

IEA Wärmepumpen- technologien (HPT) Annex 41: Cold Climate Heat Pumps

Arbeitsperiode 2012 - 2017

T. Fleckl, C. Reichl
M. Popovac, S. Seichter
R. Rieberer, H. Moisi
A. Heinz, F. Hengel

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

12/2018

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

IEA Wärmepumpentechnologien (HPT) Annex 41: Cold Climate Heat Pumps

Arbeitsperiode 2012 - 2017

Dr. Thomas Fleckl, Dr. Christoph Reichl,
Dr. Mirza Popovac, DI Sandra Seichter
AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Univ.-Prof. Dr. René Rieberer, DI Heinz Moisi,
Dr. Andreas Heinz, Franz Hengel
TU Graz - Institut für Wärmetechnik

Wien, September 2017

Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie

IEA FORSCHUNGS
KOOPERATION

Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Programm FORSCHUNGSKOOPERATION INTERNATIONALE ENERGIEAGENTUR. Es wurde vom Bundesministerium für Verkehr, 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.

Dipl. Ing. Michael Paula

Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	4
Abstract	5
1. Einleitung.....	6
1.1. Allgemeine Einführung in die Thematik.....	6
1.2. Ausgangssituation/Motivation des Projektes	6
1.3. Beschreibung der Vorarbeiten zum Thema	7
1.4. Kurzbeschreibung des Aufbaus	9
2. Hintergrundinformation zum Projektinhalt.....	10
2.1. Darstellung des gesamten Kooperationsprojektes	10
2.2. Beschreibung der österreichischen Kooperation	12
2.3. Methodik, Daten und Vorgangsweise	12
3. Ergebnisse des Projektes	14
3.1. Ziele des nationalen Beitrages	14
3.2. Beschreibung der Projektergebnisse.....	14
3.3. Veröffentlichungen im Rahmen des Annex Projekts.....	26
4. Vernetzung und Ergebnistransfer	29
4.1. Nationale Zielgruppe und deren Einbindung in das Projekt	29
4.2. Einbindung der relevanten Stakeholder	29
4.3. Relevanz und des Nutzens der Projektergebnisse:	30
5. Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen	31
5.1. Erkenntnisse für das Projektteam	31
5.2. Weiterverwertung der Projektergebnisse (im Projektteam)	32
5.3. Relevante weitere Zielgruppen (außerhalb des Projektteams)	33
6. Verzeichnisse	34
6.1. Projekt-Websites	34
6.2. Literaturverzeichnis	34
6.3. Tabellenverzeichnis	35
6.4. Abbildungsverzeichnis	35
6.5. Abkürzungsverzeichnis	36

Kurzfassung

Ausgangssituation/Motivation: Um die ambitionierten Ziele der EU zu erreichen, sind in den nächsten Jahren verstärkt Gebäude aller Größenordnungen und Verwendungszwecke entsprechend thermisch zu sanieren und ineffiziente, meist auf fossilen Energieträger basierende Heizsysteme, durch effizientere Technologien zu ersetzen. Aufgrund ihrer einfachen Installation und geringen Investitionskosten stellen luftbasierende Wärmepumpensysteme eine attraktive Alternative dar. Dieser Wärmepumpentyp hat den Nachteil, dass die Heizkapazität und Leistungszahl bei niedrigeren Außentemperaturen sehr stark sinken. Ein besonderes Problem stellt die Vereisung des Wärmeübertrages in kalten Klimazonen dar.

Zielsetzung: Der nationale Beitrag zum IEA HPP Annex 41 Projekt zielte darauf ab, die Effizienz von Außenluft-Wärmepumpen vor allem in kalten Klimata zu erhöhen, um sie für Einsatzorte mit tiefen Außentemperaturen bis -25°C effizienter und damit attraktiver zu machen.

Methodische Vorgehensweise, Ergebnisse: Es wurden Modelle zum Frostansatz- sowie zur Frostverdichtung sowie zur Berechnung der Vereisung von Wärmeübertragern erstellt, um damit zukünftig geeignete Lamellenstrukturen vorselektieren zu können. Das reduziert die Prototypenzahl für experimentelle Untersuchungen und den damit verbundenen Aufwand. Zudem wurde der Zusammenhang zwischen Vereisungszeiten einer Lamellengeometrie zum erreichbaren Wärmetransfer quantifiziert. Auf der Multi-Port-Extrusion Technologie basierende Lamellenwärmeübertrager zeigten speziell in der initialen Eisbildung Vorteile im Vergleich zu Rohrbündelwärmeübertragern. Ausgewählte Beschichtungen am Wärmeübertrager beeinflussten das Vereisungsverhalten nur in der ersten Frostphase. Die Kältemittelverteilung im Wärmeübertrager kann unmittelbar aus dessen Vereisungsverhalten abgeleitet werden, wenn die Strömungsverhältnisse um den Wärmetauscher bekannt sind. Vereinfachte Kältekreismodelle wurden erstellt und ein detailliertes Modell für LI-Kreisläufe am Laborprototyp verifiziert. Damit wurde der SCOP für unterschiedliche Klimata errechnet. Die beste Performanz ergab sich bei der Analyse mit dem vereinfachten Modell für den Kältekreislauf mit Ejektor. Die Nutzung einer Kaskade zeigte eine COP Verbesserung von bis zu 5% im Vergleich zu konventionellen Kreisläufen. COP Erhöhungen um 4% bis 10% sind bei einer Verdampfertemperatur von -30°C mit Flash Tank oder internem Wärmeübertrager möglich. Im Vergleich zu einem konventionellen Kältekreislauf konnten Kaskade, Zwischenkühler und LI Kreisläufe als vielversprechende Alternativen evaluiert werden.

Die Ergebnisse dienen dem besseren Verständnis und der Beschreibung ausgewählter Problemfelder und wurden der nationalen Wärmepumpenindustrie zur Weiterentwicklung ihrer Produkte zur Verfügung gestellt. Sie können damit die Effizienz ihrer luftbasierenden Wärmepumpensysteme erhöhen und ihre Wettbewerbsfähigkeit stärken.

Abstract

Motivation: In order to achieve the ambitious goals of the EU, buildings of all sizes and purposes will have to be thermally renovated and inefficient heating systems, mostly based on fossil fuels, need to be replaced by more efficient technologies in the next few years. Air-based heat pump systems are an attractive alternative due to their simple installation and low investment costs. This type of heat pump has the disadvantage that its heating capacity and efficiency drop sharply at lower outside temperatures. A particular problem is the icing of the heat exchanger in cold climates.

Aim: The national contribution to the IEA HPP Annex 41 project aimed at increasing the efficiency of outdoor air heat pumps, especially in cold climates, in order to make them more efficient and thus more attractive for locations with low outdoor temperatures down to -25°C .

Research Approach and Results: Models for frost condensation and frost condensation as well as for the calculation of the icing of heat exchangers were created in order to be able to pre-select suitable fin structures in the future. This reduces the number of prototypes for experimental investigations and the associated effort. In addition, the correlation between the icing times of a fin geometry and the achievable heat transfer was quantified. Lamella heat exchangers based on multi-port extrusion technology showed advantages over shell-and-tube heat exchangers, especially in the initial ice formation stage. Selected coatings on the heat exchanger affected the icing behaviour only in the initial frost phase. The refrigerant distribution in the heat exchanger can be derived directly from its icing behaviour if the flow conditions around the heat exchanger are known. Simplified refrigeration circuit models were created and a detailed model for LI circuits was verified on the laboratory prototype. The SCOP for different climates was calculated with this method. The best performance was achieved with the simplified model for the refrigeration circuit with ejector. The use of a cascade showed a COP improvement of up to 5% compared to conventional cycles. COP increases of 4% to 10% are possible at an evaporator temperature of -30°C with flash tank or internal heat exchanger. Cascade, intercooler and LI circuits were evaluated as promising alternatives compared to a conventional refrigeration cycle.

The results are intended to provide a better understanding and description of selected problem areas and have been made available to the national heat pump industry for further development of its products. They can thus increase the efficiency of their air-based heat pump systems and strengthen their competitiveness.

1. Einleitung

1.1. Allgemeine Einführung in die Thematik

Die Einhaltung ambitionierter Klima-, Energie- und Umweltziele verlangt den Umbau in ein CO₂-armes, effizientes und erneuerbares Energiesystem. Wärmepumpen sind eine vielfältig einsetzbare Technologie zur Raumwärmebereitstellung, Warmwasserbereitung und Kühlung von Gebäuden, mit einem großen Potenzial, einen substanziellen Beitrag zum Umbau des Energiesystems zu leisten.

Gemäß des neuesten IEA Reports über die Perspektiven Erneuerbarer Energietechnologien können Wärmepumpen wesentlich zur Erreichung des 2°C-Ziels beitragen. Im „Beyond 2°C-Szenario“ stellen Wärmepumpen sogar die wesentliche Schlüsseltechnologien im Gebäudesektor dar.¹ Das Potenzial der Wärmepumpen-Technologien in Österreich zur Einsparung an THG-Emissionen bis zum Jahr 2030 liegt dabei - je nach Szenario - zwischen 1,1 Mio. tCO₂äqu und 3,02 tCO₂äqu².

1.2. Ausgangssituation/Motivation des Projektes

Luftbasierende Wärmepumpen stellen aufgrund ihrer einfachen Installation und damit verbundenen geringen Investitionskosten eine immer attraktiver werdende Heiz- und Kühltechnologie dar. Ein Sachverhalt der sich u.a. darin äußert dass luftbasierte Systeme seit 2014 den Hauptteil der in Österreich verkauften Wärmepumpensysteme darstellen. Dieser in ganz Europa sehr beliebte Wärmepumpentyp³ hat den Nachteil, dass seine Heizkapazität und Leistungszahl bei niedrigeren Außentemperaturen sehr stark sinken, was eine im Vergleich mit anderen Wärmepumpensystemen geringe Jahresarbeitszahl (Effizienz während einer Heizperiode) nach sich zieht.

Ein besonderes Problem stellt dabei das Auftreten der Vereisung bei 0°C in kalten Klimazonen dar. Im alpinen Raum, in dem sich auch Österreich befindet, sowie in einigen Exportländern österreichischer Hersteller sind Temperaturen bis zu -25°C möglich und üblich. Diese tiefen Temperaturen stellen eine Herausforderung hinsichtlich optimierter Enteisungsstrategien bzw. Strategien zur Verhinderung von Vereisung am Außenluft-Wärmeübertrager sowie für die Kältekreisconfiguration dar. Dieser Sachverhalt spiegelt sich auch in einer Adaption der Prüfbedingungen wieder. So werden mittlerweile bei Prüfungen von Luft-Wasser-Wärmepumpen nach EN14825 Prüfpunkte bis -22°C aufgenommen, d.h. diese tiefen Temperaturen sind auch für die Hersteller von großem Interesse.

Es gibt vielzählige Varianten von Kältekreisläufen, die darauf abzielen, die Leistungszahl vor allem bei steigenden Druckverhältnissen bzw. bei größer werdendem Temperaturhub (darunter versteht man die Differenz zw. Verdampfungs- und Kondensationstemperatur) zu verbessern. Mehrere Konzepte werden dabei in der fachspezifischen Literatur behandelt. Dazu zählen insbesondere „Economizer“, „Ejektor“, „Flüssigeinspritzung in den Kompressor“ und „Steigerung der Kältemittelunterkühlung“. Um das Potenzial zur Effizienz- und Leistungssteigerung beurteilen zu können, bedarf es grundlegender Studien unterschiedlichster Einflüsse, die mittels Experimenten sehr aufwendig zu eruieren sind. Hier sollte eine detaillierte Simulation, wie sie in anderen Branchen (z.B. in der Automobilindustrie) bereits Anwendung findet, eine essentielle Unterstützung bieten können. Die im

¹ Vgl. IEA, Energy Technology Perspectives 2017, June 2017

² Vgl. M. Hartl et al: Österreichische Technologie-Roadmap für Wärmepumpen, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Berichte aus Energie- und Umweltforschung, 08/2016

³ Vgl. EHPA, European Heat Pump Market and Statistics Report 2015, September 2016

Annex Projekt durchgeführten Untersuchungen leisten einen wichtigen Beitrag zur Sicherung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit österreichischer Hersteller von Wärmepumpen und deren Komponenten, und unterstützen die nationale Branche bei der Herstellung qualitativ hochwertiger Wärmepumpen zur Abgrenzung gegenüber den asiatischen Billiganbietern.

1.3. Beschreibung der Vorarbeiten zum Thema

Die ARGE hat umfassendes relevantes Know-how aus (inter)nationalen F&E-Projekten in das Annex Projekt angebracht. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über diese Projekte sowie deren Zielsetzungen.

Tabelle 1: Übersicht Vorarbeiten

Projekttitle	Reduktion der Vereisung von Verdampfern in Kühlmöbeln durch optimierte Strömungsführung und moderne Beschichtungen
Kurztitel	Nolce
Kurzbeschreibung	Hauptziel dieses Projektes war es, durch genaue Untersuchungen der Vorgänge bei der Vereisung von Verdampfern und Platten im Zusammenhang mit „intelligenten“ Beschichtungen und „intelligenten Oberflächengeometrien“ Wege zu finden, die Vereisung zu verringern, zu verzögern oder im besten Fall gänzlich zu verhindern. Die Vereisungsvorgänge sollten durch Simulation numerisch optimal beherrscht werden, um in Zukunft eine Prototypenauslegung von Verdampfern unter Berücksichtigung der Vereisungseffekte zu ermöglichen.
Projektlaufzeit	1.4.2009 – 31.3.2012
Förderstelle	BMVIT/FFG, Bridge Projekt
FFG-Projektnummer	820108
Projektpartner:	AIT, 1 Unternehmenspartner

Projekttitle	Rauchgaskondensation der Zukunft mit hohem Jahresnutzungsgrad durch Kombination mit einer Industrierärmepumpe
Kurztitel	ICON
Kurzbeschreibung	Projektziel war die Verdoppelung der Wärmeausbeute aus Rauchgaskondensationsanlagen durch die effiziente Nutzung der Kondensationswärme über eine Wärmepumpenintegration mit Direktverdampfung, um damit eine Brennstoffeinsparung von rund 10% zu erreichen. Die Arbeiten beinhalteten numerische und experimentelle Forschungsarbeiten bezüglich der Entwicklung eines optimierten Kondensatorkonzeptes sowie dessen sinnvolle Systemeinbindung.
Projektlaufzeit	01.04.2011-31.03.2014
Förderstelle	KLIEN, Neue Energien 2020 4. Ausschreibung
FFG Projektnummer	829964
Projektpartner	AIT, Ochsner, BIOS, Scheuch

Projekttitle	Produktivitätssteigerung durch Management von Eisansatz an Rotorblättern
Kurztitel	Rotorblattenteisung
Kurzbeschreibung	Das Projekt Rotorblattenteisung zielte darauf ab, die Ausfälle der Windenergieproduktion durch Vereisung zu reduzieren und damit gerade in den Wintermonaten, in denen andere erneuerbare Energie wie Wasserkraft, Solarthermie und Photovoltaik prinzipiell geringere Erträge liefern, durch geringeren Einsatz von fossilen Energieträgern den Ausstoß von CO ₂ zu reduzieren. Dazu wurde Forschung an drei innovativen Technologieoptionen durchgeführt: Nutzung von Sublimation und Minimierung von Eisansatz, Entwicklung spezieller Blattoberflächenschichten sowie aktives elektrisches Enteisen.
Projektlaufzeit	1.10.2011 – 31.3.2014
Förderstelle	KLIEN, Neue Energien 2020, 5. Ausschreibung
FFG-Projektnummer	834684
Projektpartner:	LKR, AIT Energy, Web Windenergie AG, Sternwind, Villinger, AAC GmbH

Projekttitlel	Next Generation Heat Pump for Retrofitting Buildings
Kurztitel	GreenHP
Kurzbeschreibung	Das Projektziel war die Entwicklung eines hoch effizienten Wärmesystems basierend auf innovativen Luft / Wasserwärmepumpen für den Einsatz in sanierten Mehrfamilienhäusern sowie Gewerbegebäuden im städtischen Kontext. Die wissenschaftlich-technischen Hauptaufgaben des AIT umfassten: Durchführung numerischer und experimenteller Kondensations- und Vereisungsversuche auf Platten, Wärmeübertrager-Paketen sowie Rotorblättern. Zusammenbau und Test des Wärmepumpen-Prototyps im Labormaßstab sowie Durchführung von detaillierten Analysen hinsichtlich Effizienz, Teillast- und Abtauverhalten.
Projektlaufzeit	1.11.2012 – 31.7.2016
Förderstelle	Europäische Kommission, Projekt im 7. RP
Projektnummer	Grant Agreement No. 308816
Projektpartner	ISE Fraunhofer, KTH, Emerson Climate Technologies, Hesch, AKG, Ziehl-Abegg, EHPA, SAPA Technologies

Projekttitlel	Hocheffizientes Kühl- und Heizsystem für E- und Hybridfahrzeuge basierend auf dem umweltfreundlichen Kältemittel R744
Kurztitel	HEKH-744
Kurzbeschreibung	Ziel des Projektes war die Entwicklung, Aufbau, Abstimmung und Test einer Klima- und Heizanlage für Hybrid- und speziell für Elektrofahrzeuge zum effizienten Kühlen und Heizen des Fahrgastinnenraumes basierend auf dem Alternativ-Kältemittel CO ₂ (R744). Das Konzept beinhaltet eine R744-Klimaanlage mit integrierter Wärmepumpenfunktion zum energieeffizienten Kühlen und Heizen des Fahrzeuges mit minimiertem Batterieenergiebedarf. Im Zuge der Arbeiten wurde der Vereisungs- und Abtauvorgang am äußeren Wärmeübertrager (Verdampfer im Heizbetrieb) untersucht und mittels geeigneter Berechnungsmodelle eine vereinfachte Simulation erstellt, um das Verhalten der Anlage im Fahrzeug zu simulieren. Die Recherchen sowie Erfahrungen bei der Simulationsmodellerstellung und die Erkenntnisse bei Betrieb und Vermessung der Anlage können im gegenständlichen Projekt genutzt werden. Eine direkte Nutzung der Projektergebnisse ist aber
Projektlaufzeit	1.1.2010 – 30.6.2012
Förderstelle	KLIEN, Neue Energien 2020, 3. Ausschreibung
Projektnummer	825536
Projektpartner	TU Graz, Kompetenzzentrum – Das virtuelle Fahrzeug, 1 KMU

Projekttitlel	New Materials and Control for a next generation of compact combined Solar and heat pump systems with boosted energetic and exergetic performance
Kurztitel	MacSheep
Kurzbeschreibung	Das Ziel des Projektes ist die Entwicklung von neuen, innovativen Produkten und verbesserter Testmethoden für kompakte „Erneuerbare Energien – Verbundsysteme“ basierend auf Solarthermie und Wärmepumpen für Heizwärme- und Warmwasserbereitstellung. Die Ergebnisse und Erfahrungen sind hinsichtlich möglicher alternativer Kältekreisläufe und Optimierungsstudien für das gegenständliche Projekt hilfreich. Die direkte Übernahme von z.B. Modellen ist auf Grund ganz unterschiedlicher „Modelltiefen“ und Betriebsbedingungen nicht möglich.
Projektlaufzeit	2007-2011
Förderstelle	Europäische Kommission, Projekt im 7. RP
Projektnummer	Grant Agreement No.: 282825
Projektpartner	TU Graz, Institut für Solartechnik SPF of the University of Applied Sciences Rapperswil, Solar Energy Research Center of Högskolan Dalarna, CEA INES, CTU Prague, REGULUS spol. s.r.o., VIESSMANN Faulquemont S.A.S., Energie Solaire SA

Projekttitel	Hocheffiziente Kombinationen von Solarthermie- und Wärmepumpenanlagen
Kurztitel	SolPumpEff
Kurzbeschreibung	Systemkonzepte für Solarkombianlagen in Kombination mit Wärmepumpen für einen aktuell stark wachsenden Markt werden theoretisch analysiert und dokumentiert, im Rahmen von Feldtests qualitativ und messtechnisch evaluiert sowie an Hand von Jahressimulationen miteinander und gegenüber Referenzsystemen verglichen. Weiterentwickelte und angepasste Systemkonzepte stehen am Projektende zur Verfügung. Die Arbeiten im Zuge dieses Projektes konzentrieren sich auf die Dokumentation und Analyse von existierenden Konzepten. Es werden Simulationsmodelle erstellt, mit deren Hilfe die gemessenen Anlagen simuliert werden bzw. sollen durch Variation der wesentlichen Parameter Optimierungspotentiale und optimierte Regelkonzepte gefunden werden. Die Arbeiten zu diesem Projekt stehen als Know-how und Erfahrungen für die Erstellung von Basismodellen von Kältekreisläufen der Außenluft-Wärmepumpe zur Verfügung.
Projektlaufzeit	2010 - 2012
Förderstelle	KLIEN, Neue Energien 2020
FFG Projektnummer	825546
Projektpartner	TU Graz, 1 KMU, 1 Großunternehmen
Projekttitel	Die Thermische Batterie im Smart Grid in Kombination mit Wärmepumpen eine Interaktionsoptimierung
Kurztitel	TheBat
Kurzbeschreibung	In diesem Projekt wurden die Interaktionsmöglichkeiten von Wärmepumpen und gebäudeeigener Photovoltaik zum Load-Levelling und die optimierte Einspeisung ins bzw. dem Bezug aus dem Stromnetz untersucht und entsprechende Konzepte entwickelt. Die Entwicklung basierte auf einer ausgeklügelten Kombination und Interaktion der thermischen Speichermassen der Gebäude, der Brauchwasserspeicher und eines nutzeroptimierten Energiemanagementsystems auf Basis einer prädiktiven Regelung. Am IWT der TU Graz wurde im Rahmen des Projekts ein relativ einfaches, und damit für Jahressimulationen geeignetes, semi-physikalisches Wärmepumpenmodell weiterentwickelt und anhand von Messungen an einer Wärmepumpe im Labor parametrisiert.
Projektlaufzeit	1.10.2012 – 30.06.2016
Förderstelle	KLIEN, e!Mission.at
FFG Projektnummer	3277873
Projektpartner	TU Graz, 1 KMU

1.4. Kurzbeschreibung des Aufbaus

Kapitel 2 stellt die internationalen Kooperationspartner und die verschiedenen Tasks auf internationaler Ebene vor. Zudem werden sowohl die internationalen als auch die nationalen Ziele und die Vorgehensweise um diese zu erreichen beschrieben.

In **Kapitel 3** werden die Ergebnisse des österreichischen Beitrags beschrieben und diskutiert.

Kapitel 4 geht auf die projektrelevanten Zielgruppen sowie deren Einbindung in das Projekt ein. Zudem wird speziell der Nutzen der Technologie für Österreich dargestellt.

Schlussendlich werden in **Kapitel 5** alle Ergebnisse und die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen zusammengefasst und diskutiert.

Im **Anhang** befindet sich der österreichische Country Report, der die österreichischen Ergebnisse für die internationale Kooperation beinhaltet, sowie alle Präsentationen die im Rahmen der österreichischen Beteiligung gehalten worden sind.

2. Hintergrundinformation zum Projektinhalt

2.1. Darstellung des gesamten Kooperationsprojektes

Der internationale IEA HPP Annex 41 „Cold Climate Heat Pumps“ zielte primär darauf ab, technische Lösungsmöglichkeiten zur Erhöhung der Performance (d.h. von Leistung und Effizienz) von Wärmepumpensystemen mit Fokus auf Luft-basierten Systemen (Luft/Wasser- oder Luft/Luft-Wärmepumpen) speziell bei tiefen Außentemperaturen (≤ -7 °C) für den Einsatz im (Niedrigenergie) Wohnbau sowie in Gewerbegebäuden zu identifizieren.

Die **konkreten Inhalte auf Taskebene** werden in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Taskinhalte auf internationaler Ebene

Titel des Tasks	Inhalt des Tasks
Task 1: Literaturstudie	<ul style="list-style-type: none"> - Analyse der bisher durchgeführten Forschungsarbeiten in den IEA HPP Mitgliedsländern zur Identifikation geeigneter luftbasierender Wärmepumpen-Systemdesigns mit Fokus auf den Themen: <ul style="list-style-type: none"> - Vereisung von Wärmeübertragern, - Auslegung für kalte Klimazonen, - Regelung, - Systemdesign und Integration
Task 2: Systemdesign und Anwendungsstudien: Modellierung und / oder Messungen unter Laborbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> - Modellierung fortschrittlicher Konzepte, - Entwicklung eines Designs für einen Laborprototypen, - Zusammenbau des Laborprototypen und Durchführung von Labormessungen
Task 3: Simulation der Energieeinsparung von optimierten Prototypen	<ul style="list-style-type: none"> - Simulation der erwarteten Performance der bevorzugten Konzepte für verschiedene Klimaregionen sowie unterschiedlicher Parametrierung bez. Größe, Regelung, etc.
Task 4: Bericht und Disseminierungsaktivitäten	<ul style="list-style-type: none"> - Zusammenfassung der Ergebnisse in einem Bericht, - Durchführung von Disseminierungsaktivitäten, - Entwicklung von Vorschlägen für weitere Entwicklungen

Zielgruppe: Die Aktivitäten des IEA HPP Annex 41 richteten sich an Hersteller von Wärmepumpen, Planer und Installateure von Wärmepumpenanlagen, Gebäudeeigentümer und –betreiber in kalten Regionen, sowie generell alle Einrichtungen die sich mit der Reduktion des Energieverbrauches beschäftigen, wie Energieagenturen, Energieversorgungsunternehmen, öffentliche Entscheidungsträger, etc.

Teilnehmende Länder und Organisation: Am IEA HPP Annex 41 Projekt haben **8 Organisationen** aus **4 Ländern** teilgenommen. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die Organisationen, die Ansprechpersonen sowie deren Kontaktdaten.

Tabelle 3: Teilnehmende Organisationen am IEA HPP Annex 41

Land	Teilnehmende Organisationen
USA (Operating Agent)	<ul style="list-style-type: none"> – Building Technologies Research & Integration Center, Oak Ridge National Laboratory, PO Box 2008, Bldg. 3147, MS-6070, Oak Ridge, TN 37831-6070 – Purdue University, Reilly Professor of Mechanical Engineering, Ray W. Herrick Laboratories, 140 S. Martin Jischke. Dr. West Lafayette, IN 47907 USA
Japan	<ul style="list-style-type: none"> – Waseda University, 3-4-1, Ohkubo, Shinjuku-k, Tokyo 169-8555, JAPAN, Phone: +81-3-5286-3251, Fax: +81-495-24-6190 – Heat Pump & Thermal Storage Center of Japan, Hulic Kakigaracho Bldg., 1-28-5 Nihonbashi Kakigaracho Chuo-ku, Tokyo 103-0014, JAPAN
Österreich	<ul style="list-style-type: none"> – AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Center for Energy, A-1210 Vienna, Giefinggasse 2 – TU Graz, Institut für Wärmetechnik, Inffeldgasse 25/B, A-8010 Graz
Kanada	<ul style="list-style-type: none"> – Laboratoire des Technologies de l'Energie, Institut de Recherche, Hydro-Québec, 600 de la Montagne, C.P. 990, Shawinigan, Québec, G9N 7N5 Canada – Canmet Energy, Ressources Naturelles Canada, Naturelles Ressources Canadam, 1615 Bvd Lionel-Boulet, Varennes, Québec, J3X 1S6 Canada

Das **nationale IEA HPP Annex 41 Projekt** zielte darauf ab, einen Beitrag zur Erhöhung der Effizienz von luftbasierenden Wärmepumpen vor allem in kalten Klimata zu leisten, um sie auch für Einsatzorte mit tiefen Außentemperaturen wirtschaftlicher zu machen.

Konkret wurden auf **nationaler Ebene** folgende **Ziele** verfolgt, sowie auch entsprechend erreicht.

- Einbringung der österreichischen Beiträge in internationale Expertenmeetings und Stärkung der internationalen Sichtbarkeit der österreichischen Wärmepumpenforschung;
- Information der österreichischen Stakeholder über die Projektaktivitäten sowie Verbreitung der nationalen und internationalen Ergebnisse und Erkenntnisse;
- Untersuchung von Enteisungsstrategien bzw. Strategien zur Verzögerung oder Verminderung von Vereisung bei tiefen Temperaturen bis -25°C;
- Sondierung von möglichen Systemdesigns von Außenluft-Wärmepumpen mit speziellem Fokus auf effizienten Betrieb bei tiefen Umgebungstemperaturen;
- Systemmodellierung von verschiedenen Außenluft-Wärmepumpen-Modifikationen für tiefe Umgebungstemperaturen;
- Durchführung von Simulationsstudien und Vergleich der unterschiedlichen Systemmodifikationen; sowie
- Messungen an einer Versuchsanlage einer Variante bei tiefen Umgebungstemperaturen

Tabelle 4 gibt einen Überblick über die nationalen Inhalte und deren Bezug zu den Tasks des internationalen Annex-Projekts.

Tabelle 4: Taskinhalte auf nationaler Ebene

Titel des Tasks	Inhalt des Tasks
Task 1: Literaturstudie	<ul style="list-style-type: none"> - Beitrag im Zuge der Sondierung möglicher Systemdesigns von Außenluft-Wärmepumpen für tiefe Umgebungstemperaturen (IWT)
Task 2: Systemdesign und Anwendungsstudien: Modellierung und / oder Messungen unter Laborbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> - Durchführung von Vereisungsversuchen bis auf -25°C am AIT Vereisungswindkanal zur Evaluierung unterschiedlicher Wärmeübertragertypen - Detaillierte Modellierung von Außenluft-Wärmepumpen-Modifikationen für die Simulationsrechnung - Vermessung des Betriebsverhalten einer Versuchsanlage (einer Kreislaufvariante) bei tiefen Umgebungstemperaturen zur Absicherung des Simulationsmodells
Task 3: Simulation der Energieeinsparung von optimierten Prototypen	<ul style="list-style-type: none"> - Vergleich verschiedener Kreislaufmodifikationen anhand von Simulationsrechnungen - Aufzeigen von Optimierungspotenzialen
Task 4: Bericht und Disseminierungsaktivitäten	<ul style="list-style-type: none"> - Erstellung des nationalen Country Reports - Aktive Teilnahme an Disseminierungsaktivitäten wie z.B. an der Erstellung des internationalen Endberichts

2.2. Beschreibung der österreichischen Kooperation

Die nationalen Arbeitsgemeinschaft bestand aus dem Center for Energy des AIT Austrian Institute of Technology GmbH und dem Institut für Wärmetechnik der TU Graz (IWT). Beide Institute haben umfangreiche Erfahrungen in der Abwicklung von internationalen Forschungsprojekten und arbeiten seit langem erfolgreich in zahlreichen nationalen Projekten (wie z.B. InnoGEN, NexGen, HyPump, etc.) als auch in internationalen Projekten (IEA HPP Annexe 34, 35, 42, 43) zusammen. Diese gute Kooperation und die jahrelange Erfahrung im Projektmanagement spiegeln sich auch in der reibungsfreien Abwicklung der österreichischen Teilnahme am IEA HPP Annex 41 wider. Synergien aus den Kompetenzen beider Partner konnten bestens genutzt werden.

2.3. Methodik, Daten und Vorgangsweise

Im nationalen Annex Projekt wurden sowohl numerische als auch experimentelle Arbeiten an beiden teilnehmenden Instituten durchgeführt.

Am AIT wurde ein Modell zur Beschreibung von Eiswachstum und -verdichtung in die OpenSource Navier Stokes Löser Suite OpenFoam implementiert. Damit war es möglich die Vereisung von unterschiedlichen Wärmeübertrager-Lamellengeometrien zu simulieren. Weiters ermöglichten diese dreidimensionalen transienten Modelle eine Analyse der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Strömung während der Vereisung von Wärmeübertragern.

Zudem wurde am AIT ein Windkanal zum Test des Frost-, Kondensations- und Abtauverhaltens Wärmeübertragerelemente unterschiedlicher Lamellengeometrien und -oberflächenbeschichtungen aufgebaut. Der Prüfstand wurde innerhalb einer Klimakammer platziert um die notwendigen Randbedingungen zu stabilisieren. Zur Charakterisierung der Strömung wurde Particle Image Velocimetry (PIV) und Hitzdrahtanemometrie (CTA) eingesetzt. Außerdem konnte mittels Bildanalyse mit konventionellen und Wärmebildkameras die Vereisung in Abhängigkeit der verschiedenen

experimentellen Parameter analysiert werden. Darüber hinaus war mit Hilfe einer Wägung des abrinnenden Wassers bei der Abtauung des horizontalen Verdampfers der GreenHP eine zweidimensional orts aufgelöste Bestimmung des Eisgewichts möglich, welches mit den Simulationsresultaten verglichen wurde. Damit kann eine ausgezeichnete Charakterisierung der Kältemittelverteilung im Verdampfer erzielt werden, wenn die Luft-Strömungsgeschwindigkeit über den Verdampfer mittels Sonden- oder Partikelmesstechnik bekannt ist.

Das IWT hat - unter Nutzung des "Engineering Equation Solvers" (EET) - vereinfachte Simulationsmodelle unterschiedlicher Wärmepumpen-Layouts erstellt. Basierend auf dem LI-Kreislauf wurden nachfolgend detaillierte Modelle entwickelt. Zudem wurde ein Prototyp eines LI Wärmepumpensystems mit Scroll Verdichter in den Klimakammern des IWT vermessen und die Ergebnisse mit den Simulationen verglichen. Basierend auf den IWT Simulationen und Messungen am Prototyp wurden die Heizleistung, der elektrische Stromverbrauch und die Verdichteraustrittstemperatur berechnet. Daraus kann mittels eines vereinfachten Modells für ein Referenzgebäude der jährliche elektrische Energieverbrauch und die jährliche thermische Energie für die unterschiedlichen Systeme ermittelt werden. Durch Kombination der Klimadaten von 5 ausgewählten Regionen wurde damit der SCOP errechnet und mit den Werten konventioneller Systeme verglichen.

3. Ergebnisse des Projektes

3.1. Ziele des nationalen Beitrages

Die konkreten Ziele des nationalen Beitrages zum IEA HPP Annex 41 Projekts stellen sich auf Arbeitspaket-Ebene wie folgt dar:

Arbeitspaket	Ziele der Arbeitspakete
1	<ul style="list-style-type: none">• Einbringung der österreichischen Beiträge in internationale Expertenmeetings und Stärkung der internationalen Sichtbarkeit der österreichischen Wärmepumpenforschung.• Information der österreichischen Stakeholder über die Projektaktivitäten sowie Verbreitung der nationalen und internationalen Ergebnisse und Erkenntnisse.
2	<ul style="list-style-type: none">• Untersuchung von Enteisungsstrategien bzw. Strategien zur Verzögerung oder Verminderung von Vereisung bei tiefen Temperaturen bis -25°C.
3	<ul style="list-style-type: none">• Sondierung von möglichen Systemdesigns von Außenluft-Wärmepumpen mit speziellem Fokus auf effizienten Betrieb bei tiefen Umgebungstemperaturen.• Systemmodellierung von verschiedenen Außenluft-Wärmepumpen-Modifikationen für tiefe Umgebungstemperaturen.• Durchführung von Simulationsstudien und Vergleich der unterschiedlichen Systemmodifikationen; sowie Messungen an einer Versuchsanlage einer Variante bei tiefen Umgebungstemperaturen.

3.2. Beschreibung der Projektergebnisse

In folgenden werden die Projektergebnisse auf Arbeitspaket-Ebene dargestellt.

AP1: Projektmanagement und Dissemination

Die Ergebnisse der Disseminierung werden umfassend in Kapitel 4 bzw. 5 dargestellt.

AP2: Durchführung von Vereisungsversuchen bis -25°C

Ziel der Versuche war es, das Vereisungsverhalten von Verdampfern nach dem Stand der Technik mit neuen Konzepten, die aus weiteren am AIT laufenden Forschungsprojekten stammen, bei Lufttemperaturen bis -25°C zu vergleichen.

Die Arbeiten in AP2 wurden mit der Planung des Versuchsdesign für die vorgesehenen Vereisungsversuche an Verdampfern am AIT begonnen. Die österreichischen Wärmepumpenhersteller wurden eingebunden, indem sie zu den spezifischen Abmessungen ihrer in Luft/Wasser-Wärmepumpen eingesetzten Verdampfer strukturiert mittels eines Fragebogens befragt wurden (Skizze dazu siehe **Abbildung 1**). Als Parameter wurden der Rohrdurchmesser, Rohrabstände, Lamellendicke bzw. die Lamellenabstände abgefragt. Aus den Antworten wurde die Dimensionierung des verwendeten Referenzmusters abgeleitet.

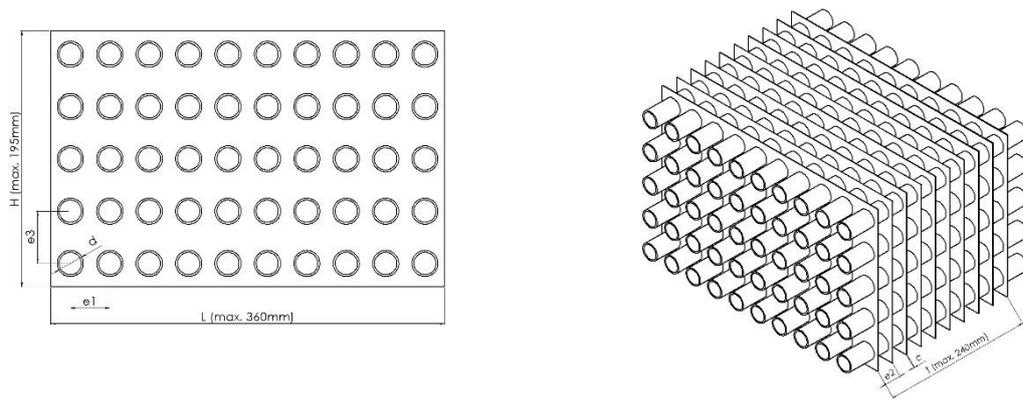


Abbildung 1: Skizzen zur Bemaßung des Referenzmusters für die Vereisungsversuche. Vorderansicht (links), Gesamtansicht (rechts)

Die Vereisungsversuche wurden in **drei Phasen** durchgeführt. In der **ersten Phase** wurden am AIT die Prüfstände adaptiert, um Lufttemperaturen von bis zu -25°C zu erreichen, und Messungen bis zu -25°C durchführen zu können. Zudem wurden die ausgewählten Wärmeübertragerpakete hergestellt (siehe Abbildung 5).



Abbildung 2 (links): Versuchsaufbau in der AIT Klimakammer ohne Verbindungsrohrleitungen; (rechts): MPE-Röhren-Lamellen-Wärmeübertragerpaket eingebaut im Strömungskanal



Abbildung 3: Überblicksdarstellung mit Einströmrohr, und Ausgleichskammer



Abbildung 4: (links): gerades Kanalstück; (mitte): Messbox mit Waagen; (rechts): Ausgangsrohr mit Ventilator

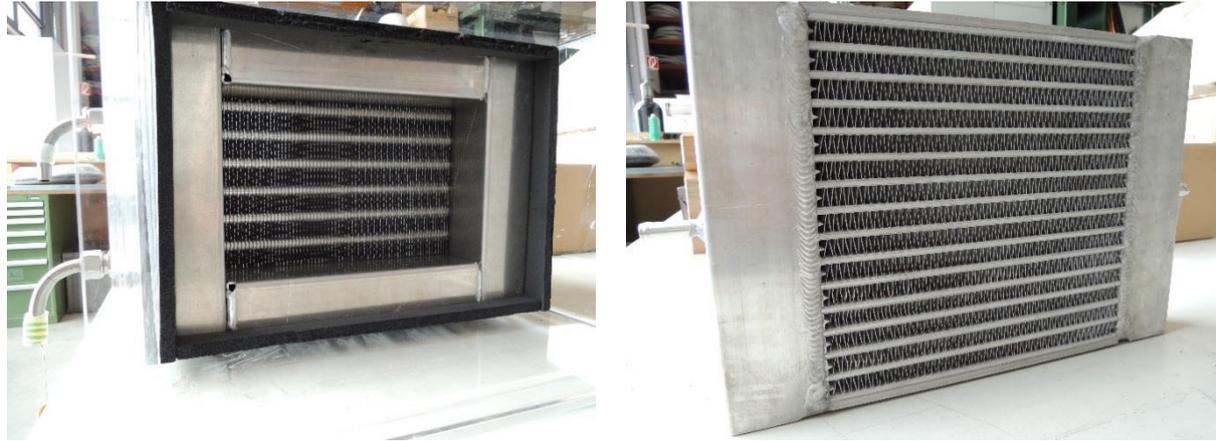


Abbildung 5: (links): konventioneller Rohrbündel-Lamellen Wärmeübertrager (CTfin); (rechts): innovativer Aluminium MPE Wärmeübertrager (MPEfin)

In der **zweiten Phase** wurden die Messungen durchgeführt. Dabei gelang die transiente Aufzeichnung der Massenzunahme des Eises (siehe Abbildung 6) während des Vereisungszyklus und damit der Vergleich des Vereisungsverhaltens der beiden untersuchten Wärmeübertrager-Typen.

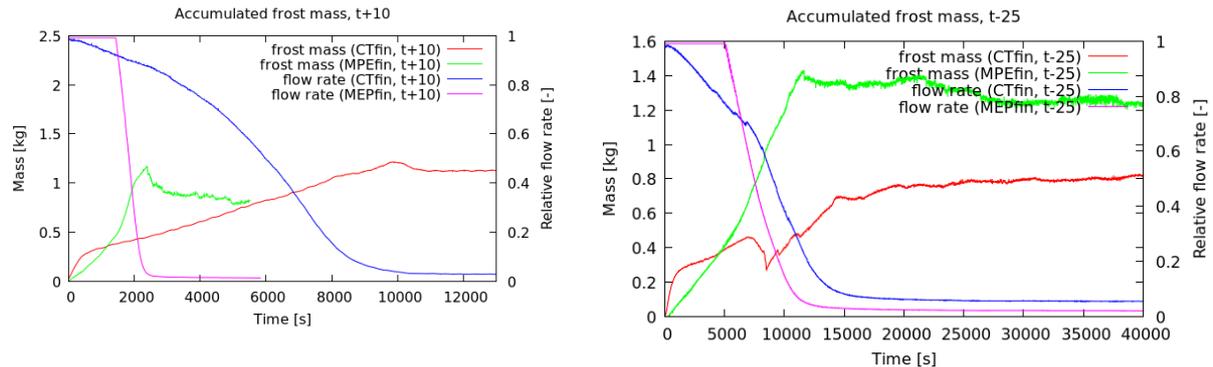


Abbildung 6: Transientes Waagensignal der Massenzunahme während der Vereisung; Rohrbündel-Lamellen Wärmeübertrager (Ctfin, rot) und MPE Wärmeübertrager (MPEfin, grün); (links): bei einer Raumtemperatur von +10°C; (rechts): bei -25°C

Der Windkanal (siehe Abbildung 2 bis Abbildung 4) zur Vermessung der Wärmeübertrager wurde in einer Klimakammer positioniert, in der Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit kontrolliert eingestellt werden konnten. Im experimentellen Aufbau sind zwei Kreisläufe zu unterscheiden (siehe Abbildung 3): Die Luftseite und die Kältemittelseite (Thermoölseite). Die Luftseite besteht aus der Einströmröhre (S1), der Ausgleichskammer (S2), dem geraden Kanalstück (S3), der Messbox mit den Wärmeübertragern (S4), der Ausströmröhre (S5) und dem Ventilator (mit geregelter Drehzahl, S6), der den Luftstrom im Luftkreislauf definiert. In der Einströmröhre wurde der Volumenstrom über den Druckverlust an einer Messblende (A1) bestimmt. Nach der Ausgleichskammer stabilisiert sich der Luftstrom im geraden Kanal (S3) und gelangt in die Messbox (S4) mit dem Wärmeübertrager. Die Luft verlässt das System über das Ausströmröhr, wo Temperatur (A2) und relative Luftfeuchtigkeit (A3) gemessen werden.

Das Kernstück des Kältemittelkreislaufs ist die Temperiereinheit (Julabo), die eine Strömung des Thermoöls mit gegebenem Volumenstrom und Temperatur aufrechterhalten kann. Die Einheit ist mit den Ein- und Auslässen der Wärmeübertrager über flexible Silikonschläuche verbunden, um eine möglichst störungsfreie Gewichtsmessung zu ermöglichen. Die Temperatursensoren C1 und C2 sind an diesen Punkten angebracht. Die Wärmeübertrager sind hängend an einer Hochpräzisionswaage befestigt (C3). Zwei Wärmeübertrager-Typen wurden vermessen und verglichen: ein Standard (konventioneller) Rohrbündel-Finnen Wärmeübertrager (CTfin) und ein innovativer MPE-Röhren-Lamellen Wärmeübertrager basierend auf Aluminium MPE-Röhren (MPEfin).

Der experimentelle Vergleich des Frost-Verhaltens zwischen den beiden untersuchten Wärmeübertrager-Typen wurde für zwei Umgebungsbedingungen durchgeführt. Das Setting **t+10** entspricht einer kritischen Vereisungsbedingung bei einer Umgebungstemperatur von +10°C und einer relativen Feuchte von 80%. Bei diesen Messungen wurde die Temperatur des Thermoöles auf -30°C gesetzt. Die zweite Umgebungsbedingung ist die Cold-Climate Einstellung **t-25**. Die Umgebungstemperatur wurde auf -25°C eingestellt, das Thermoöl auf ca. -60°C gehalten. Sobald in der Klimakammer der stationäre Zustand erreicht wurde, wurde die Abkühlung der Temperiereinheit auf den jeweiligen Seitpoint (-25°C, -60°C) gestartet. Die Messung der zunehmenden Vereisung (siehe Abbildung 6) wurde jeweils solange fortgesetzt, bis die Strömung komplett vom Eis geblockt wurde und die Temperaturen sich wieder stabilisiert hatten.

Die Ergebnisse der Temperaturlaufzeichnung und des Eiswachstums (Wägesignal) werden im folgenden Abschnitt präsentiert und diskutiert. Der Verlauf der Temperaturen der Luftseite (siehe Abbildung 7) zeigt, dass die Einströmtemperatur (entspricht der Temperatur in der Klimakammer) zwischen +7°C und +9°C während des Experiments variiert (Julabo setpoint +10°C). Die Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Ausströmung (Luftseite) ergab sich bei 7°C für beide Wärmeübertrager-Typen. Die Vereisungszeit (das ist die Zeitperiode bis eine komplette Strömungsblockade erreicht ist) ist beim Rohrbündel-Lamellen-Wärmeübertrager 4 mal so lange als beim MPE-Röhren-Lamellen Wärmeübertrager.

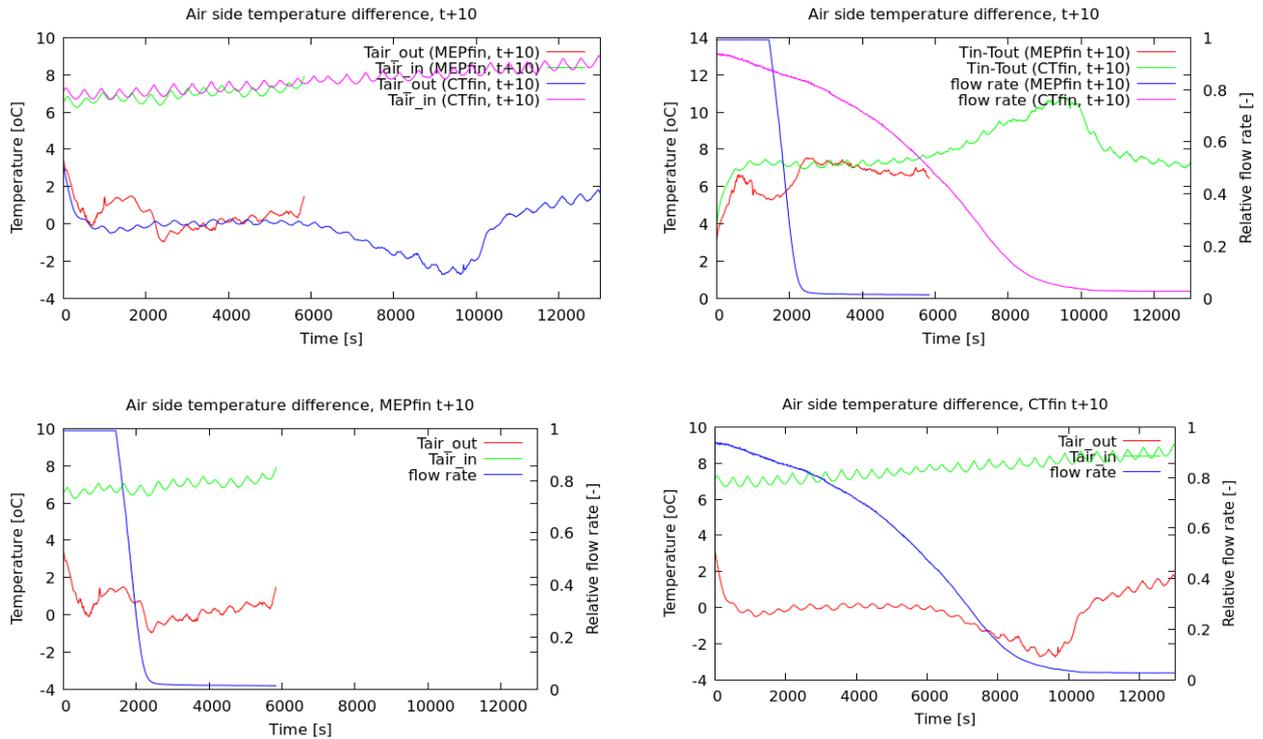


Abbildung 7: Zeitl. Verlauf der Lufttemperatur und des relativen Volumenstroms während des Vereisungsprozesses t+10

Bei niedriger Umgebungstemperatur (Cold-Climate-Setting) ergab sich eine Einströmtemperatur von -26°C und eine Temperaturdifferenz der Luftseite von ungefähr 12°C . Die Vereisungszeiten sind im Vergleich zu den Messungen bei $+10^{\circ}\text{C}$ um einen Faktor von rd. 1,5 länger.

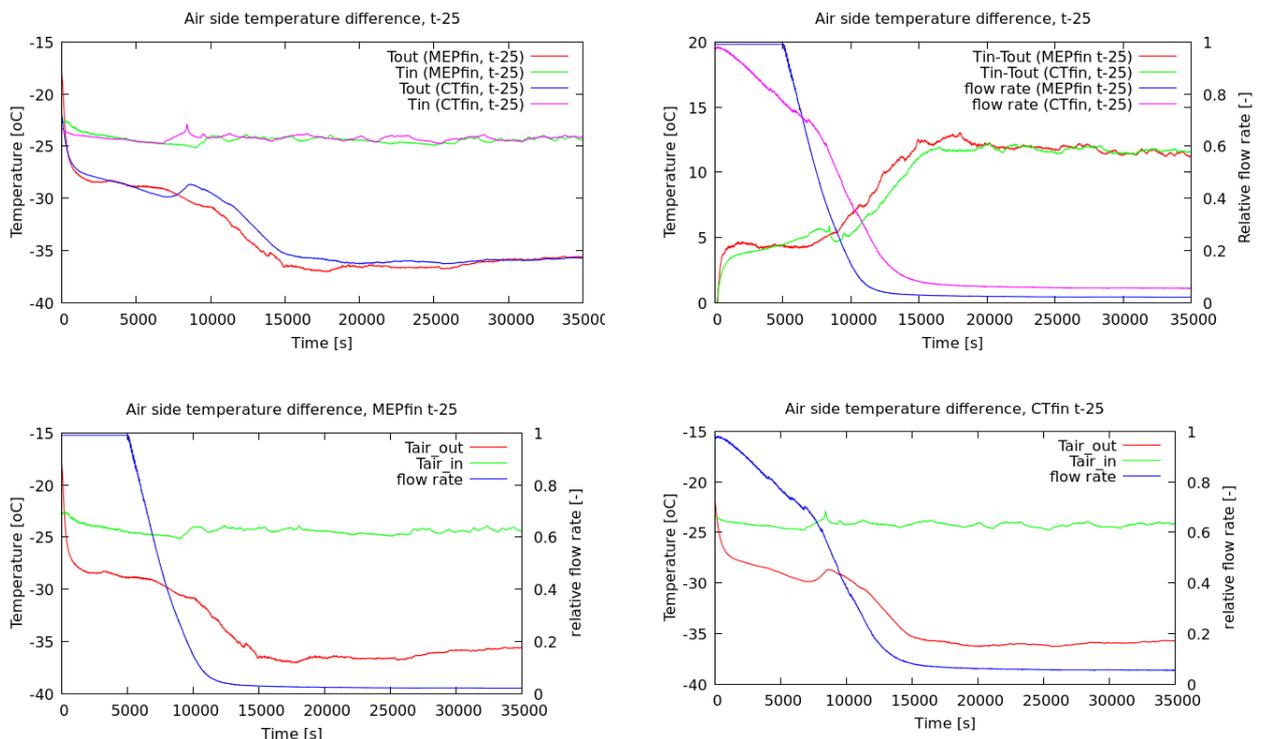


Abbildung 8: Zeitlicher Verlauf der Lufttemperatur und des relativen Volumenstroms während des Vereisungsprozesses t-25

Thermoölseitig lag die erreichte Einlasstemperatur in den Wärmeübertragern bei -19°C für den MPE-Röhren-Lamellen WÜ und bei -21°C für den Rohrbündel-Lamellen WÜ bei einer Umgebungstemperatur von $+10^{\circ}\text{C}$ (siehe Abbildung 9). Der Unterschied zwischen den gesetzten und den schließlich erreichten Temperaturwerten liegt an den thermischen Verlusten des Gesamtsystems (sowohl auf die Seite der Klimakammer als auch des experimentellen Aufbaus). Die Temperaturdifferenz zwischen Wärmeübertrager Ein- und Auslass, die für die Vereisung notwendig war, resultierte zwischen 11°C und 12°C . Die Vereisungszeit des MPE-Röhren-Lamellen WÜ ist ca. 4 Mal kürzer als die korrespondierende Zeitspanne beim konventionellen Rohrbündel-Lamellen WÜ. Die Vereisungszeiten können auch aus dem Waagensignal (siehe Abbildung 6) extrahiert werden. Zu diesem Zeitpunkt geht der anfängliche Anstieg der Masse in ein Plateau ungefähr konstanter Masse über. Der Unterschied in den Vereisungszeiten hat seinen Grund in der unterschiedlichen Geometrie und Dimensionierung der zwei Wärmeübertrager-Typen.

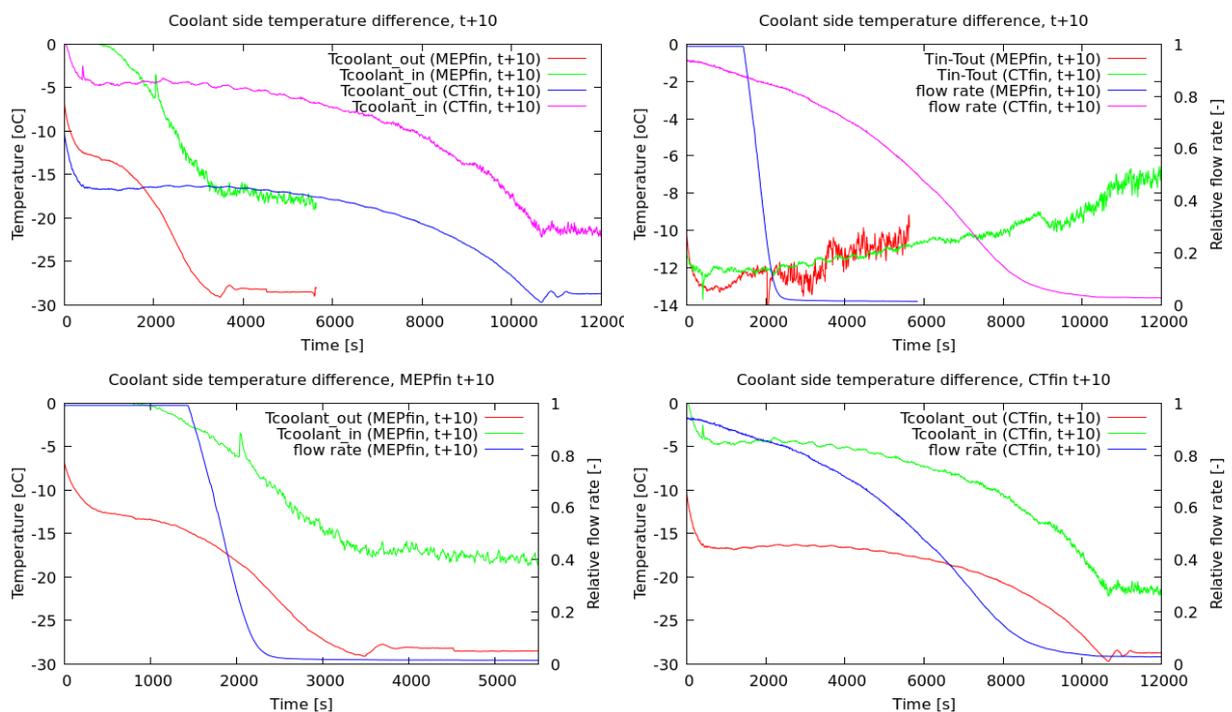


Abbildung 9: Zeitlicher Verlauf der Thermoöltemperatur und des relativen Volumenstroms während des Vereisungsprozesses t+10

Die kältemittelseitige Einlasstemperatur bei Cold-Climate-Bedingungen ($t-25$, siehe Abbildung 10) erreichte Werte zwischen -53°C (MPE-Röhren-Lamellen WÜ) und -51°C (Rohrbündel-Lamellen WÜ). Der limitierende Faktor hierbei ist die von der Temperiereinheit (Julabo) erreichbare Minimaltemperatur unter den gegebenen Bedingungen. Die Temperaturdifferenz zur Erreichung von Vereisungsbedingungen beim Cold-Climate-Setting ($t-25$) betrug ca. 10°C , die sich ergebenden Vereisungszeiten lagen wiederum einen Faktor 1,5 über jenen bei den höheren Umgebungstemperaturen ($t+10$). Im $t-25$ Fall ergibt sich im Vergleich zum $t+10$ Setting eine längere initiale Phase bevor die Vereisung einsetzte. Dieses Verhalten ist beim MPE-Röhren-Lamellen WÜ besonders ausgeprägt, da die Lamellenstruktur zu einem deutlich niedrigeren Frostmassengradienten führt (siehe Abbildung 6).

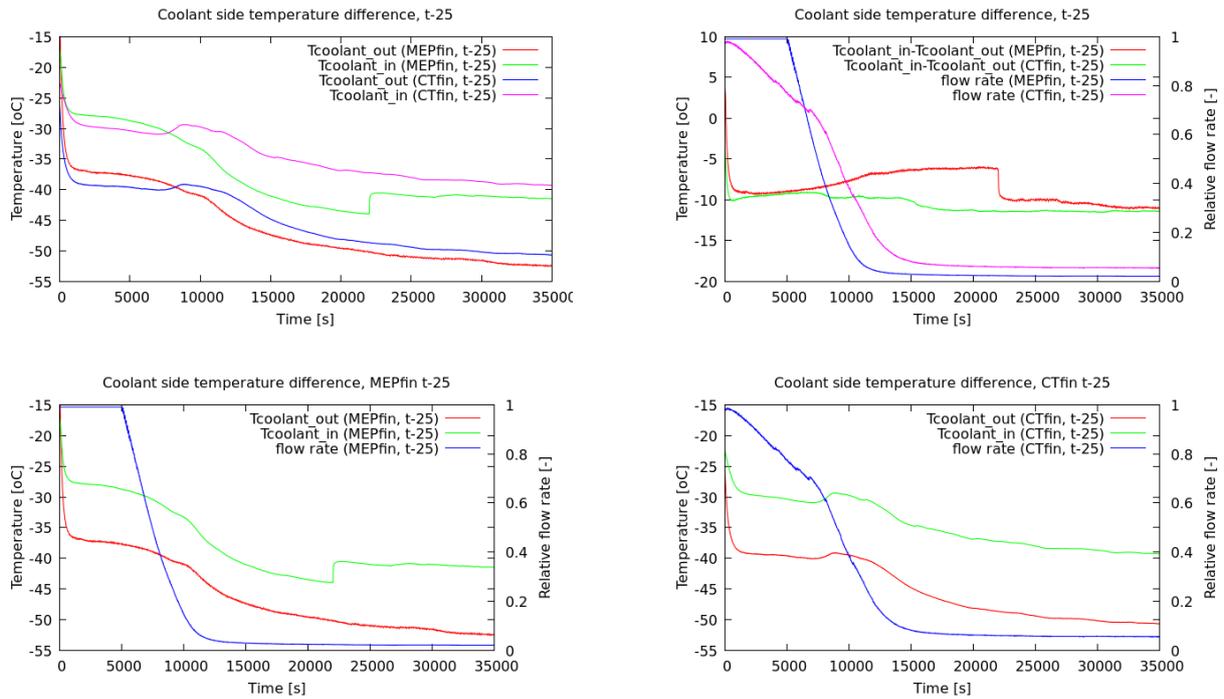


Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf der Thermoöltemperatur und des relativen Volumenstroms während des Vereisungsprozesses t-25

In der **dritten Phase** wurden die Vereisungsmessungen auf Systemebene - Wärmeübertrager der Verdampfereinheit - durchgeführt (Abbildung 11). Dabei wurde die im FP7 Projekt GreenHP entwickelte innovative Verdampfereinheit bestehend aus einem horizontalem Wärmeübertrager, Luftführung und Ventilator (Strehlow et al., Reichl et al.) genutzt. Die Vereisungsversuche wurden sowohl experimentell charakterisiert als auch numerisch analysiert.



Abbildung 11: Messaufbau für die Vereisungsmessungen der Wärmeübertrager auf Systemebene (GreenHP).

Die räumliche Verteilung des Eisansatzes im Wärmeübertrager wurde mittels Wägung von Wasser in darunter platzierten Auffangbehältern (Abbildung 12) bestimmt. Insgesamt wurden 208 Auffangbehälter eingesetzt, diese enthielten nach der Abtauung das ausgeflossene Wasser aus dem

horizontalen Wärmeübertrager. Nach der Abtauung wurden die Auffangbehälter gewogen und die Wassermasse bestimmt.

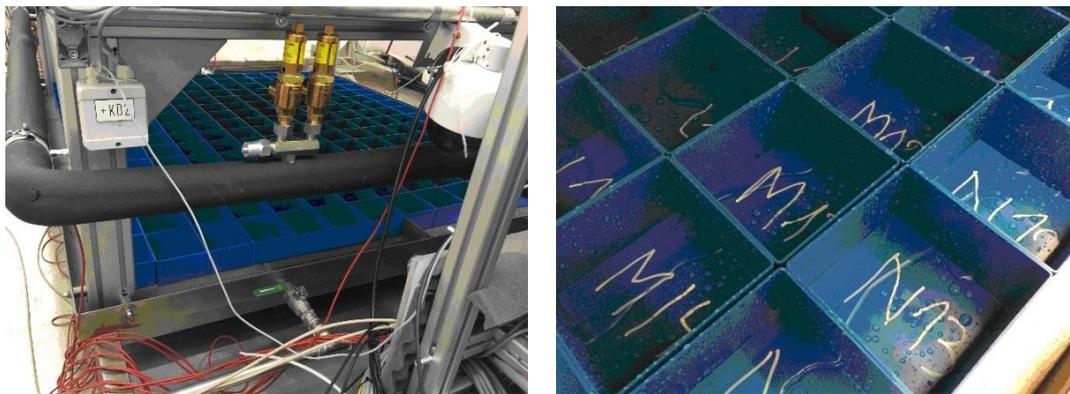


Abbildung 12: Auffangbehälter unterhalb des Wärmeübertragers.

Die numerischen Analysen wurden mittels numerischer Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics – CFD) durchgeführt. Zum Einsatz kam dabei das open-source Software-Paket OpenFOAM® (Weller et al.). Es löst mit dem finiten Volumen-Ansatz ein diskretisiertes Gleichungssystem, bestehend aus Kontinuitäts-, Impuls-, und Energiegleichung. Für die Analyse des Eiswachstums (siehe auch Na et. al., Hermes et al.) wurde die relative Luftfeuchtigkeit als passiver Skalar implementiert. Das Modell wurde für das Eiswachstum und die Vorhersage der Verdichtung ausgewählt, das auf den fundamentalen Prinzipien der Energie- und Masseerhaltung basiert. Der Prozess der Massen- und Wärmediffusion innerhalb der Frostschrift wird dabei als quasi-stationär und eindimensional und die Frostdicke uniform entlang der Oberfläche angenommen. Weiters geht man in diesem Modell davon aus, dass die Lewis-Analogie erfüllt und anwendbar ist (siehe auch Popovac et. al., Reichl et. al.).

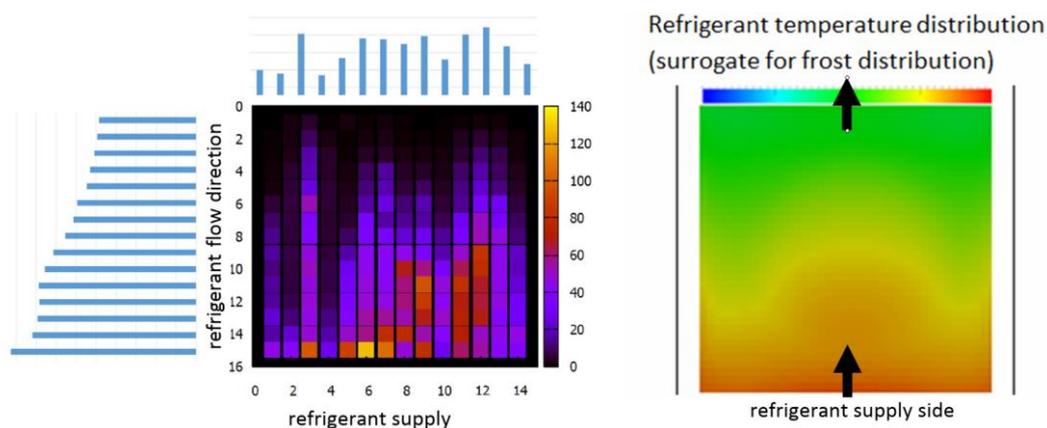


Abbildung 13: Vergleich der räumlichen Verteilung der akkumulierten Eismasse gemessen mittels Wägung des Wassers nach der Abtauung (links) mit der simulierten Eismasse (rechts).

Die Eis-Masse-Verteilung (Abbildung 13) zeigt eine deutliche Abweichung von der gewünschten optimalen gleichmäßigeren Verteilung. Das Maximum der akkumulierten Masse findet sich an der Stelle der kältesten Bereiche des Wärmeübertragers. In Kombination mit der ursprünglich uniformen Strömungsverteilung über den Wärmeübertrager kommt als Ursache für den asymmetrischen Eisansatz nur eine ebenfalls asymmetrische Temperaturverteilung im Kältemittelkreis bzw. eine asymmetrische Kältemittelverteilung selbst in Frage.

AP3: Systemmodellierung und Simulationsstudien

Im Rahmen des Arbeitspaketes wurde die Ausarbeitung des Austrian Team Reports zur Beschreibung des Standes der Technik bei Luft/Wasser Wärmepumpen durchgeführt und dem Operating Agent übermittelt (Bericht siehe Anhang). Die Systemmodellierung wurde im Zuge einer Diplomarbeit am Institut für Wärmetechnik der TU Graz (IWT) für verschiedene Kreislaufmodifikationen (einstufig: konventionell; mit Niederdrucksammelbehälter inkl. Phasentrennung vor dem Verdampfer; mit internem Kältemittelwärmeübertrager; zweistufig: mit Flüssigkeitseinspritzung; mit Economizer-Wärmeübertrager; mit Economizer-Mitteldrucksammelbehälter; sowie: Ejektor-Schaltung, Kaskaden-Schaltung) durchgeführt. Die Ergebnisse wurden hinsichtlich möglicher Verbesserungen von Leistung und Leistungszahl besonders bei kalten Außentemperaturen ausgewertet. Der Wärmeübergang am Kondensator und Verdampfer sowie die Vereisungsmechanismen am Verdampfer werden in erweiterten Simulationsmodellen berücksichtigt und detailliert ausgewertet. Parallel zu der Erstellung der Simulationsmodelle wurde mit dem Aufbau eines Versuchsstands zur Vermessung einer Außenluft-Wärmepumpe mit Flüssigkeitseinspritzung in der Klimakammer des IWT begonnen. Die Flüssigkeitseinspritzung auf Mitteldruckniveau dient dabei zur Begrenzung der Kompressor-Austrittstemperaturen bei niedrigen Außenlufttemperaturen und erweitert dadurch den Einsatzbereich der Wärmepumpe. Gegenwärtig wird die Anlage nach der Erstinbetriebnahme für erste Versuche mit Betriebsbedingungen gemäß Norm (EN 14511) verwendet. Im Anschluss soll die Anlage bei tiefen Außenlufttemperaturen bis zu -25°C (Untergrenze) und Heizungssystem-Vorlauftemperaturen bis 60°C (Obergrenze) vermessen werden. Anhand der Messergebnisse bei Betriebspunkten mit Vereisung am Verdampfer kann das Simulationsmodell bzw. die Modellierung der Vereisung am Wärmeübertrager angepasst werden. Die Arbeiten im Rahmen der Systemmodellierung und die Versuchsdurchführungen wurden nach fristgerecht fertiggestellt, und die darauf aufbauenden Simulationsstudien konnten bis zum geplanten Termin abgeschlossen werden.

Die Systemmodellierung konnte, wie geplant, im Zuge einer Diplomarbeit (siehe Zoier) für verschiedene Kreislaufmodifikationen abgeschlossen werden. Dabei wurden unterschiedliche Kreislaufvarianten vereinfacht modelliert und die Ergebnisse verglichen, um das Potenzial im Hinblick auf eine Anwendung bei tiefen Außenlufttemperaturen abzuschätzen. Untersuchte Varianten sind, ausgehend vom einstufigen Basisprozess, der Wärmepumpen-Kreislauf mit internem Wärmeübertrager (IHX), Niederdrucksammler (ND Zwischenkühlung, flüssiger Kältemittelspritzung, internem Wärmeübertrager bzw. Economizer mit Sammler, Kaskade und Ejektor. Die Auswertung der Berechnungen zeigte eine Effizienzsteigerung bei tiefen Außenlufttemperaturen durch die Economizerschaltungen sowie für die Varianten mit Kaskade. Der Vergleich der betrachteten Kreislaufmodelle hinsichtlich COP ist in Abbildung 14 darstellt.

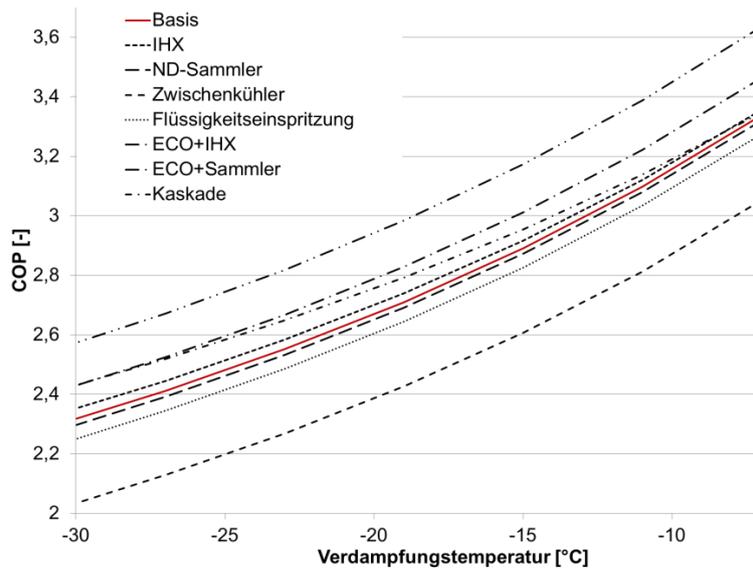


Abbildung 14: Vergleich der simulierten Kreislaufvarianten hinsichtlich COP in Abhängigkeit der Verdampfungstemperatur

Der Verlauf der Heizleistung der unterschiedlichen Modifikationen ist in Abbildung 15 dargestellt.

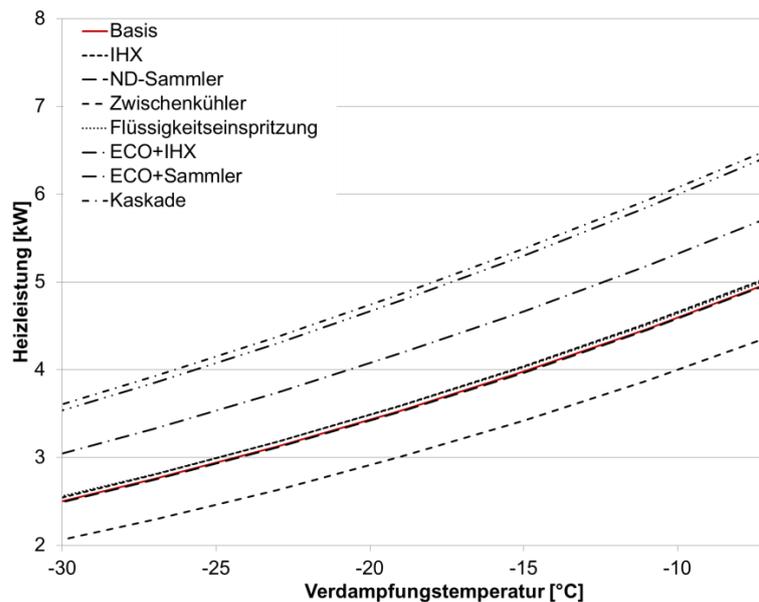


Abbildung 15: Verlauf der simulierten Heizleistung in Abhängigkeit der Verdampfungstemperatur für die unterschiedlichen Kreislaufvarianten

Darin ist klar der Rückgang der Heizleistung bei geringeren Verdampfungstemperaturen ersichtlich sowie deren Steigerungsmöglichkeit durch einige der untersuchten Kreislaufvarianten z.B. für die Kaskade und die Economizerschaltungen.

Nach der Erstinbetriebnahme und des Funktionstests am Wärmepumpen-Versuchsstand am IWT wurden für eine Wärmepumpe mit Kältemittelspritzung stationäre Betriebspunkte gemäß EN14511 mit Außenlufttemperaturen im Bereich von -19°C bis 7°C und Wasseraustrittstemperaturen

von 35°C - 60°C, vermessen. Die Messdaten wurden in weiterer Folge ausgewertet und zeigten, dass eine Betriebsbereichserweiterung der Außenluftwärmepumpe durch die Flüssigkeitseinpritzung bis zur minimal eingestellten Außenlufttemperatur von -19°C möglich ist. Die Kompressorausstrittstemperatur wurde dabei durch die Einspritzung begrenzt, dargestellt in Abbildung 16. In weiterer Folge wurde mit einem detaillierten Modell des Kreislaufs der Versuchstand der Außenluftwärmepumpe abgebildet. Bei der Modellierung wurden Vereisung sowie Wärmeübergänge im Kondensator und Verdampfer berücksichtigt.

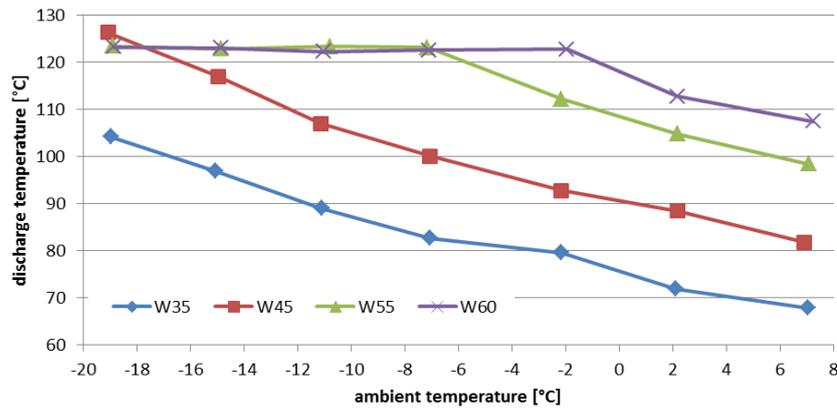


Abbildung 16: Kompressorausstrittstemperatur in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur und der Wasseraustrittstemperatur aus dem Kondensator am IWT-Wärmepumpen-Versuchsstand

Für eine Wasseraustrittstemperatur von 35°C und einer Außenlufttemperatur von -19°C wurde dabei noch ein COP von ca. 2,2 erreicht, dargestellt in Abbildung 17:

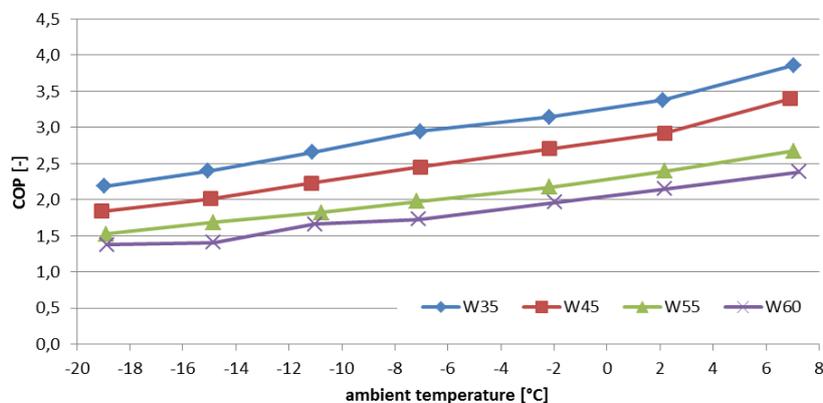


Abbildung 17: COP in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur und Wasseraustrittstemperatur

Im Rahmen des Arbeitspaketes wurde die Ausarbeitung des Austrian Team Reports für Task 2 zur Beschreibung der Simulationsmodelle sowie der Versuchsdurchführung durchgeführt und dieser wird nach interner Revision an den Operating Agent übermittelt.

Basierend auf den Mess- und Simulationsergebnissen des Kreislaufs mit Flüssigkeitseinpritzung wurde eine vereinfachte Simulationsstudie zum Thema saisonaler Effizienz des Kreislaufkonzeptes in unterschiedlichen kalten Klimaregionen durchgeführt. Für die Berechnung der Heizleistung der Wärmepumpe wurden in weiterer Folge Kennlinien aus dem zuvor erstellten Simulationsmodell abgeleitet. Um den Effekt der Flüssigkeitseinpritzung auf die saisonale Effizienz darzustellen, wurde ein bivalentes Heizungssystem mit einem konventionellen Wärmepumpenkreislauf und einer

elektrischen Zuheizung sowie ein monovalentes Heizungssystem mit dem Kreislauf mit Flüssigkeitseinspritzung für zwei unterschiedliche Heizungstemperaturniveaus (30/35 °C, und 40/45 °C), untersucht. Die Simulation der unterschiedlichen Klimaregionen und der Heizlast des Gebäudes wurde mit dem Simulationsprogramm TRNSYS V17.02 durchgeführt. Die betrachteten Klimaregionen sind durch die in Tabelle 5 aufgelistete Städte repräsentiert.

Tabelle 5: Minimum- und Maximumtemperaturen (amb, min/max) sowie die Heizgrenztemperatur (heat, limit) für die betrachteten Regionen (Moisi und Rieberer, 2016)

Location	$t_{amb,min}$ [°C]	$t_{heat,limit}$ [°C]	$t_{amb,max}$ [°C]
Anchorage, USA	-24	14	26
Graz, Austria	-12	14	33
Helsinki, Finland	-22	15	29
Minneapolis, USA	-24	14	35
Moscow, Russia	-23	15	31

Als Referenzgebäude wurde ein Einfamilienhaus, basierend auf dem IEA SHC TASK 23 (Heimrath und Haller, 2007) mit einem Heizwärmebedarf von ca. 100 kWh/m²a in Zürich, verwendet. Mit dem Gebäudemodell und den unterschiedlichen Klimadatensätzen konnte für die betrachteten Regionen die Heizlasten in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur vereinfacht berechnet werden. Die Ergebnisse der Simulationen zeigten vor allem für Heizungssysteme mit höherem Temperaturniveau (in diesem Fall 40/45° C), dass die Betriebsbereichserweiterung durch die Flüssigkeitseinspritzung bei geringen Außenlufttemperaturen (bis zu -20 °C) zu einer Steigerung der saisonalen Effizienz (SPF, Seasonal Performance Factor) führen kann. Abbildung 18 zeigt die relative SPF-Verbesserung für die unterschiedlichen Regionen im Vergleich zum konventionellen System.

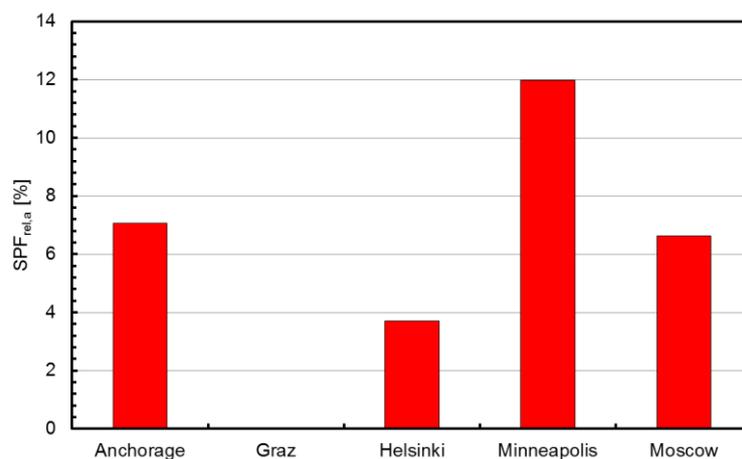


Abbildung 18: Relative Verbesserung des SPF für unterschiedliche Regionen (Moisi und Rieberer, 2016)

Speziell in Regionen mit längeren kalten Perioden, wie zum Beispiel Minneapolis, zeigt sich der Vorteil der Flüssigkeitseinspritzung mit einem Anstieg des SPF um etwa 12 %. Aufgrund der relativ hohen Außenlufttemperaturen ergibt sich hingegen für Graz kein wesentlicher Vorteil durch die Flüssigkeitseinspritzung.

3.3. Veröffentlichungen im Rahmen des Annex Projekts

Internationales Annex Projekt: Es wurden folgende Publikationen erstellt:

- HPT TCP Annex 41 Cold Climate Heat Pumps: Two-page summary
Download: <http://heatpumpingtechnologies.org/publications/annex-41-two-page-summary-cold-climate-heat-pumps/>
- HPT TCP Annex 41 Cold Climate Heat Pumps: Final report
Download: <http://heatpumpingtechnologies.org/publications/cold-climate-heat-pumps-final-report/>
- HPT TCP Annex 41 Cold Climate Heat Pumps: Executive summary
Download: <http://heatpumpingtechnologies.org/publications/cold-climate-heat-pumps-executive-summary/>

Nationales Annex Projekt: An Publikationen wurden verfasst:

- Hegel, F., Riedler, J., Rieberer, R., Heinz, A., Fleckl, T., Reichl, Ch., 2014: Task 1 – Literature and Technology Review, Austrian Team Report, IEA HPP Annex 41”Cold Climate Heat Pumps”
- Moisi, H., Rieberer, R., Fleckl, T., Popovac M., Reichl, Chr., 2016: Task 2 – Simulation Models and Prototype Experiments, Austrian Team Report, IEA HPP Annex 41”Cold Climate Heat Pumps”
- Moisi H., Rieberer R., 2016: Task 3 – Energy savings assessment of an ASHP with liquid injection for cold climate applications, Austrian Team Report, IEA HPP Annex 41”Cold Climate Heat Pumps”
- Zoier, H., 2014: Betriebsverhalten von Außenluft-Wärmepumpen bei tiefen Außenlufttemperaturen, Masterthesis, Institute for Thermal Engineering, TU Graz

Ergebnisse sind zudem - neben Ergebnissen und Erkenntnissen aus dem EU Projekt GreenHP - in **4 Papers** eingeflossen.

- Reichl Ch., Strehlow A., Oltersdorf T., Braungardt S., Pröhl M., Benovsky P., Popovac M., Fleckl T., **GreenHP: Next Generation Heat Pump for Retrofitting Buildings – new evaporator component for large capacity air-to-water heat pumps**, Advanced HVAC & Natural Gas Technology Conference, May 6-9, 2015, Radisson BLU Hotel Latvija Conference Center, Riga, Latvia; DOI: 10.7250/rehvaconf.2015.015; page 100-109, 2015

Synopsis: Air to water heat pumps account by more than 70% for the main share of HP-systems of the European HP market. Retrofitting applications especially show a very high potential for the A/W heat pump technology. Innovative components will pave the way for the next generation heat pumps. In case of the evaporator low refrigerant charge is introduced by using bionic distributors and evaporator icing is studied on several heat exchanger designs by using advanced experimental and numerical methods.

Paper Download: Nicht frei verfügbar.

- Popovac M., Seichter S., Benovsky P., Fleckl T., Reichl Ch., **Numerical Analysis of the Frosting Performance of the air-side of a heat-pump**, 24th IIR International Congress of Refrigeration, August 16-22, 2015, ICR2015, Yokohama, Japan

Synopsis: This work is dealing the frosting model based on the analytical approximations of the heat and mass transfer equations, which is validated on the generic reference case of frost creation over a flat horizontal surface. This model has been implemented into a general purpose computational fluid dynamics (CFD) open source platform. Subsequently, this approach has been deployed in the parametric study of the heat exchanger fin geometries, aiming at their design with respect to the frosting characteristics. The obtained results are compared to the experimental observations for the frosting performance of actual heat exchangers.

Paper Download:

https://www.researchgate.net/publication/282359378_NUMERICAL_ANALYSIS_OF_THE_FROSTING_PERFORMANCE_OF_THE_AIR-SIDE_OF_A_HEAT_PUMP

- C. Reichl, J. Emhofer, F. Lörcher, A. Strehlow, M. Popovac, P. Wimberger, R. Zitzenbacher, C. Köfinger, A. Zottl, T. Fleckl (2016), **GreenHP: Strömungs-Analyse der Verdampfer-Luftseite**, DKV-Tagung 2016, Kassel; 17.11.2016 - 18.11.2016; in: "DKV-Tagung 2016".

Synopsis: Im Rahmen des EU Projektes GreenHP (www.greenhp.eu) wurde eine neuartige effiziente Luft-Wasser-Wärmepumpe entwickelt. Das natürliche Kältemittel Propan (R290) wird dabei in sehr geringer Menge eingesetzt (65 g / kWthermisch). Für diese neue Wärmepumpe wurde ein neues Kompressorkonzept umgesetzt, die Wärmeübertrager aus Aluminium-Micro-Kanälen mit effizienten Luftlamellenstrukturen konzipiert und ein neuartiger Ventilator entwickelt. Im Rahmen der Prüfstands Messungen am AIT wurde ein besonderes Augenmerk auf die Luftseite der Wärmepumpe gelegt: Laseroptische Messtechnik (Particle Image Velocimetry - PIV) wurde eingesetzt, um die Strömungsfelder im Bereich zwischen Wärmeübertrager und Ventilator zu charakterisieren. Zusätzlich wurde das Turbulenzprofil im Ansaugbereich mittels Hitzdrahtanemometrie (Constant Temperature Anemometry - CTA) bestimmt. Die Geschwindigkeitsfelder im Einlassbereich dienen als Randbedingungen für die numerischen Strömungssimulationen (CFD), die mit den Innenraummessungen verglichen werden. Die numerischen Strömungssimulationen wurden in weiterer Folge eingesetzt, um das Vereisungs- und Abtauverhalten des Verdampfers der GreenHP zu berechnen. Sie erlauben eine Analyse der zeitlichen und räumlichen Frostverteilung in der turbulenten Strömung durch die Lamellenpakete. Da der Verdampfer in Tischbauweise ausgeführt ist, kann durch Auffangen des Wassers mit Behältern während der Abtauung eine orts aufgelöste Bestimmung der Eismenge am Verdampfer durchgeführt werden. Dafür wurde der Bereich von 1.70m x 1.60m in 180 Sub-Bereiche unterteilt. Zusammen mit den Strömungsmessungen ist es möglich, auf die Propan-Kältemittelverteilung im Verdampfer zu schließen. Das Vereisungsverhalten wurde zusätzlich akustisch mit einer Messkuppel bestehend aus 64 Mikrofonen untersucht. Diese zeit-, frequenz- und orts aufgelöste akustische Charakterisierung ermöglicht zusammen mit der strömungstechnischen Analyse eine umfassende Bewertung der Luftseite des GreenHP Verdampfers.

Paper Download: Nicht frei verfügbar.

- M. Popovac, I. Moretti, M. Lauermann and A. Zottl (2017) Christoph Reichl, Johann Emhofer, Frieder Lörcher, Andreas Strehlow, Mirza Popovac, Peter Wimberger, Christian Köfinger, Andreas Zottl, Thomas Fleckl: **Transient Acoustic Signatures of the GreenHP with special focus on icing and defrosting**, 12th IEA Heat Pump Conference, Rotterdam, Mai 2017

Synopsis: In the framework of the EU project *GreenHP* a new air-water-heat pump using the natural refrigerant propane is developed. A new compressor concept, heat exchangers produced out of aluminium microchannels attached to efficient air fin structures, and a specialized fan has been implemented. The acoustic behaviour is characterized setting a special focus on transient effects during icing and defrosting. For this purpose, a 64-channel acoustic dome is positioned around the heat pump in the climate chamber to acquire space-, time- and frequency resolved microphone data. Measurements are performed for different acoustic shielding of the heat pump. The resulting acoustic directivity and its variation during frosting is correlated to fluid flow and ice aggregation measurements: laser optical methods (particle image velocimetry) and probe techniques (constant temperature anemometry) are used to measure the air velocity both at the air inlet and in the gap between heat exchanger and fan. Computational fluid mechanics is performed to simulate the frosting behaviour based on the measured boundary conditions. For accessing the ice amount a local measuring method is applied based on the fact, that the heat exchanger in the *GreenHP* is positioned horizontally: Below the heat exchanger area, 180 boxes are positioned gathering the water during defrosting. The local ice amount is compared to the simulation results, which are correlated to the acoustic data. Providing these toolsets for development of low noise signature air-to-water heat pumps is important for increasing acceptance of this technology.

Paper Download: Nicht frei verfügbar.

4. Vernetzung und Ergebnistransfer

4.1. Nationale Zielgruppe und deren Einbindung in das Projekt

Die Projektergebnisse sind für nachfolgende **Zielgruppen / Stakeholder** von Interesse:

- Hersteller von Wärmepumpen sowie Komponenten für Wärmepumpen wie z.B. Produzenten von Wärmeübertragern, Verdichtern, etc.
- HVAC Praktiker wie z.B. Installateure oder Planer, die sich mit dem Design, der Auswahl und Auslegung von Wärmepumpensystemen für verschiedene Anwendungsszenarien in kälteren Regionen beschäftigen;
- Gebäudeeigentümer /-betreiber in kälteren Regionen, mit Interesse an einer verbesserten Effizienz ihrer HVACR Komponenten; sowie
- Einrichtungen, die sich mit der Minimierung von Energieverbräuchen beschäftigen wie z.B. Energieagenturen, Legislative Behörden, Stadtwerke, etc.

4.2. Einbindung der relevanten Stakeholder

Die **nationalen Stakeholder** wurden durch folgende **Maßnahmen** eingebunden:

- Befragung der österreichischen Wärmepumpenhersteller bezüglich der spezifischen Abmessungen ihrer in Luft/Wasser-Wärmepumpen eingesetzten Verdampfer (Fragebogenbasierte Umfrage in 2014)
- Präsentation des Annex Projekts und ausgewählter Ergebnisse:
 - Vorstellung des Projekts, AIT Wärmepumpentag, 10/2014
 - IEA HPT Annex 41 Meeting / OTTI Workshop: Air Source Heat Pumps in Retrofitting Applications, Wien, 05/2015
 - Präsentation ausgewählter Ergebnisse (im Kontext der Präsentation des nationalen Projekts SilentAirHP), AIT Wärmepumpentag, 10/2016
 - e-nova 2016, Präsentation ausgewählter Ergebnisse im Kontext des FP7 Projekts GreenHP, „Analyse der Luftströmung und Schallemissionen der Verdampfer-Luftseite der GreenHP mit speziellem Fokus auf Vereisung und Enteisung“ 24./25.11.2016
- Integration ausgewählter Ergebnisse in die zertifizierten Schulungen des AIT für Wärmepumpeninstallateure und Planer (ab 2016)

Auf **internationaler Ebene** wurden Ergebnisse in folgende Konferenzen und Veranstaltungen eingebracht bzw. präsentiert und diskutiert:

- 23rd IEA Heat Pump Conference Montreal, Präsentation, Christoph Reichl: *“Advanced methods for the characterization of icing effects on evaporators in air-to-water heat pumps”*, 12.5.2014

- Chillventa Congress on Heat Pumps: Challenges Markets Technology Research Applications, Präsentation Thomas Fleckl / Van Baxter: *“IEA HPP Annex 41 - Cold Climate Heat Pumps: Improving Low Ambient Temperature Performance of Air-Source Heat Pumps”*; Nürnberg; 13.10.2014
- 24th International Congress of Refrigeration, IEA HPP Annex 41 Meeting, Präsentation: Thomas Fleckl, *“Investigation of icing effects of lab scale heat exchangers”*, 19.08.2015
- 24th International Congress of Refrigeration, IEA HPP Annex 41 Meeting, Präsentation, René Rieberer: *“Liquid Injection – A Suitable Solution for Cold Climate Heat Pumps?”* 19.08.2015
- DKV Tagung 2014: Präsentation, Christoph Reichl: *„Experimentelle und numerische Methoden für die Untersuchung von Vereisung und Abtauverhalten von Verdampfern in Luftwärmepumpen“*, 19.11.2014
- DKV Tagung 2016: Präsentation, Christoph Reichl: GreenHP: Strömungsanalyse der Verdampfer-Luftseite, 18.11.2016
- 26th IEA Heat Pump Conference, Präsentation, Christoph Reichl: Transient Acoustic Signatures of the GreenHP with special focus on icing and defrosting, Rotterdam, 05/2017
- Joint Annual Meeting of the Swiss and Austrian Physical Society: Präsentation, Christoph Reichl: Experimental and numerical methods for the fluid dynamic characterization of heat exchanger icing, Genf, 21.-25.08.2017

4.3. Relevanz und des Nutzens der Projektergebnisse:

Das Projektteam konnte im Rahmen des nationalen Annex Projekts zahlreiche Erkenntnisse von Relevanz für nationale Stakeholder, insbesondere nationale Hersteller von Wärmepumpen, generieren (siehe Abschnitte 5.1 und 5.3). Innerhalb des Projektes wurden interessante Modelle und Methoden entwickelt bzw. eingesetzt, die nicht nur im Rahmen weiterer nationaler Forschungsprojekten im Themenbereich zum Einsatz kommen werden (siehe Abschnitt 5.2), sondern auch von den Herstellern genutzt werden können, um ihre Produkte insbesondere in Bezug auf das Design von Wärmeübertragern und Verdampfern sowie die Kältekreisconfiguration weiterzuentwickeln.

Dazu zählen insbesondere:

- Modelle zum Frostansatz- sowie zur Frostverdichtung eingebettet in einen OpenSource Navier Stokes Strömungslöser zur Berechnung der Vereisung von Wärmeübertragern.
- Methoden zur Vereisungsanalyse basierend auf konventioneller und Wärmebildfotographie bzw. Videotechnik.
- Transiente Gewichtsbestimmung der Eismasse an Lamellengeometrien unterschiedlicher Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit von Wärmeübertragern.
- Vereinfachte und detaillierte Kältekreismodelle sowie Verifikation am Laborprototypen sowie Berechnung des SCOP für unterschiedliche Klimata

Die durchführenden Forschungsinstitute konnten im Zuge der Beteiligung an den internationalen Annex-Treffen interessante neue Kontakte aufbauen. So hat beispielsweise das AIT eine japanische Forschungsgruppe näher kennengelernt und beabsichtigt mit dieser Gruppe zukünftig experimentelle Vereisungsmessungen durchzuführen. Weiters soll der Kontakt mit dem koordinierenden US Institut im Zuge weiterer Forschungsprojekte intensiviert werden. Dafür geeignete Finanzierungsmöglichkeiten werden gerade evaluiert.

AIT und IWT konnten die nationalen Kompetenzen im Themenfeld international gut platzieren, und damit den Ruf Österreichs als innovativen Standort stärken sowie die Sichtbarkeit der nationalen Expertise erhöhen. Österreich war das einzige teilnehmende Land, das Messungen im tiefen Temperaturbereich (bis -25°C) detaillierter untersucht hat. Die Ergebnisse wurden nicht nur in internationale Annex-Meetings, sondern auch in andere internationale Veranstaltungen wie z.B. IIR International Congress of Refrigeration, etc. eingebracht, und mit relevanten Stakeholdern diskutiert (siehe Abschnitt 3.3).

5. Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen

5.1. Erkenntnisse für das Projektteam

Das Projektteam hat im Rahmen dieses Annex Projekts folgende relevante Erkenntnisse gewonnen:

Vereisungsverhalten von Wärmeübertrager:

- Ein in einer Klimakammer platzierter Windkanal-Teststand kann erfolgreich zur Charakterisierung von Kondensation, Vereisung und Abtauung an Wärmeübertrager-Lamellen Geometrien eingesetzt werden. Dabei können Unterschiede aufgrund von verschiedenen Oberflächenstrukturen und Beschichtungen analysiert werden.
- Numerische Verfahren (dreidimensionale Lösung der Navier Stokes Gleichungen unter gleichzeitiger Berücksichtigung des Eisansatzes und der Verdichtung von Eisschichten) erlauben die Vorselektion geeigneter Lamellenstrukturen. Damit kann eine Reduktion der Prototypenzahl für experimentelle Untersuchungen erreicht werden.
- Mit Hilfe der experimentellen Untersuchungen konnte der Zusammenhang zwischen Vereisungszeiten einer Lamellengeometrie zum erreichbaren Wärmetransfer quantifiziert werden.
- Blockaden des Wärmeübertragers durch Eis sind an den stromaufwärtsliegenden exponierten Stellen des Wärmeübertragers lokalisiert.
- Lamellenwärmeübertrager, die auf der Multi-Port-Extrusion Technology (MPE) basieren, zeigen insbesondere in der initialen Eisbildung Vorteile im Vergleich zu konventionellen Rohrbündelwärmeübertragern. Im weiteren Verlauf dominieren die zugrunde liegenden Lamellen-Geometrien. Aluminium MPE Wärmeübertrager können eine interessante Alternative zur konventionellen Kupfer-Rohrbündel-Technologie darstellen.
- Beschichtungen am Wärmeübertragern beeinflussen das Vereisungsverhalten nur in der ersten Frostphase. Unter sehr kalten Umgebungsbedingungen bestimmen zunehmend die

geometrischen Hauptmerkmale des Wärmeübertragers wie z.B. der Lamellenabstand das Vereisungsverhalten. Der beobachtbare Effekt ist bei Umgebungsbedingungen mit höherer Luftfeuchtigkeit ausgeprägter.

- Die Kältemittelverteilung im Wärmeübertrager zeigt sich unmittelbar in dessen Vereisungsverhalten. Um eine quantifizierbare Aussage zu erhalten, ist eine zusätzliche orts aufgelöste Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit über den Verdampfer erforderlich.

Kältekreisconfigurationen:

- Die beste Performanz ergab sich bei der Analyse mit dem vereinfachten Modell für den Kältekreislauf mit Ejektor, wobei weitergehende Analysen mit verfeinerten Modellen notwendig sind.
- Die Nutzung einer Kaskade zeigte eine COP Verbesserung von bis zu 5% im Vergleich zu konventionellen Kreisläufen, was zu einer Erhöhung der Heizleistung um bis zu 44% führt (unter Nutzung des gleichen Kältemittels in beiden Stufen).
- COP Erhöhungen um 4% bis 10% sind bei einer Verdampfertemperatur von -30°C mit Flash Tank oder internem Wärmeübertrager (IHX) möglich.
- Im Vergleich zu einem konventionellen Kältekreislauf konnten Kaskade, Zwischenkühler und LI Kreisläufe als vielversprechende Alternativen evaluiert werden.
- Mit Hilfe des LI Kältekreislaufs kann der Einsatzbereich auf niedrigere Temperaturen erweitert werden. Die Flüssigkeitseinspritzung hat dabei nur einen geringen Einfluss auf COP und Heizleistung. Die Umgebungstemperatur hat fast keinen Einfluss auf den elektrischen Energieverbrauch des Verdichters.

5.2. Weiterverwertung der Projektergebnisse (im Projektteam)

Ergebnisse und Erkenntnisse in Bezug auf das Vereisungsverhalten von Wärmeübertragern werden in das im November 2017 startende nationale IEA HPT Annex 51 Projekt „Akustische Emissionen von Wärmepumpen“, das vom AIT als Operating Agent geleitet wird, einfließen. Von Relevanz sind sie zudem auch für das laufende IEA HPP Annex 50: Wärmepumpen in Mehrfamiliengebäuden für Raumheizung und Warmwasser.

Weiters sind Forschungsarbeiten in Bezug auf komplexere Modelle für Kältekreisläufe mit Ejektoren, sowie im Zusammenhang mit der Berechnung der Kaskaden Kreisläufe mit unterschiedlichen Kältemitteln notwendig.

Im Bereich der Vereisung von Wärmeübertragern liegen die nächsten Schritte in der thermodynamischen und optischen Messung der Vereisung und Abtauung kompletter Wärmeübertrager. Dabei wird auch das Gewicht des Gesamtsystems transient gemessen, um verlässliche Vergleichsdaten für die numerische Simulation zu erhalten. Dies wird auch durch weiterführende lokale Messungen der Eismassenverteilung unterstützt.

5.3. Relevante weitere Zielgruppen (außerhalb des Projektteams)

Zu den weiteren Zielgruppen der Projektergebnisse zählen:

- **Hersteller von Wärmepumpen sowie von Komponenten für Wärmepumpen wie z.B. Produzenten von Wärmeübertragern, Verdichtern:**

Die Unternehmen der Wärmepumpenbranche können mithilfe der im Projekt gewonnenen Erkenntnisse, Methoden und Tools, ihre Produkte weiterentwickeln, und dazu beitragen, dass Luftbasierte Wärmepumpensysteme auch in kälteren Regionen in Zukunft nicht als „Stromheizung“, sondern als innovative Effizienztechnologien gelten, und damit eine breite Anerkennung und Marktdurchdringung erfahren. Die im Projekt entwickelten Methoden zur Bewertung des Designeinflusses (Geometrie, MPE vs. Lamelle, etc.) der Luftseite von Verdampfern sowie die Auswirkungen auf die Performance einer Wärmepumpe sind von hoher Relevanz, als sich österreichische Hersteller traditionell durch hochwertige Produkte von asiatischen Billigproduzenten abheben. Wärmepumpenhersteller können mittels der Projektergebnisse bei der Optimierung des Gesamtdesigns der Verdampfereinheit, aber auch des Designs der kompletten Wärmepumpe inkl. einer optimierten Kältekreisconfiguration, unterstützt werden. Ebenso können fortschrittliche Hersteller von Wärmeübertragern und Ventilatoren auf Basis der Projektergebnisse dabei unterstützt werden, innovative Produkte zu entwickeln, und damit (neue) attraktive Marktsegmente zu erschließen. Mittels der im Projekt entwickelten Modelle können Tests in der Klimakammer auf fortschrittliche Prototypen reduziert, und damit das vorhandene Entwicklungspotenzial besser ausgeschöpft werden und ein auf die klimatischen Anforderungen bestmöglich optimiertes Produkt auf den Markt gebracht werden.

- **HVAC Praktiker wie z.B. Planer und Installateure, die sich mit dem Design, der Auswahl und Auslegung von Wärmepumpensystemen für verschiedene Anwendungsszenarien in kälteren Regionen beschäftigen.**

Für diese Zielgruppe können - basierend auf den Projektergebnissen - Werkzeuge und Tools zur Bewertung / zum Vergleich von innovativen Wärmepumpenkonzepten und deren Effizienz im Jahresverlauf entwickelt werden.

- **Gebäudeeigentümer /-betreiber in kälteren Regionen, mit Interesse an einer verbesserten Effizienz ihrer HVACR Komponenten:**

Im Rahmen des Projekts wurde eine Datenbasis geschaffen, die eine Unterstützung in Bezug auf effizienten HVACR Betrieb sowohl in der Angebotsphase für neue Gebäude als auch in der Sanierung ermöglicht.

- **Einrichtungen, die sich mit der Minimierung von Energieverbräuchen beschäftigen wie z.B. Energieagenturen, Legislative Behörden, Stadtwerke:**

Unterstützung von Fördergebern bei der Erarbeitung zukünftiger Förderkriterien, die lokale Umweltbedingungen berücksichtigen (im speziellen niedrige Temperaturen) durch Einbringen der (inter)nationalen Erfahrungen aus dem Annex.

6. Verzeichnisse

6.1. Projekt-Websites

Website des Operating Agent: <http://web.ornl.gov/sci/usnt/QiQmAnnex/indexAnnex41.shtml>

Zugriff: 15.09.2017

Website des IEA Heat Pump Centers: <http://heatpumpingtechnologies.org/annex41/>

6.2. Literaturverzeichnis

Zoier, Hans: Betriebsverhalten von Außenluft-Wärmepumpen bei tiefen Außentemperaturen, Technische Universität Graz, November 2014

Strehlow A., Martín-Callizo C., Oltersdorf T., Popovac M., Reichl Ch., GreenHP: Heat Exchangers for Next Generation Heat Pump, 4th International Congress and Exhibition on Aluminium Heat Exchanger Technologies for HVAC&R, 10-11 June, 2015, Hotel Radisson Blue Scandinavia, Düsseldorf, Germany

Reichl Ch., Strehlow A., Oltersdorf T., Braungardt S., Pröhl M., Benovsky P., Popovac M., Fleckl T., GreenHP: Next Generation Heat Pump for Retrofitting Buildings – new evaporator component for large capacity air-to-water heat pumps, Advanced HVAC & Natural Gas Technology Conference, May 6-9, 2015, Radisson BLU Hotel Latvija Conference Center, Riga, Latvia; DOI: 10.7250/rehvaconf.2015.015; page 100-109, 2015

Weller H. G., Tabora G., Jasak H., Fureby C., A tensorial approach to computational continuum mechanics using object-oriented techniques, Computers in Physics 12: 620 – 631, 1998

Na B., Webb R., A fundamental understanding of factors affecting frost nucleation, International Journal of Heat and Mass Transfer 46: 3797– 3808.

Hermes C.J.L., Piucco R.O., Barbosa Jr. J.R., Melo C., A study of frost growth and densification on flat surfaces, Experimental Thermal and Fluid Science 33: 371–379, 2009

Popovac M., Seichter S., Benovsky P., Fleckl T., Reichl Ch., Numerical Analysis of the Frosting Performance of the air-side of a heat-pump, 24th IIR international congress of refrigeration, August 16-22, 2015, ICR2015, Yokohama, Japan

Moisi H., Rieberer R., 2016: Task 3 – Energy savings assessment of an ASHP with liquid injection for cold climate applications, Austrian Team Report, IEA HPP Annex 41”Cold Climate Heat Pumps”

Heimrath, R, Haller, M., 2007: Project Report A2 of Subtask A: The Reference Heating System, the Template Solar System - A Report of IEA SHC Task 32: Advanced Storage Concepts for Solar and Low Energy Buildings

6.3. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht Vorarbeiten.....	7
Tabelle 2: Taskinhalte auf internationaler Ebene.....	10
Tabelle 3: Teilnehmende Organisationen am IEA HPP Annex 41.....	11
Tabelle 4: Taskinhalte auf nationaler Ebene.....	12
Tabelle 5: Minimum- und Maximumtemperaturen (amb, min/max) sowie die Heizgrenztemperatur (heat, limit) für die betrachteten Regionen (Moisi und Rieberer, 2016).....	25

6.4. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Skizzen zur Bemaßung des Referenzmusters für die Vereisungsversuche. Vorderansicht (links),.....	15
Abbildung 2 (links): Versuchsaufbau in der AIT Klimakammer ohne Verbindungsrohrleitungen; (rechts): MPE-Röhren-Lamellen-Wärmeübertragerpaket eingebaut im Strömungskanal.....	15
Abbildung 3: Überblicksdarstellung mit Einströmrohr, und Ausgleichskammer.....	15
Abbildung 4: (links): gerades Kanalstück; (mitte): Messbox mit Waagen; (rechts): Ausgangsrohr mit Ventilator.....	16
Abbildung 5: (links): konventioneller Rohrbündel-Lamellen Wärmeübertrager (CTfin); (rechts): innovativer Aluminium MPE Wärmeübertrager (MPEfin).....	16
Abbildung 6: Transientes Waagensignal der Massenzunahme während der Vereisung; Rohrbündel-Lamellen Wärmeübertrager (Ctfin, rot) und MPE Wärmeübertrager (MPEfin, grün); (links): bei einer Raumtemperatur von +10°C; (rechts): bei -25°C.....	16
Abbildung 7: Zeitl. Verlauf der Lufttemperatur und des relativen Volumenstroms während des Vereisungsprozesses t+10.....	18
Abbildung 8: Zeitlicher Verlauf der Lufttemperatur und des relativen Volumenstroms während des Vereisungsprozesses t-25.....	18
Abbildung 9: Zeitlicher Verlauf der Thermoöltemperatur und des relativen Volumenstroms während des Vereisungsprozesses t+10.....	19
Abbildung 10: Zeitlicher Verlauf der Thermoöltemperatur und des relativen Volumenstroms während des Vereisungsprozesses t-25.....	20
Abbildung 11: Messaufbau für die Vereisungsmessungen der Wärmeübertrager auf Systemebene (GreenHP).....	20
Abbildung 12: Auffangbehälter unterhalb des Wärmeübertragers.....	21
Abbildung 13: Vergleich der räumlichen Verteilung der akkumulierten Eismasse gemessen mittels Wägung des Wassers nach der Abtauung (links) mit der simulierten Eismasse (rechts).....	21
Abbildung 14: Vergleich der simulierten Kreislaufvarianten hinsichtlich COP in Abhängigkeit der Verdampfungstemperatur.....	23
Abbildung 15: Verlauf der simulierten Heizleistung in Abhängigkeit der Verdampfungstemperatur für die unterschiedlichen Kreislaufvarianten.....	23
Abbildung 16: Kompressoraustrittstemperatur in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur und der Wasseraustritts-temperatur aus dem Kondensator am IWT-Wärmepumpen-Versuchsstand.....	24
Abbildung 17: COP in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur und Wasseraustrittstemperatur.....	24
Abbildung 18: Relative Verbesserung des SPF für unterschiedliche Regionen (Moisi und Rieberer, 2016).....	25

6.5. Abkürzungsverzeichnis

AIT.....	<i>Siehe</i> Austrian Institute of Technology GmbH
CFD.....	<i>Siehe</i> Computational Fluid Dynamics
EU	<i>Siehe</i> Europäische Union
HVAC.....	<i>Siehe</i> Heating, Ventilation and Air Conditioning, <i>Siehe</i> Heating, Ventilation and Air Conditioning
HVACR.....	<i>Siehe, Siehe</i> Heating, Cooling, Air Conditioning and Refrigeration
IHX	<i>Siehe</i> Interner Wärmetauscher
IWT.....	<i>Siehe</i> TU Graz, Institut für Wärmetechnik
ND.....	<i>Siehe</i> Niederdrucksammler
SPF	<i>Siehe</i> Seasonal Performance Factor