen dabei berücksichtigt werden.

Die im Projekt durchgeführten LCCP-Analysen zeigten, dass Wärmepumpen mit R290 nicht nur hinsichtlich direkter CO_{2e}-Emissionen (Kältemittleckagen) besser als jene mit R410A abschneiden (in der gegenständlichen Untersuchung unter den getroffenen Annahmen: 8 kg gegenüber 38 Tonnen CO_{2e}), sondern auch aufgrund besserer thermodynamischer Eigenschaften eine höhere Energieeffizienz aufweisen (unter den getroffenen Annahmen etwa 18% geringerer Stromverbrauch), was weitere Einsparungen von 3,7 Tonnen CO_{2e} ergaben. Der Ersatz einer Erdgasheizung durch ein Wärmepumpensystem mit R410A würde gemäß den durchgeführten Berechnungen etwas über 50% der CO_{2e}-Emissionen einsparen, der Ersatz durch eine R290-Anlage jedoch beinahe 90%. An dieser Stelle sollte aber nicht unerwähnt bleiben, dass die Leckageraten der in Österreich in Betrieb befindlichen Wärmepumpen geringer sein dürften als die in dieser Untersuchung verwendeten Standardwerte nach IIR (2016). Aus diesem Grund werden vertiefte Untersuchungen zur tatsächlichen Leckagesituation in Österreich empfohlen.

Hinsichtlich zukünftiger Entwicklungen liegt das prognostizierte Marktpotenzial für Wärmepumpen insgesamt laut (BMVIT, 2016) 2030 bei etwa 60.000 Stück pro Jahr, ExpertInnen gehen aber von 80.000 bis 100.000 Stück aus. Im Jahr 2021 lag diese Zahl bei 31.000 Stück pro Jahr. Bezüglich des Potenzials von Low-GWP-Kältemitteln ergaben die StakeholderInnenbefragungen eine große Bandbreite an möglichen Entwicklungen. Während ein StakeholderInnensegment für 2030 Propan (R290) als Marktführer sieht, geht ein anderes davon aus, dass die in der F-Gase-Verordnung geplanten Verbote konventioneller Kältemittel gekippt würden. Wieder ein anderes Segment favorisiert bei ihren Einschätzungen wiederum auf HFO basierende Kältemittel.

Im Zuge des HPT TCP National Expert Meetings⁹ am 28.10.2021 wurde ein neuer IEA HPT Annex mit dem Titel „Safety measures on flammable refrigerants“ (Sicherheitsmaßnahmen für brennbare Kältemittel) vorgeschlagen. Das AIT Austrian Institute of Technology hat bereits sein Interesse an der Teilnahme bekundet.

⁹ In den HPT TCP National Expert Meetings werden Ideen und Vorschläge für zukünftige HPT TCP Annex-Projekte und strategische Arbeitspläne für das HPT TCP entwickelt.

Literaturverzeichnis

Arnitz, A., Rieberer, R., Wilk V., Unger, H., Schlemmer, P. (2019): "Waste Heat Recovery at the Steel and Rolling Mill "Marienhütte", Graz (Austria)", in IEA HPT Magazine Vol.37 No 2/2019, pp. 20 - 22; <https://doi.org/10.23697/tt78-jv66>

ASHRAE (2016): American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE Refrigerant Designations. Website. Online verfügbar unter <https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines/ashrae-refrigerant-designations> (abgerufen am 10. Jänner 2019)

Behringer, et al. (2021): Persistente Abbauprodukte halogenerter Kälte- und Treibmittel in der Umwelt: Art, Umweltkonzentrationen und Verbleib unter besonderer Berücksichtigung neuer halogenerter Ersatzstoffe mit kleinem Treibhauspotenzial
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-06_texte_36-2021_abbau_kaelte-treibmittel.pdf (abgerufen am 05. August 2022)

Bitzer (2018): Refrigerant Report 20. Technical Information A-501-20 EN. https://www.bitzer-refrigerantreport.com/fileadmin/user_upload/A-501-20.pdf (Stand: 15.7.2020)

BMK (2021a): Energiewende für Österreich eingeleitet: Bundesregierung präsentiert Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz.
https://www.bmk.gv.at/service/presse/gewessler/20210311_eag.html#:~:text=%C3%96sterreich%20wird%20im%20Jahr%202030,den%20Ausbau%20der%20Erneuerbaren%20investiert (abgerufen am 08. Dezember 2022)

BMK (2021b): Innovative Energietechnologien in Österreich, Marktentwicklung 2021,
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/iea/publikationen/schriftenreihe-2022-21-marktstatistik.php> (abgerufen am 05. August 2022)

BMNT, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, 2019. Energieeffiziente Betriebe 2018 - Liste der Ausgezeichneten. Online available at https://www.bmnt.gv.at/dam/jcr:7d933bb7-ff4c-4176-82ab-73837c824026/2018_11_27_PA%20EE%20Betriebe2018_Liste%20der%20Ausgezeichneten.xlsx (abgerufen am 12. Dezember 2019)

bmvit (2016): Österreichische Technologie-Roadmap für Wärmepumpen, 8/2016,
https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/nw_pdf/1608_endbericht_oesterreichische_technologie_roadmap_fuer_waermepumpen.pdf?m=1469661515 (abgerufen am 05. August 2022)

Bundesrecht (2022a): Gesamte Rechtsvorschrift für Grenzwertverordnung 2021, Fassung vom 05.08.2022,
<https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20001418> (abgerufen am 05. August 2022)

Bundesrecht (2022b): Gesamte Rechtsvorschrift für Kälteanlagenverordnung, Fassung vom 05.08.2022,
<https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10008237> (abgerufen am 05. August 2022)

Chemours (2016): Opteon XL20™ (R-454C) Product Information, <https://www.opteon.de/-/media/files/opteon/opteon-xl20-pib-en.pdf> (abgerufen am 16. Juli 2020)

Chemours (2016): Opteon XL41™ (R-454B) Product Information, <https://www.opteon.com/en/-/media/files/opteon/opteon-xl41-product-information.pdf?la=en> (abgerufen am 27. Juli 2020).

Chemours (2016): Opteon™ XL55 Product Information, <https://www.opteon.com/en/-/media/files/opteon/opteon-xl55-product-information.pdf> (abgerufen am 20. Juli 2020).

Chemours (2018): Opteon™ XP10 (R-513A) Product Information, <https://www.opteon.com/en/-/media/files/opteon/opteon-xp10-prodinfo.pdf> (abgerufen am 16. Juli 2020)

Chemours (2018): Opteon™ XP40 (R-449A) Product Information, <https://www.opteon.de/-/media/files/opteon/opteon-xp40-prodinfo.pdf> (abgerufen am 27. Juli 2020)

Chemours (2019): Opteon™ XP20 (R-449C) Product Information, <https://www.opteon.com/en/-/media/files/opteon/opteon-xp20-pib.pdf> (abgerufen am 27. Juli 2020)

Christoph, E.H. (2002): Bilanzierung und Biomonitoring von Trifluoracetat und anderen Halogenacetaten, Dissertation, Universität Bayreuth, <https://epub.uni-bayreuth.de/1016/1/eugen-christoph.pdf> (abgerufen am 22. Juli 2022)

CIBSE Journal: Module 99 (2016): Propane as a refrigerant for use in chillers for air conditioning applications, <https://www.cibsejournal.com/cpd/modules/2016-09-fgas/> (abgerufen am 02. Oktober 2020)

Danfoss (2020): Kältemittelooptionen derzeit und in der Zukunft

EC (2020): European Commission Harmonised Standards https://ec.europa.eu/growth/single-market/european-standards/harmonised-standards_en (abgerufen am 22. Juli 2020)

EES (2019): Engineering Equation Solver Version 10.836. F-Chart Software, Madison, Wisconsin

EN 378 (2020): Refrigerating systems and heat pumps – Safety and environmental requirements

EN378-1 (2019): Refrigerating systems and heat pumps - Safety and environmental requirements - Part 1: Basic requirements, definitions, classification and selection criteria

EU (2014): VERORDNUNG (EU) Nr. 517/2014 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 16. April 2014 über fluorierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517&rid=1> (abgerufen am 05. August 2022)

EU (2016): 'Blue Guide' für die Einführung der Regulierungen von EU-Produkten, 4933 (2016/C 272/01)

EU (2022): Vorschlag für eine VERORDNUNG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES über fluorierte Treibhausgase, zur Änderung der Richtlinie (EU) 2019/1937 und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 517/2014, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:52022PC0150> (abgerufen am 23. November 2022)

GET (2022): GET-Datenbank des Amtes der Salzburger Landesregierung, <https://www.produktdatenbank-get.at/#/> (abgerufen am 05. August 2022)

Honeywell (2014): Solstice® N13 (R-450A) Technical Data Sheet. <https://www.honeywell-refrigerants.com/europe/wp-content/uploads/2015/03/Solstice-N13-TDS-141027-LR-vF.pdf> (abgerufen am 20. Juli 2020)

Honeywell (2014): Solstice® N40 (R-448A) Technical Data Sheet, <https://www.honeywell-refrigerants.com/europe/wp-content/uploads/2015/03/Solstice-N40-TDS-141216-vF.pdf> (abgerufen am 17. Juli 2020)

Honeywell (2017): Solstice® L40X (R-455A) Technical Data Sheet, https://www.honeywell-refrigerants.com/europe/wp-content/uploads/2017/02/Honeywell-Solstice%C3%82%C2%AE-L40X-TDS_EN.pdf (abgerufen am 27. Juli 2020)

Honeywell (2018): Solstice® L41y (R-452B) Technical Data Sheet, https://www.honeywell-refrigerants.com/europe/wp-content/uploads/2018/01/Solstice-L41y-R-452B_6seiter_ES_A4_1112018_WEB-Version_2.pdf (abgerufen am 27. Juli 2020)

Honeywell (2020): Solstice® N15 (R-515B) Technical Data https://www.fluorineproducts-honeywell.com/refrigerants/wp-content/uploads/2020/02/5286_Solstice-N15-tech-sheet_web_27.01.pdf (abgerufen am 24. Juli 2020)

HPT Annex 54 (2022): HPT Annex 54 - Heat Pump Systems with Low GWP Refrigerants, Task 1: State of the Art, Country Report, AUSTRIA

Hwang, Y., Ferreira, C., Piao, C., Aute, V. Troch, S. (2016): Guideline for Life Cycle Climate Performance

IEC60335-2-40 (2014): Sicherheit elektrischer Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke - Teil 2-40: Besondere Anforderungen für elektrisch betriebene Wärmepumpen, Klimageräte und Raumluft-Entfeuchter (IEC EQV), https://shop.austrian-standards.at/action/de/public/details/659999/OVE_EN_IEC_60335-2-40_2019_08_01;jsessionid=FA926F742854BAB652E77A14829F57C1 (abgerufen am 05. August 2022)

re Anforderungen für elektrisch betriebene Wärmepumpen, Klimageräte und Raumluft-Entfeuchter (IEC EQV), https://shop.austrian-standards.at/action/de/public/details/659999/OVE_EN_IEC_60335-2-40_2019_08_01;jsessionid=FA926F742854BAB652E77A14829F57C1 (abgerufen am 05. August 2022)

IEC60335-2-89 (2015): Sicherheit elektrischer Geräte für den Hausgebrauch und ähnliche Zwecke -- Teil 2-89: Besondere Anforderungen für gewerbliche Kühl-/Gefriergeräte mit eingebautem oder getrenntem Verflüssigersatz oder Motorverdichter (IEC 60335-2-89:2010 + A1:2012, modifiziert + A2:2015, modifiziert), https://shop.austrian-standards.at/action/de/public/details/644550/OVE_EN_60335-2-89_2018_11_01;jsessionid=EFE76F25364A450D7DE03FBE617493DE (abgerufen am 05. August 2022)

IESTA (2017): Institute for Advanced Energy Systems & Transport Applications. eco2jet Project Website <http://www.iesta.at/eco2jet/> (abgerufen am 20. Juli 2020)

International Institute of Refrigeration (IIR) (2016): Guideline for life cycle climate performance.

<http://www.cold.org.gr/library/downloads/Docs/Guideline%20for%20life%20cycle%20climate%20performance.pdf> (abgerufen am 15.11.2021)

International Institute of Refrigeration (IIR) (2018): *IIR-LCCP-Calculatoin-Tool-V1.3-Feb2018.xls*. (Software)

IPCC (2007): IPCC 4th assessment report: <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar4/> (abgerufen am 23. November 2022)

IPCC (2022): IPCC 6th assessment report <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/> (abgerufen am 05. August 2022)

IPU (2021): *Pack Calculation Pro 5.0*. User's guide.

IPU (2022): *Pack Calculation Pro Version 5.1.1.0 64-bit*.
<https://www.ipu.dk/products/pack-calculation-pro/>

ISO 817:2014-06, Refrigerants — Designation and safety classification

KKA (2011): Kälte Klima Aktuell: Leitfaden für die Kältemittelauswahl. Artikel. Online verfügbar unter https://www.kka-online.info/artikel/kka_Leitfaden_fuer_die_Kaeltemittelauswahl_1270154.html, (04.04.2019)

KPC (2020): Auflistung der Wärmepumpen, die den Mindestanforderungen der EHPA-Gütesiegelkriterien Abschnitt 2.1 „Technical Conditions“ der EHPA regulations for granting the international quality label for electrically driven heat pumps in der Version 1.7 vom 07.06.2018 entsprechen. https://www.umweltfoerderung.at/fileadmin/user_upload/media/umweltfoerderung/Uebergeordnete_Dokumente/UEbersicht_Waermepumpen_EHPA.pdf (abgerufen am 05. August 2022)

Lemmon, E.W., Bell, I.H., Huber, M.L., McLinden, M.O., NIST Standard Reference Database 23 (2018): Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg.

Moisi, H., Rieberer, R., Baumhake, A. (2018): "HotCycle" – Final Project Report (FFG-Nr.: 848892), Institute of thermal Engineering, Graz University of Technology, Graz

Natiesta, T., Köfinger, C., Zach F., Verdnik, M., Rieberer, R. (2023): Task 3: Review of design optimization and advancement impacts on LCCP reduction. <https://waermepumpe-weiterbildung.at/mod/resource/view.php?id=1569> (abgerufen am 02.02.2023)

Pohlmann (2018): Taschenbuch der Kältetechnik. Heidelberg: VDE Verlag, 2018. 22nd Edition

REGULATION (EU) No 517/2014 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) No 842/2006

Rieberer, R.; Verdnik, M.; Baumhake, A. (2021): "TransCrit" – Publizierbarer Endbericht (FFG-Nr.: 865083). Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz

Tao, C., Yunho, H. (2022): HPT Annex 54: Heat Pump Systems with Low-GWP Refrigerants. Center for Environmental Energy Engineering of University of Maryland, USA

Verdnik M., Rieberer R., Baumhake A. (2020a): Entwicklung einer transkritischen R600-Hochtemperaturwärmepumpe. In: 45th Annual Meeting of the Deutscher Kälte und Klimatechnischer Verein 2019: Deutsche Kälte- und Klimatagung 2019, Ulm (IV.21, pp. 1325-1334). Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein (DKV).

Verdnik, M., Rieberer, R., Baumhake, A. (2020b): Entwicklung einer transkritischen R600-Hochtemperaturwärmepumpe. In Deutsche Kälte- und Klimatagung 2019, Ulm (IV.21, pp. 1325-1334). Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein (DKV)

Verdnik, M., Rieberer, R., Köfinger, C., Natiesta, T., Zach F. (2022): Task 2: Design guidelines for optimization of components and systems of Low GWP heat pumps, <https://waermepumpe-weiterbildung.at/mod/resource/view.php?id=1462> (abgerufen am 29.11.2022)

WKO (2014): Information für den Kälte -, Klima- und Wärmepumpenbauer, Nr. 36h-0, 30.12.2019, https://www.wko.at/branchen/sbg/gewerbe-handwerk/sanitaer-heizung-lueftung/Information-fuer-den-Kaelte-,Klima--und-Waermepumpenbaue_3.pdf (abgerufen am 05. August 2022)

Zach, F., Köfinger, C., Natiesta, T., Verdnik, M., Rieberer, R. (2022): Task 1: State of the Art, <https://waermepumpe-weiterbildung.at/mod/resource/view.php?id=1461> (abgerufen am 29.11.2022)

Zach, F., Köfinger, C., Natiesta, T., Verdnik, M., Rieberer, R. (2022): Task 4: Outlook 2030, <https://waermepumpe-weiterbildung.at/mod/resource/view.php?id=1463> (abgerufen am 29.11.2022)

Zottl, A. (2016): GreenHP Final report, https://www.ait.ac.at/fileadmin/mc/energy/downloads/TES/Final_report_GreenHP.pdf (abgerufen am 15. September 2020)

Zottl, A. 2016. GreenHP Final report, https://www.ait.ac.at/fileadmin/mc/energy/downloads/TES/Final_report_GreenHP.pdf (abgerufen am 20. April 2021).

Bachelorarbeiten

Gattermayer M. (2022): Einfluss einer Photovoltaikanlage auf die Ergebnisse einer LCCP Analyse einer Wärmepumpenanlage in einem Einfamilienhaus, Bachelorarbeit, Fachhochschule Technikum Wien

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4-1: Darstellung des österreichischen Teilvorhabens im Annex.....	13
Abbildung 5-1: Sättigungsdrücke von brennbaren Alternativen zu R134a mit GWP < 150 (links) und nicht brennbaren Alternativen (rechts). Stoffwerte für R134a, R1234yf, R1234ze(E), R450A, R513A aus Engineering Equation Solver (EES, 2019), Daten für R444A, R516A, R515B und R456A aus Refprop (Lemmon, 2018)	20
Abbildung 5-2: Volumetrische Kälteleistung von brennbaren Alternativen zu R134a mit GWP < 150 (links) und nicht brennbaren Alternativen (rechts). Stoffwerte für R134a, R1234yf, R1234ze(E), R450A, R513A aus EES (EES, 2019), Daten für R444A, R516A, R515B und R456A aus Refprop (Lemmon, 2018)	21
Abbildung 5-3: Sättigungsdrücke von brennbaren Alternativen zu R407C mit GWP < 150 (links) und nicht brennbaren Alternativen (rechts). Stoffwerte für R407C, R454C, R455A, R448A und R449A aus EES (EES, 2019), Daten für R457A, R459B, R465A, R460B und R449C aus Refprop (Lemmon, 2018) ..	21
Abbildung 5-4: Volumetrische Kälteleistung von brennbaren Alternativen zu R407C mit GWP < 150 (links) und nicht brennbaren Alternativen (rechts). Stoffwerte für R407C, R454C, R455A, R448A und R449A entnommen aus EES (EES, 2019), Daten für R457A, R459B, R465A, R460B und R449C entnommen aus Refprop (Lemmon, 2018).....	22
Abbildung 5-5: Sättigungsdrücke von brennbaren Alternativen zu R410A mit GWP < 150 (links) und der nicht brennbaren Alternative R466A (rechts). Stoffwerte für R410A, R290, R454B, R32 und R452B entnommen aus EES (2019), Daten für R466A und R459A aus Refprop (Lemmon, 2018).....	22
Abbildung 5-6: Volumetrische Kälteleistungen von brennbaren Alternativen zu R410A mit GWP < 150 (links) und der nicht brennbaren Alternative R466A (rechts). Stoffwerte für R410A, R290, R454B, R32 und R452B aus EES (EES, 2019), Daten für R466A und R459A aus Refprop (Lemmon, 2018).....	23
Abbildung 5-7: Sättigungsdruck in Abhängigkeit von der Taupunkttemperatur (links) und t/h-Diagramme (rechts) der Kältemittel R290 und R410A. Eigenschaftsdaten entnommen aus (EES, 2020)	25
Abbildung 5-8 : Volumetrische Kälteleistungen von R290 und R410A in Abhängigkeit der Taupunkttemperatur, Daten entnommen aus (EES, 2020).....	25
Abbildung 5-9: Vergleich der Wärmeübertragungseigenschaften (links) und der Druckverlusteigenschaften (rechts) in Abhängigkeit der Taupunkttemperatur von R290 und R410A. Stoffdaten aus (EES, 2020)	26
Abbildung 5-10: Einstufiger Kältekreislauf mit englischer Beschriftung: "Compressor" = Verdichter "Condenser" = Verflüssiger =), „Expansion valve" = Expansionsventil, "Evaporator" = Verdampfer (Zottl, 2020).....	28
Abbildung 5-11: Kältekreislauf mit iHX mit englischer Beschriftung: "Compressor" = Verdichter "Condenser" = Verflüssiger, „Expansion valve" = Expansionsventil, "Evaporator" = Verdampfer, "Suction gas heat exchanger" = interner Wärmetauscher (Zottl, 2020).....	28
Abbildung 5-12: Kältekreis mit EVI mit englischer Beschriftung: "Compressor" = Verdichter mit Heißgaseinspritzung "Condenser" = Verflüssiger , „Expansion valve" = Expansionsventil, "Evaporator"	

= Verdampfer, "Suction gas heat exchanger" = interner Wärmetauscher, „Economizer“ = Verdampfer auf Zwischendruckniveau (Zottl, 2020)	29
Abbildung 5-13: Kältekreis der Wärmepumpe im Heizbetrieb (links) und in der Abtaukonfiguration (rechts) mit englischer Beschriftung: „Heat sink“ = Wärmesenke, "water,in" = Wärmesenkeneintritt, "water,out" = Wärmesenkenaustritt, "Condenser" = Verflüssiger, "Evaporator" = Verdampfer, „Heat source“ = Wärmequelle,"air,in" = Wärmequelleneintritt, "air,out" = Wärmequellenaustritt	30
Abbildung 5-14: Jährlich installierte Wärmepumpenanlagen in Österreich (BMK, 2021b)	39
Abbildung 5-15: Jährlich installierte Heizungs-Wärmepumpenanlagen in Österreich bis 2015 und Szenarien bis 2030 (bmvit, 2016)	39
Abbildung 5-16: Aufteilung der installierten Heizungswärmepumpen nach Bautyp bzw. Wärmequelle (BMK, 2021b)	40
Abbildung 5-17: Bestandszahlen der Wärmepumpensysteme in Österreich nach Einsatzzweck, Bautyp und Wärmequelle (BMK, 2021b)	41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1: Internationale Zusammensetzung mit den nationalen Konsortialführern des IEA HPT Annex 54 Projekts.....	11
Tabelle 4-2: Taskuntergliederung des internationalen IEA HPT Annex 54.....	12
Tabelle 4-3: Lead und involvierte Partner in den Arbeitspaketen innerhalb des Konsortiums	14
Tabelle 4-4: Projektziele des nationalen IEA HPT Annex 54.....	15
Tabelle 4-5: Eingesetzte Methoden im nationalen IEA HPT Annex 54.....	16
Tabelle 5-1: Anzahl der HerstellerInnen und Modelle von in Österreich förderfähigen Wärmepumpen nach verwendeten Kältemitteln (basierend auf (KPC, 2020)).....	19
Tabelle 5-2: Simulierte Betriebspunkte.....	31
Tabelle 5-3: Ergebnisse für das grundlegende R410A-System (*Heizleistung > 30kW).....	31
Tabelle 5-4: Ergebnisse des nicht angepassten R410A-Systems mit R290 (*Heizleistung < 30 kW)	32
Tabelle 5-5: Ergebnisse des verbesserten R290 Systems.....	33
Tabelle 5-6: CO _{2e} -Emissionsanteile, TEWI und LCCP des Basissystems und des optimierten R290-Systems.....	38

Abkürzungsverzeichnis

AEA	Austrian Energy Agency
AHRI	Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute
AHRTI	Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Technology Institute
AIT	Austrian Institute of Technology
AP	Arbeitspaket
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
BMK	Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
BMVIT	Bundesministerium für Verkehr Innovation und Technologie
CIBSE	Chartered Institution of Building Services Engineers
cm	Zentimeter
CO ₂	Kohlendioxid
CO ₂ e	CO ₂ -Äquivalent
COP	Coefficient of Performance (Leistungszahl)
d	Durchmesser
EC	European Commission
EES	Engineering Equation Solver
EN	Europäische Norm
EU	Europäische Union
EVI	Kältemitteleinspritzung in Verdichter; Enhanced Vapour Injection (engl.)
F&E	Forschung und Entwicklung
FFG	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft m.b.H.
F-Gas	Fluoriertes Treibhausgas
FTI	Forschung, Technologie und Innovation
g	Gramm
GET	Gebäude- und Energietechnik
Gl.	Gleichung
GWP	Global Warming Potential (Treibhauspotenzial)
h	Stunde
HFKW	Fluorkohlenwasserstoffe
HFO	Hydrofluorolefin
HP	Heat Pump (Wärmepumpe)
HTP	Heat Pumping Technologies
IEA	International Energy Agency (Internationale Energieagentur)
IEC	International Electrotechnical Commission
IESTA	Institute for Advanced Energy Systems & Transport Applications
iHX	Interner Wärmetauscher
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen)
ISO	International Organization for Standardization
IWT	Institut für Wärmetechnik
K	Kelvin
KFZ	Kraftfahrzeug
kg	Kilogramm
KKA	Kälte Klima Aktuell

KPC	Kommunalkredit Public Consulting
kW	Kilowatt
LCCP	Life Cycle Climate Performance (Lebenszyklus Klima-Performance)
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration
MFH	Mehrfamilienhaus; Multi-family house (engl.)
min-1	Drehzahl pro Minute
MJ	Megajoule
MW	Megawatt
N/A	nicht anwendbar bzw. nicht angegeben
Nr.	Nummer
ODP	Ozon Depletion Potential
ÖGKT	Österreichische Gesellschaft der Kältetechnik
ÖKKV	Österreichischer Kälte- und Klimatechnischer Verein
PV	Photovoltaik
R	Refrigerant (Kältemittel)
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals ‚Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung von Chemikalien‘; Verordnung
SCOP	Seasonal Coefficient of Performance
SDB	Sicherheitsdatenblatt
TCP	Technology Collaboration Program
TEWI	Total Equivalent Warming Impact
TFA	Trifluoressigsäure
TU	Technische Universität
UNEP	UN Environment Programme
VO	Verordnung
Vol.-%	Volumensprozent
WKO	Wirtschaftskammer Österreich
WP	Wärmepumpe

A large, light blue geometric shape, resembling a right-angled triangle or a trapezoid, is positioned on the right side of the page. It is oriented with its hypotenuse facing left, towards the center of the page. The shape is solid and has a consistent light blue color.

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)