

LC150 – ENTWICKLUNG EINES KÄLTE- MITTELREDUZIERTEN WÄRMEPUMPEN- MODULS MIT PROPAN



Abschlussbericht Eingehende Darstellung

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Autor*Innen: Dr.-Ing. Lena Schnabel, Dr.-Ing. Katharina Morawietz, M. Sc. Timo Methler, Dr.-Ing. Thore Oltersdorf, Dr.-Ing. Hannes Fugmann, Dipl.-Ing. Clemens Dankwerth

Vorhabenbezeichnung: LC150 – Entwicklung eines kältemittelreduzierten Wärmepumpenmoduls mit Propan	
Kurzzeichen: LC150	Förderkennzeichen: 03EN4001A
Zuwendungsempfänger: Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V.	
Ausführende Stelle: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE	
Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2020 – 31.03.2023 (Verlängerung bis 30.06.2023)	
Gesamtprojektleitung: Dr.-Ing. Lena Schnabel Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg	
Technische und administrative Projektleitung: Dr.-Ing. Katharina Morawietz / Dipl.-Ing. Clemens Dankwerth	

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Danksagung

Das Forschungsprojekt LC150 wurde in der Zeit vom 01.10.2020 bis zum 30.06.2023 durch den Projektträger Jülich (PTJ) unter dem Förderkennzeichen 03EN4001A betreut. Die Finanzierung erfolgte aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, wofür wir uns herzlich bedanken.

Dieser Bericht beinhaltet eine Beschreibung aller Arbeiten und Ergebnisse, die vom Fraunhofer ISE in Zusammenarbeit mit dem Industriebeirat erzielt worden sind.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	6
2	Ergebnisse.....	8
2.1	AP1 – Industriekoordination, Bewertungsmethodik und Entwicklungsmethodik	8
2.1.1	Koordination Industriebeirat.....	8
2.1.2	Bewertungs- und Entwicklungsmethodik	9
2.1.3	Datenauswertung und -aufbereitung	11
2.2	AP 2 – Charakterisierung einzelner Komponenten des Kältekreis	12
2.2.1	Design und Konstruktion Wärmeübertrager	12
2.2.2	Bauteilvermessung Wärmeübertrager.....	14
2.2.3	Auswahl Verdichter	24
2.2.4	Ölcharakterisierung	25
2.3	AP 3 – Charakterisierung füllmengenreduzierter Komponenten im Kältekreis.....	26
2.3.1	Auswahl und Zusammenstellung der Komponentenkombinationen	26
2.3.2	Planung und Inbetriebnahme von Prüfinfrastruktur	29
2.3.3	Messkampagne zur Kreuzevaluation von Einzelkomponenten im Kältekreis	32
2.3.4	Vertiefte Untersuchungen ausgewählter Komponentenkombinationen	36
2.4	AP 4 – Bauraum und Verrohrung	39
2.5	AP 5 – Kältemittel und Sicherheit	41
2.5.1	Einführung.....	41
2.5.2	Untersuchung der Propanverteilung im Raum	41
2.5.3	Teststand und allgemeiner Aufbau	41
2.5.4	Entwicklung des Versuchskonzepts	45
2.5.5	Diskussion der Ergebnisse.....	47
2.5.6	Zusammenfassung	53
2.5.7	Nächste Schritte	55
2.6	AP 6 – Betriebsstrategien	56
2.6.1	Bewertung von kritischen Betriebszuständen.....	56

2.7	AP 7 – Demonstration	58
2.8	Erfolgte Veröffentlichungen	60
2.8.1	Paper	60
2.8.2	Präsentationen	60
2.8.3	Pressemitteilungen	62
2.8.4	Artikel in Fachzeitschriften	62
2.8.5	Andere öffentliche Auftritte	62
3	Anhang.....	63
3.1	Anhang zu "AP 5 – Kältemittel und Sicherheit" - Testergebnisse am Beispiel Freisetzung in Wärmepumpe und Prüfraum (Level 2)	63
3.1.1	Ausströmung aus 0,05 m	63
3.1.2	Ausströmung aus 0,6 m	65
3.1.3	Abfluss aus 2,2 m	67
4	Abbildungsverzeichnis.....	70
5	Tabellenverzeichnis.....	73

1 Zusammenfassung

Das Forschungsvorhaben LC150 hat sich zum Ziel gesetzt, Kältekreise für Wärmepumpen mit dem umweltfreundlichen Kältemittel R290 (Propan) mit einer maximalen Füllmenge von 150 g zu entwickeln, um diese Wärmepumpen in jedem Raum unabhängig von Aufstellungsrestriktionen installieren zu können. Alle entwickelten Wärmepumpen sind als Sole/ Wasser Wärmepumpen ausgeführt und haben eine Zielheizleistung von 5-10 kW. In der Abbildung 1 sind alle erfolgreich vermessenen Kältekreise des Projekts dargestellt. Alle Punkte, die unter der 150 g Kurve mit gleicher Füllmenge liegen, haben dieses Ziel erreicht. Die Kältekreise sollten ein möglichst hohe Füllmengeneffizienz erreichen. Das heißt, dass die spezifische Füllmenge (Y-Achse in g/kW) möglichst gering bei gleichzeitig hoher Heizleistung (x-Achse möglichst weit rechts) sein soll. Der erfolgreichste Wert (roter Punkt) liegt hier bei einer spezifischen Füllmenge von unter 10 g Kältemittel pro kW Heizleistung mit einer Heizleistung von 12,8 kW¹.

Die Kältekreise wurden nicht nur hinsichtlich ihrer Kältemittelleffizienz, sondern auch hinsichtlich ihrer thermischen Effizienz bewertet und verglichen. Die Mindestanforderungen lagen bei einem SCOP von 4,3 bei einer Senktemperaturen zwischen 24-35 °C und einer Quelltemperatur von 0 °C. In Tabelle 6 ist eine Auflistung mit allen charakteristischen Bewertungsgrößen aller vermessenen Kältekreise aufgeführt.

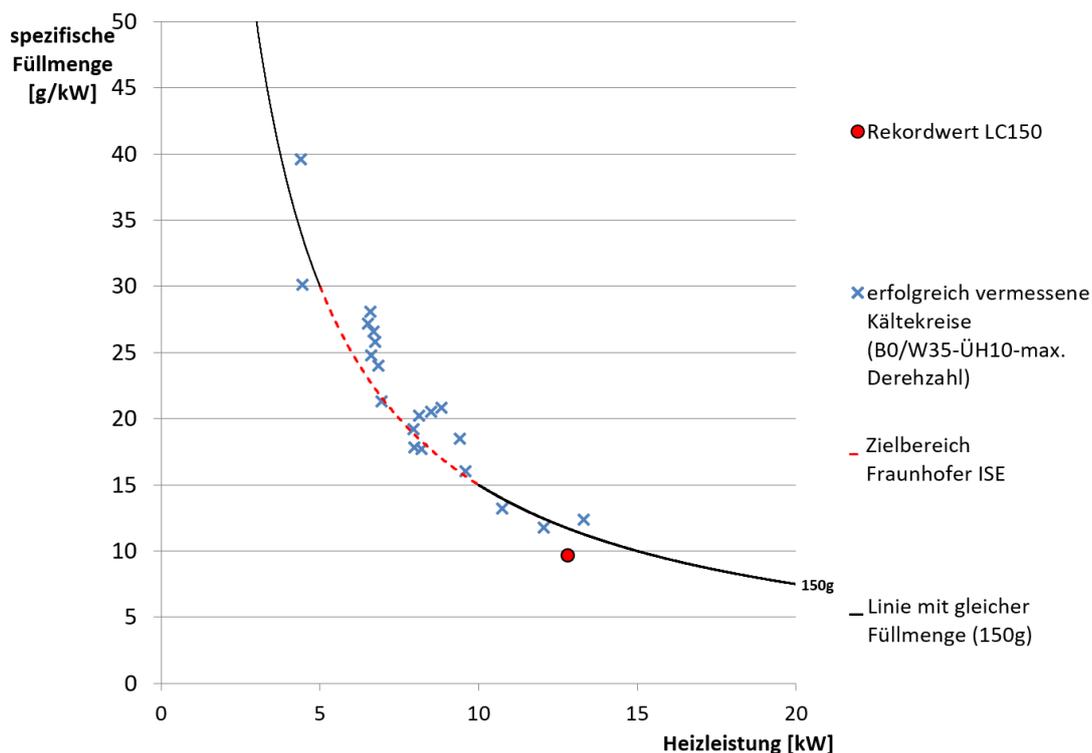


Abbildung 1: Erfolgreich vermessene Wärmepumpenprüflinge im Projekt LC150 mit Angabe der spezifischen Füllmenge aufgetragen gegenüber der Heizleistung.

¹ <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2022/effizienzrekord-fuer-waermepumpen-kaeltekreis-mit-propan.html>

Obwohl die Kältekreise eine Füllmenge kleiner 150 g aufweisen und damit keinen Restriktionen hinsichtlich des Aufstellungsortes unterliegen, wurden für ausgewählte Kältekreise Leckageszenarien simulativ und experimentell untersucht und bewertet. Mit dem experimentellen Datensatz sind nun die Grenzen zwischen gefahrlosen und gefahrbehafteten Anlagen bekannt. Durch konstruktive Änderungen an den Wärmepumpen-Gehäusen und dem Einsatz zusätzlicher Sicherheitsmaßnahmen können die Datensätze genutzt werden, um die Gefahrenlage neu zu bewerten. Es kann festgestellt werden, dass eine Ausströmhöhe von 2,2 m zu den geringsten Risiken aufgrund von Verdünnungseffekten führt. Dies stimmt mit den Standardbedingungen überein, die größere Raumflächen oder Kältemittelfüllungen für Geräte ermöglichen, die auf anderen Ebenen als der Bodenhöhe installiert sind.

2 Ergebnisse

2.1 AP1 – Industriekoordination, Bewertungsmethodik und Entwicklungsmethodik

2.1.1 Koordination Industriebeirat

Das Projekt LC150 war als Plattformprojekt gestaltet. Entsprechend wurden die am Fraunhofer ISE durchgeführten Entwicklungsarbeiten im Projekt von einem Industriebeirat bestehend aus neun europäischen Wärmepumpenherstellern begleitet. Während die Entwicklungsarbeit am Fraunhofer ISE konzipiert und durchgeführt wurde, hatte der Industriebeirat die Möglichkeit, die Ausrichtung des Projekts mitzugestalten sowie direkt an den Projektergebnissen zu partizipieren. Dieses Projektkonzept erlaubt eine effiziente und rasche Umsetzung von Entwicklungszielen, die sich an den Bedürfnissen eines breiten europäischen Markts orientieren und der gegenwärtigen Ressourcenknappheit der Industrie Rechnung tragen.

Die Industriepartner des Industriebeirats (in alphabetischer Reihenfolge) sowie die Förderverteilung des BMWK und Schwerpunkte sind in Abbildung 2 dargestellt.

Low Charge Heat Pump Module using 150g of R-290 Project overview

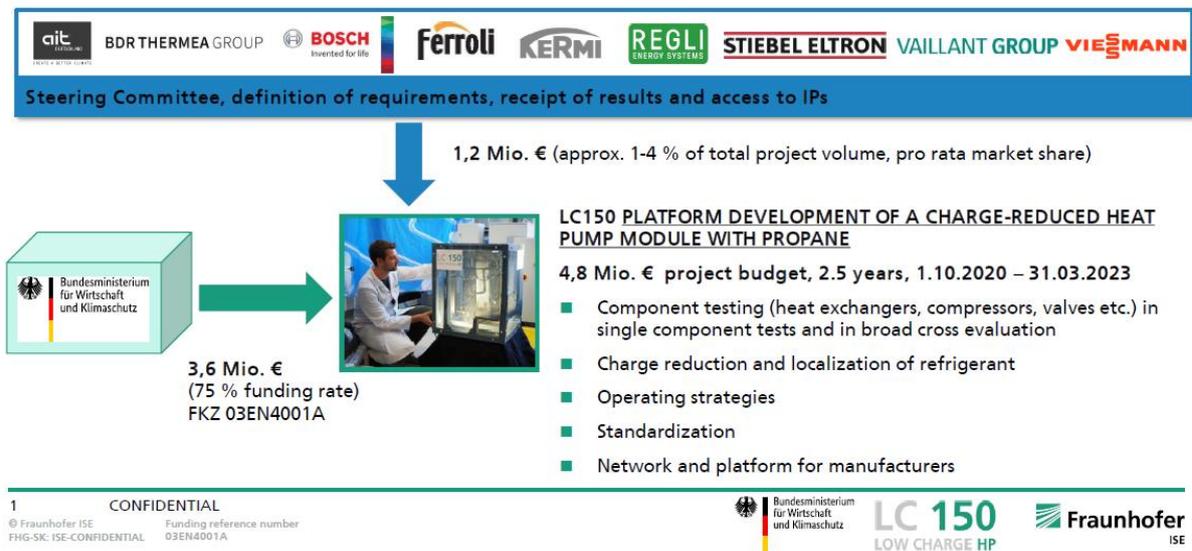


Abbildung 2: Zusammensetzung Industriebeirat

Neben monatlichen Jour Fixes mit den teilnehmenden Firmen haben Projekttreffen, Workshops zu dedizierten Themen und bilaterale Gespräche stattgefunden. Als weitere Unterstützung in dem Projekt war die Universität Valencia (Institut für angewandte Thermodynamik mit den Mitarbeitenden des Professors José María González Maciá) sowie die Firma EP Ehrler Prüftechnik-Engineering GmbH beteiligt. Bei der Universität Valencia wurde das Tool IMST-ART weiterentwickelt, um eine verbesserte simulative

Kältemittelfüllmengen vorherbestimmung zu erreichen. Die Firma EP Ehrler Prüftechnik-Engineering GmbH hat für die Versuche der Kreuzevaluation drei Hydraulikprüfstände sowie einen Teil des Ausströmteststandes für dieses Projektes gebaut.

2.1.2 Bewertungs- und Entwicklungsmethodik

Es wurden verschiedene Bewertungsgrößen angesetzt, um aufzuzeigen, ob ein Kältekreis und dessen Komponenten für Wärmepumpen geeignet wären. Das primäre Ziel war es Kältekreise zu entwickeln, die eine Kältemittelfüllmenge unter 150 g Propan mit guter thermischer Performance haben. Für Kältekreise, bei denen sich herausstellte, dass die 150 g Grenze nicht einzuhalten war, wurden Versuche mit möglichst geringer Füllmenge durchgeführt. Um den Begriff „so gering wie möglich“ besser beurteilen zu können und Füllmenge in Abhängigkeit der Leistung eines Kältekreises zu setzen, wurde die Bewertungsgröße *spezifische Kältemittelfüllmenge* (oder auch *Kältemittleffizienz* genannt) eingeführt, die sich auf die resultierende Heizleistung bezieht. Sie wird in Gramm Kältemittel im gesamten Kältekreis pro Kilowatt Heizleistung ($g_{\text{Kältemittel}}/kW_{\text{Heizleistung}}$) angegeben.

Diese Bewertungsgröße ist von den Randbedingungen abhängig, dem der Kältekreis ausgesetzt wird. Meist wurden folgende Randbedingungen gesetzt:

- Soleeintritt: 0 °C; Soleaustritt: -3 °C
- Wassereintritt: 30 °C, Wasseraustritt: 35 °C
- Überhitzung Sauggas: 10 K
- Frequenz Verdichter: höchste Frequenz

Für die thermische Bewertung der Kältekreise wurden COP-Werte (coefficient of performance) unterschiedlicher Betriebspunkte messtechnisch bestimmt und in Form eines SCOP (seasonal coefficient of performance) gewichtet zusammengeführt. Dies wurde für die beiden Heizwassertemperaturen 35 °C und 55 °C durchgeführt und somit liegen $SCOP_{35\text{ °C}}$ und $SCOP_{55\text{ °C}}$ als Bewertungsgrößen vor. Je höher diese thermische Effizienz, desto geeigneter ist ein Kältekreis für die Wärmepumpenanwendung. Die Mindestanforderung des $SCOP_{35\text{ °C}}$ -Wertes liegt bei 4,3. Die thermische Bewertung spielte in diesem Projekt gegenüber der Kältemittleffizienz eine untergeordnete Rolle.

Weitere Bewertungsgrößen, wie Materialeinsatz, Bauraum und hermetische Bauweise der Kältekreise wurden wiederum nachgelagert behandelt.

Ein weiterer Parameter für die Bewertung der vermessenen Kältekreise ist die minimale Kältemittelfüllmenge, die ein Kältekreis benötigt, um in allen auftretenden Betriebspunkten einen stabilen Betrieb zu ermöglichen. Die Bestimmung der minimalen Kältemittelfüllmenge ist in Abschnitt 2.3.3 detailliert beschrieben. Ebenso werden in dem Kapitel auch andere Befüll-Status beschrieben.

Alle Bewertungsgrößen wurden zusammen mit dem Industriebeirat festgelegt.

Die Entwicklungsmethodik zum Erreichen von Kältekreisen mit geringer Propanfüllmenge bestand aus vier Schritten, die mehrfach wiederholt wurden und deren jeweilige Ergebnisse miteinander verglichen wurden (Kreuzevaluation):

- Auswahl geeigneter Komponenten
- Aufbau mehrerer Kältekreise aus diesen Komponenten
- Vermessung, Bewertung und Simulation der Kältekreise
- Anpassung Kältekreisdesign, Beschaffung neuer Komponenten

Nachfolgend ist die Entwicklungsmethodik schematisch abgebildet.

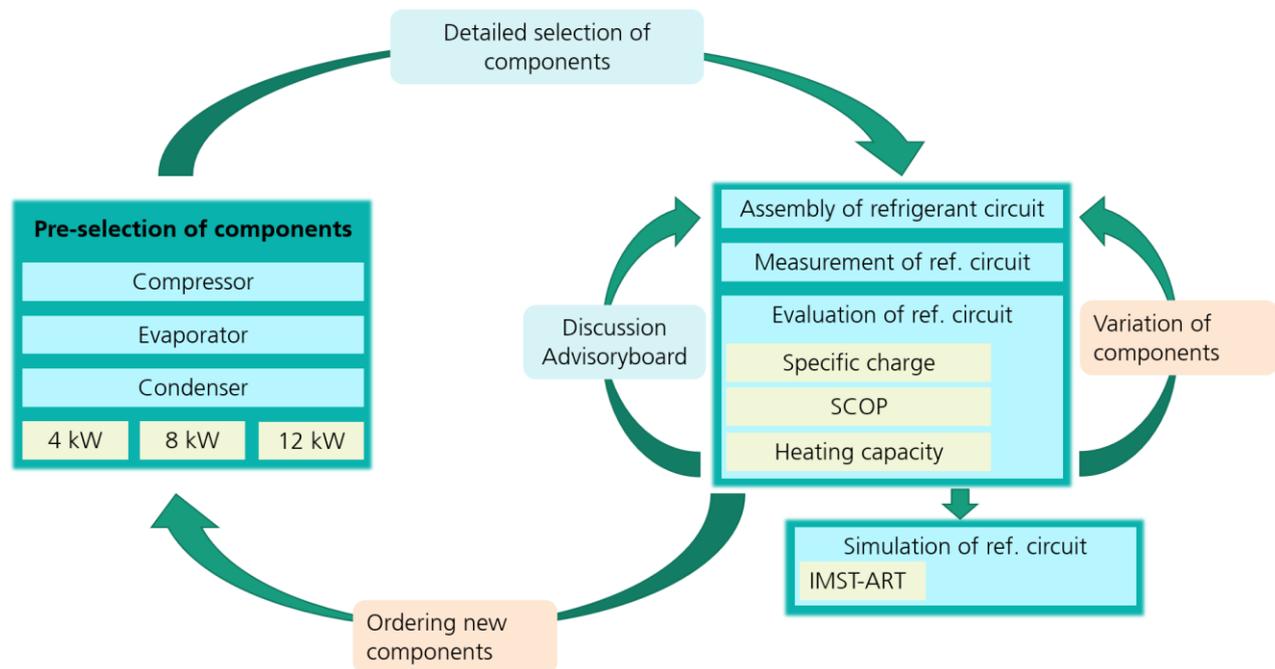


Abbildung 3: Schema der Entwicklungsmethodik in LC150.

Aus der Entwicklungsmethodik von kältemittelreduzierten Propan Kältekreisen können Designhinweise abgeleitet werden. Die Kältekreis-komponenten sind folgendermaßen zu wählen, um eine reduzierte Kältemittelmenge zu erhalten:

- Der Verdichter sollte möglichst wenig Öl-volumen besitzen.
- Das Öl sollte eine möglichst geringe Propanabsorptionscharakteristik aufweisen.
- Der Verdichter sollte möglichst hohe Verdichterdrehzahlen erlauben.
- Der Verdichter sollte isoliert werden.
- Die Rohrleitungen sollten so kurz und dünn wie möglich gehalten werden.
- Der Filtertrockner sollte in die Saugleitung verlegt oder weggelassen werden.
- Die Wärmeübertrager sollen möglichst klein oder asymmetrisch sein.
- Die Wärmeübertrager sollten keine unnötig großen Ports sowie Verteil- und Sammelkanäle haben.

- Mit erhöhter Überhitzung lässt sich die benötigte Kältemittelfüllmenge reduzieren.
- Es ist darauf zu achten, dass keine Öl- und Flüssigkeitsfallen im Kältekreis enthalten sind.
- Sensoren sind auf ein Minimum zu reduzieren.

2.1.3 Datenauswertung und -aufbereitung

Aufgrund der vielen Messungen mit sehr vielen Betriebspunkten mit einem 24/7 Messbetrieb in Arbeitspaket 3 wurde eine große Menge an Daten aggregiert. Innerhalb des Forschungsvorhabens wurde eine automatisierte Datenaufbereitung und Auswertung entwickelt.

Die Regelung der Teststände wurde in verschiedene Bereiche eingeteilt. Es gibt den Teil, in dem es betriebsbedingtes Einschwingverhalten gibt und es gibt den stationären Teil. Der Teststand und die Datenaufbereitung erkennen automatisch den stationären Teil einer Messung. Über den stationären Teil einer Messung werden automatisch Mittelwerte aller Messstellen und Aktorwerte gebildet. Aus den aufgenommenen Messwerten werden zum Teil weitere Größen berechnet. Die ungemittelten aber auch die gemittelten Messdaten werden alle 24 Stunden von den Messrechnern in eine SQL-Datenbank geschrieben. In der SQL-Datenbank werden die Messdaten mit entsprechenden Tags versehen, um die Messungen zweifelsfrei zuordnen zu können. Auf diese Datenbank kann das online/ Browser Tool Grafana zugreifen. In dem online/ Browser Tool Grafana werden automatisch einige voreingestellte Auswertungs-Graphen erzeugt. Es können aber auch manuelle Messdaten zu anderen Auswertungsgraphen kombiniert werden. Die Interpretation der Ergebnisse muss weiterhin manuell erfolgen.

2.2 AP 2 – Charakterisierung einzelner Komponenten des Kältekreis

2.2.1 Design und Konstruktion Wärmeübertrager

Um im Bereich Wärmeübertrager, die inneren Volumina und somit auch die benötigte Kältemittelfüllmenge so gering wie möglich zu halten, stand das Fraunhofer ISE in regelmäßigem Austausch mit folgenden Wärmeübertrager-Herstellern: AKG Verwaltungsgesellschaft mbH, Alfa Laval Mid Europe GmbH, Danfoss GmbH, Kelvion Holding GmbH, Multichannel AB, SWEP International AB. Meist wurden asymmetrische Plattenwärmeübertrager herangezogen, um die inneren Volumina zu reduzieren. Allerdings ist die Umsetzung von einem asymmetrischen Verhältnis von Kältemittel-Seite zu Hydraulik-Seite nur bis zu einem bestimmten Grad möglich. Das liegt zum einen an den Fertigungsrandbedingungen der Plattenwärmeübertrager Hersteller und zum anderen daran, dass bei einer stärkeren Reduktion der hydraulischen Querschnitte der Druckverlust sowohl auf der Kältemittelseite als auch auf der Hydraulikseite zu stark ansteigen würde. Parallel zur Reduktion der inneren Volumina mittels asymmetrischer Plattenanordnung wurde versucht die Ports und auch die Verteil- und Sammelkanäle auf der Kältemittelseite der Plattenwärmeübertrager so klein wie möglich zu halten, um hier ungenutzte Volumina zu reduzieren. Auf Grund der Ausrichtung des Projektes wurden ausschließlich gelötete Plattenwärmeübertrager für den Verflüssiger und den Verdampfer in Betracht gezogen. Im Bereich des Zwischenwärmeübertragers sind auch andere Bauformen zum Einsatz gekommen.

Im Projekt wurden Wärmeübertrager mit einem asymmetrischen Verhältnis von bis 1:2 bis hin zu komplett symmetrischen Wärmeübertragern eingesetzt. Der Grad der Asymmetrie der Wärmeübertrager wurde nicht manuell verändert. Das heißt die Wärmeübertrager wurden so eingesetzt, wie sie vom Lieferanten bereitgestellt wurden.

Ein erfolgreiches Beispiel für die manuelle Reduktion der Volumina innerhalb der Ports und der Verteil- sowie Sammelkanäle im Plattenwärmeübertrager ist in Abbildung 4 anhand eines Verdampfers dargestellt. Die rot markierten Bereiche wurden dabei mit Epoxidharz verschlossen.

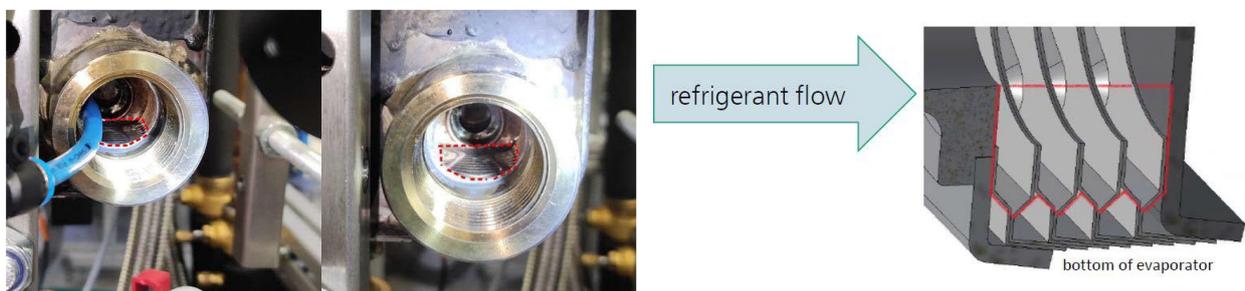


Abbildung 4: Links: Kältemittelseitiger Eintritt eines Verdampfers mit manuell gefüllten Totvolumina mit Epoxidharz (Blick von der gegenüberliegenden Seite durch ein Schauglas). Rechts: Schematische Darstellung des Eintritts des Verdampfers.

Bei diesem Verdampfer wurde das ungenutzte Volumen im Verteilbereich des Wärmeübertrager mit Epoxidharz bis zu einer bestimmten Höhe vergossen. Die Strömungsformen und Verteilung des Kältemittels auf die einzelnen Kanäle des Wärmeübertragers werden dabei nur marginal oder nicht negativ beeinflusst. Durch das Vergießen waren die Bereiche, die normalerweise mit flüssigem Kältemittel gefüllt sind, verschlossen. In den Abbildung 5 und Abbildung 6 ist eine Vergleichsmessung zweier Verdampfer dargestellt. Einmal wurde ein Verdampfer mit gefülltem Verteilkanal vermessen (blaue Punkte) und einmal als Referenz der unbehandelte gleiche Verdampfer in demselben Kältekreis (rote Punkte).

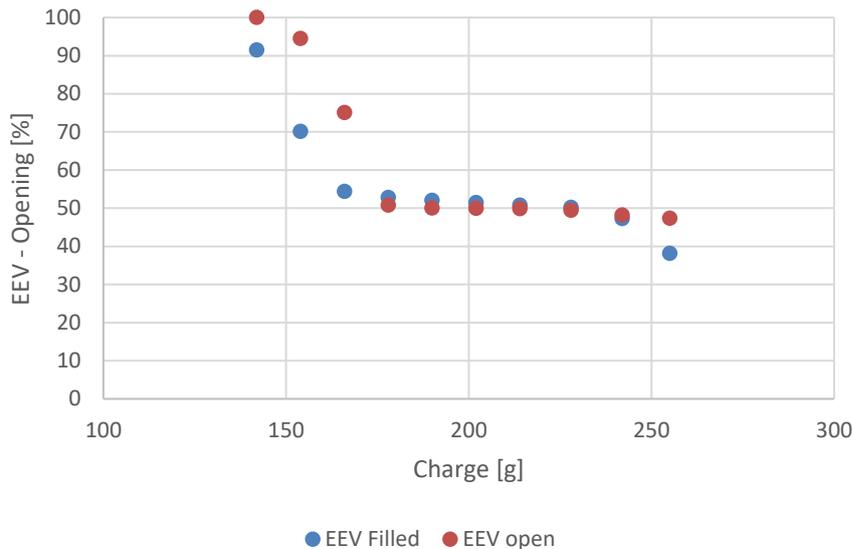


Abbildung 5: EEV-Öffnungsgrad aufgetragen über der Füllmenge für Wärmeübertragervermessung

Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Füllmengenreduktion von etwa 12 g. Diese Reduktion ist an der Visualisierung des Expansionsventilverhaltens (Abbildung 5) zu erkennen. Am Sprung des EEV-Öffnungsgrades von 100 % zu einem konstanten Wert (hier ca. 50 %) über der Füllmenge kann als Indiz für die minimale optimale Füllmenge interpretiert werden. Sobald sich das EEV auf einem konstanten Wert, der nicht 100 % ist, eingependelt hat, ist die minimale optimale Füllmenge erreicht. In Abbildung 5 ist zu erkennen, dass die Messreihe (blaue Kreise = EEV filled) mit dem gefüllten Port eine konstante EEV-Stellung etwa 12 g früher erreicht als die Messreihe (rote Kreise = EEV open).

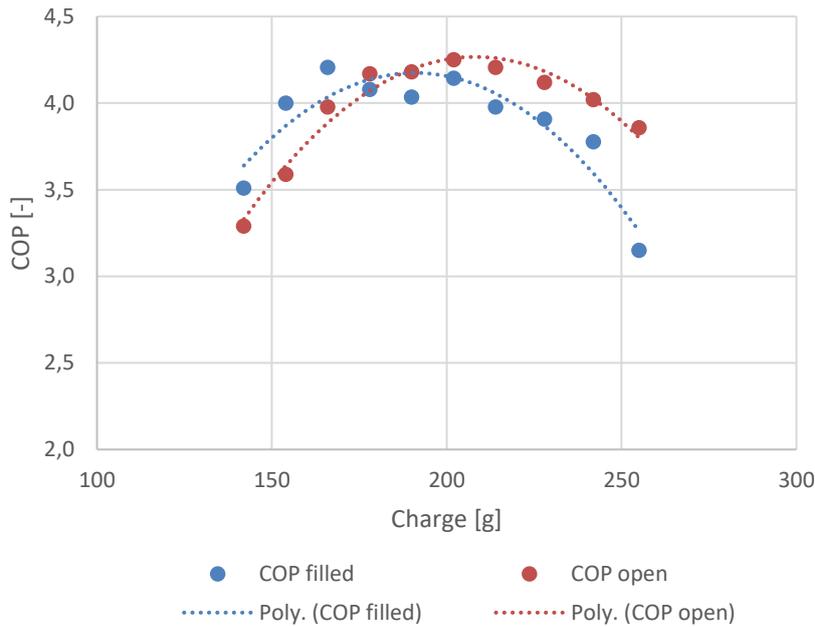


Abbildung 6: COP aufgetragen über der Füllmenge

Anhand des Vergleichs des COP-Maximums (Abbildung 6) kann eine Beeinflussung der Effizienz abgeleitet werden. Es kann eine leichte Beeinträchtigung des gefüllten Wärmeübertragers (blaue Kreise) abgelesen werden, weil das COP-Maximum leicht niedrige Werte erreicht. Ebenso kann das frühere Erreichen des Maximalen COPs zum Bestimmen der minimalen optimalen Füllmenge genutzt werden. In Abbildung 6 ist zu erkennen, dass die Messreihe (blaue Kreise = COP filled) mit dem gefüllten Port das COP-Maximum früher erreicht als die Messreihe (rote Kreise = EEV open) mit dem regulären Verdampfer. Auch hier können die 12 g abgelesen werden

Bei einer maximal angestrebten Kältemittelfüllmenge von 150 g Propan ist die Einsparung von 12 g ein sehr gutes Ergebnis. Die 12 g Kältemittel können an anderer Stelle genutzt werden (etwa für höhere Heizleistungen oder höhere Effizienzen). Ähnliche Einsparungen oder noch höhere Kältemittelsparungen können am Verflüssiger-Austritt erreicht werden, da dort das Kältemittel in komplett flüssiger Phase vorliegt und somit eine höhere Dichte aufweist als das Kältemittel im Verdampfereintritt.

2.2.2 Bauteilvermessung Wärmeübertrager

Bei der Vermessung von Wärmeübertragern wurde neben der Bewertung der thermischen Effizienz und Bewertung der Kältemittelnutzung (vgl. Abschnitt 2.2.1 und Abbildung 7) sowohl die Kältemittelverteilung auf die unterschiedlichen Plattenzwischenräume als auch der Zustand des Kältemittels in den angefahrenen Betriebspunkten in Abhängigkeit der Kältemittelfüllmenge bewertet. Letzteres wurde mit der Aufnahme und Auswertung von Infrarot Bildern durchgeführt.

2.2.2.1 Kältemittelmengenbestimmung

Für die Bestimmung der Kältemittelmenge wurde der Kältekreis mittels schnell schaltender Ventile, wie in Abbildung 7 dargestellt, segmentiert.

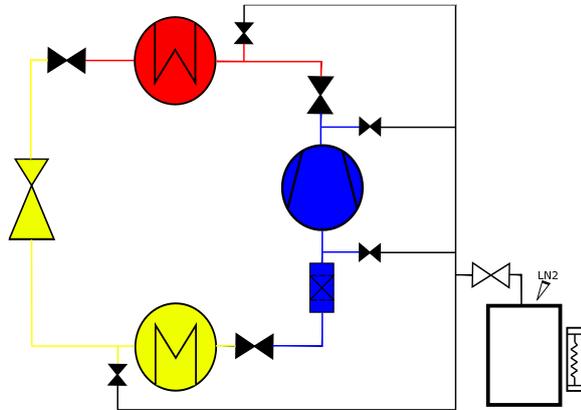


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Bestimmung der Kältemittelmenge je Bauteil im Kältekreis.

Während eines stabilen Betriebspunktes wurden die Ventile geschlossen. Das Kältemittel war in dem jeweiligen Segment eingeschlossen. Segment für Segment wird das Kältemittel mittels einer Stickstofffalle abgezogen und gewogen. Die Ergebnisse sind in einer beispielhaften Wiederholungsmessung in Abbildung 8 dargestellt. Die Messung zeigt, dass das Verfahren geeignet ist, um die Kältemittelfüllmenge je Bauteil zu bestimmen, da mir einer Ausnahme (Messung 3) das Kältemittel Größtenteils zurückgewonnen werden konnte, welches zu Beginn in die Anlage gefüllt wurde.

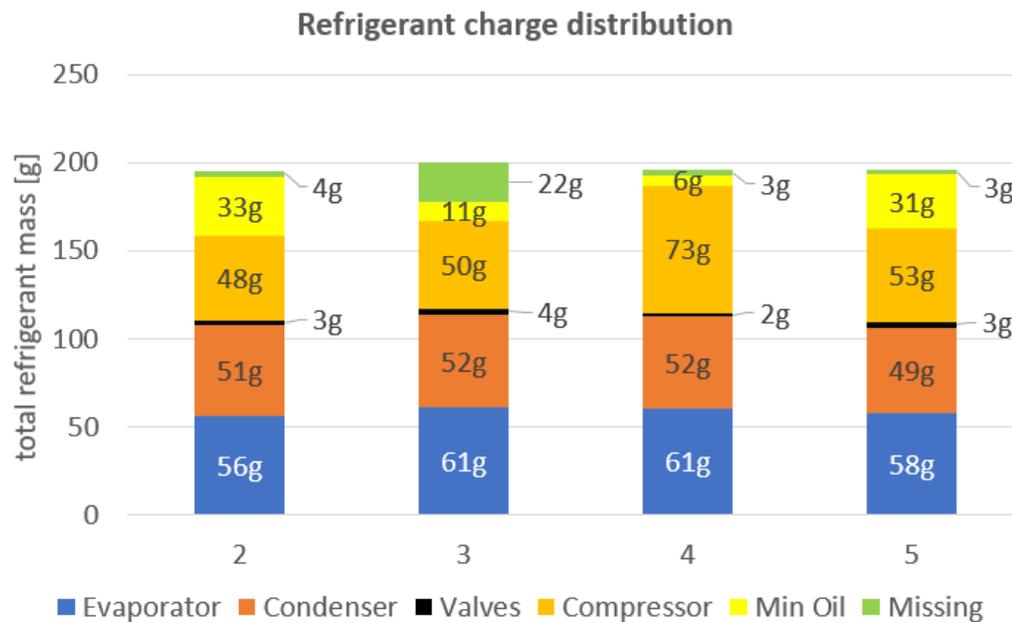


Abbildung 8: Ergebnisse einer Kältemittelfüllmengenbestimmung nach Bauteilen im Kältekreis.

In Abbildung 9 ist eine Kältemittelfüllmengenbestimmung nach den fünf Betriebspunkten zur SCOP-Bestimmung dargestellt. Eine Verringerung der Senkentemperatur (Betriebspunkt 5) führt zu einem erhöhten Anteil an Propan im Öl, was auf eine höhere Absorption des Kältemittels im Öl zurückzuführen ist. In dieser Messung wurde ein Verdichter mit Ölsumpf auf der Hochdruckseite verwendet. Der Verflüssiger enthält mit fallenden Senkentemperaturen einen geringeren Anteil Kältemittel auf Grund der geringen Dichte des Kältemittels in den entsprechenden Betriebspunkten.

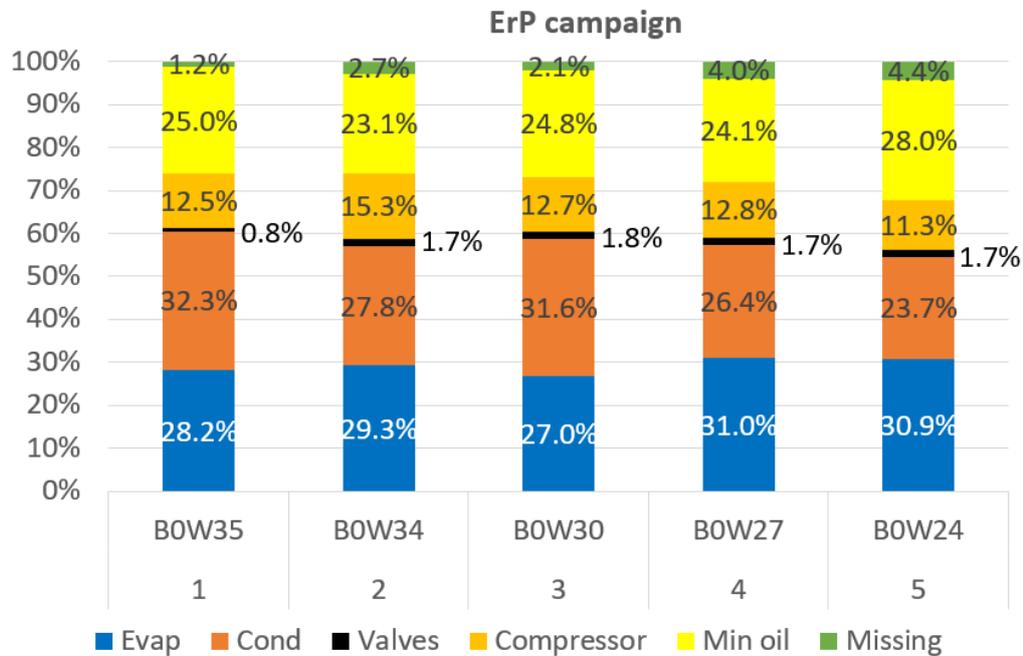


Abbildung 9: Ergebnisse einer Kältemittelfüllmengenbestimmung nach ErP Punkten mit einer Gesamtfüllmenge von 195 g R290.

Parallel zu den Messungen wurden Simulationen in der Softwareumgebung IMST-ART durchgeführt, um die Kältemittelmenge zu bestimmen. Das Ergebnis der Simulation an unterschiedlichen Betriebspunkten ist in Abbildung 10 dargestellt. Die orangenen Balken geben die Kältemittelfüllmenge aus den experimentellen Untersuchungen an. Die blauen bzw. die grünen Balken geben zwei Optimierungsstufen der Simulationsergebnisse an. Mit dem ersten Simulationsansatz (grüne Balken) war eine adäquate Abschätzung der Kältemittelfüllmenge im Verdampfer nicht möglich. Erst die Optimierung der Simulation führte zu Ergebnissen, die den Messergebnissen nahekommen. Die größten Verbesserungen wurden dabei im Bereich der detaillierten Berücksichtigung von Verteil- und Sammelkanälen im Plattenwärmeübertrager erzielt.

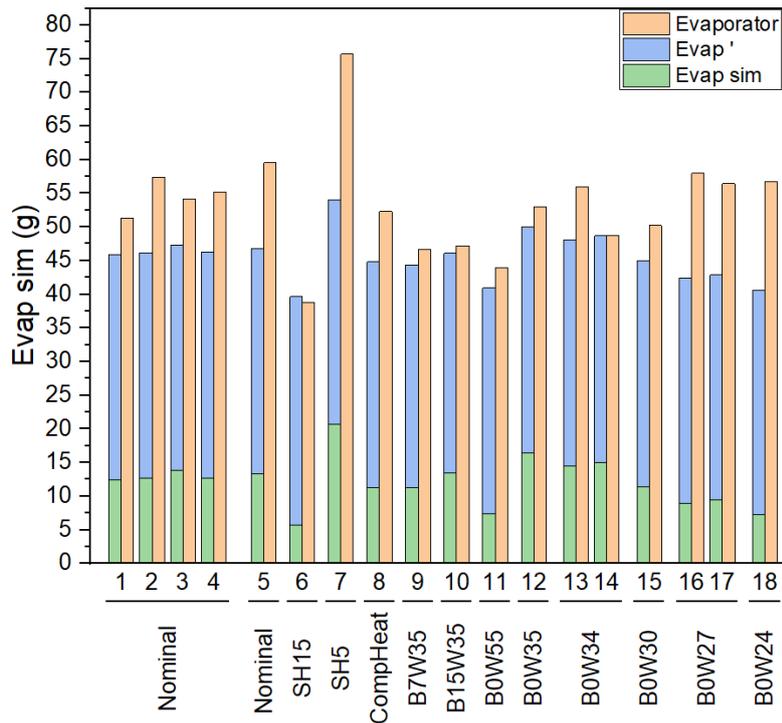


Abbildung 10: Vergleich der Kältemittelmengen je nach Betriebspunkt zwischen Simulation und Experiment für einen Verdampfer.

2.2.2.2 Infrarotaufnahmen Wärmeübertrager

Für die Infrarotaufnahmen wurde eine Infrarotkamera orthogonal zur Ein- und Ausströmrichtung des Kältemittels in und aus dem Plattenwärmeübertrager aufgestellt (vgl. Abbildung 11). Die Kamera wurde so positioniert, dass sich die Kältemittelleitungen näher zur Kamera befinden als die Hydraulikleitungen.

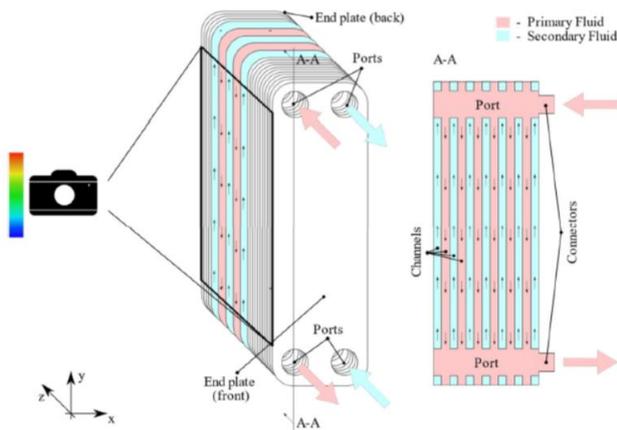


Abbildung 11: Schematischer Aufbau Infrarotaufnahmen¹.

¹ Torsten Will, Lena Schnabel, and Jürgen Köhler: Detailed Thermal Evaluation of Brazed Plate Heat Exchanger Using Infrared Thermography (2023). DOI: 10.1002/cite.202200215

In Abbildung 12 ist ein Wärmepumpenteststand für Sole-Wasser-Geräte zu sehen. Der Verflüssiger und der Verdampfer sind mit isolierten Boxen ausgestattet, in denen sich die Infrarotkameras befinden. Durch die Isolierung können Umwelteinflüsse reduziert werden. Dadurch ergeben sich qualitativ hochwertigere Bilder. Die Isolierte Box für den Verdampfer wurde möglichst luftdicht gebaut. Zu Beginn jeder Messung wurde Sorptionsmaterial mit in die Box gelegt, um die Luftfeuchtigkeit zu binden. Ohne dieses Vorgehen würde die Luftfeuchtigkeit am Verdampfer kondensieren und es wären keine Infrarotbilder auf Grund zu großer Spiegelung mehr möglich. Zusätzlich wurden die Wärmeübertrager für geringere Reflektionen auf der Oberfläche weiß angesprüht (siehe auch Abbildung 13).

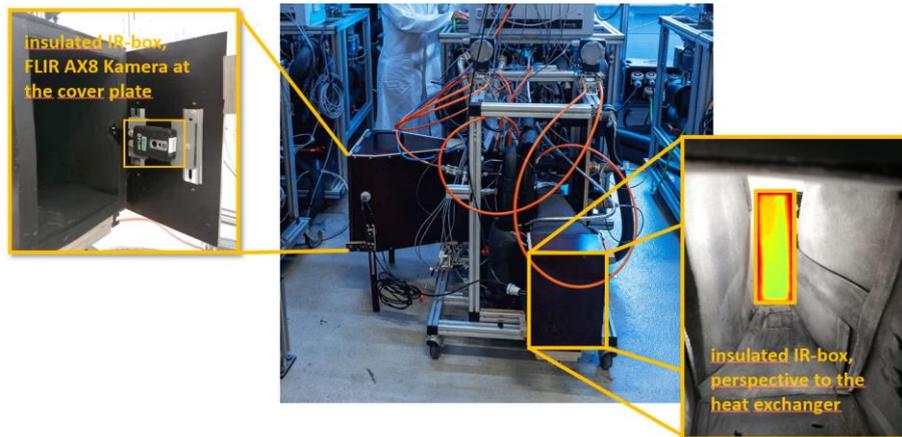


Abbildung 12: Wärmeübertragervermessungen im Wärmepumpensystem.

In Abbildung 13 wird im Vergleich die Messung von Wärmeübertragern am Wärmeübertragerteststand gezeigt. Der Verflüssiger (auch vergrößert im roten Kreis) ist oben eingebaut und der Verdampfer unten. Beide Wärmeübertrager können parallel vermessen werden. Für eine bessere Reflektion wurden die Wärmeübertrager weiß angesprüht.

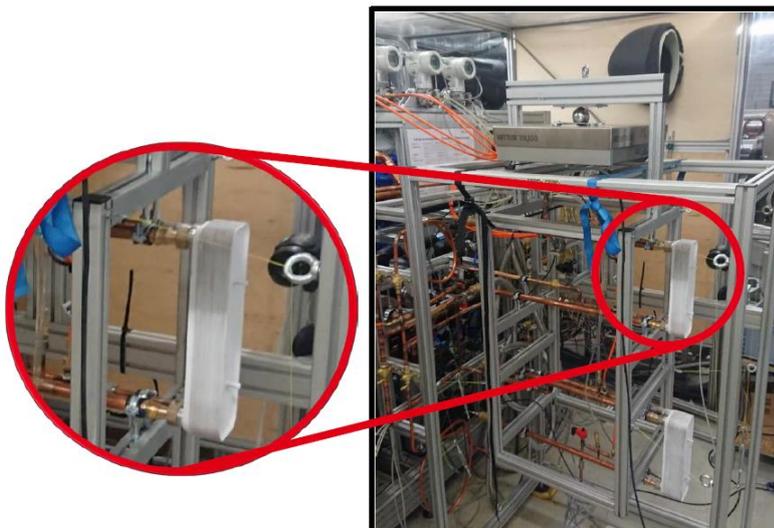


Abbildung 13: Wärmeübertragerteststand mit Verflüssiger und Verdampfer.

Abbildung 14 zeigt einen Verflüssiger (oben) und einen Verdampfer (unten) beim gleichen Betriebspunkt, aber bei unterschiedlichen Kältemittelfüllmengen. Zwischen den beiden Bilderreihen ist die Kältemittelfüllmenge sowie deren Bezeichnung (A, C, X, D) dargestellt. Dieselben Kältemittelfüllmengen sowie Bezeichnungen finden sich in Abbildung 15 (Temperaturverläufe des Verflüssigers bei verschiedenen Kältemittelfüllmengen und die Darstellung derselben Messung im log(p)-h-Diagramm) wieder.

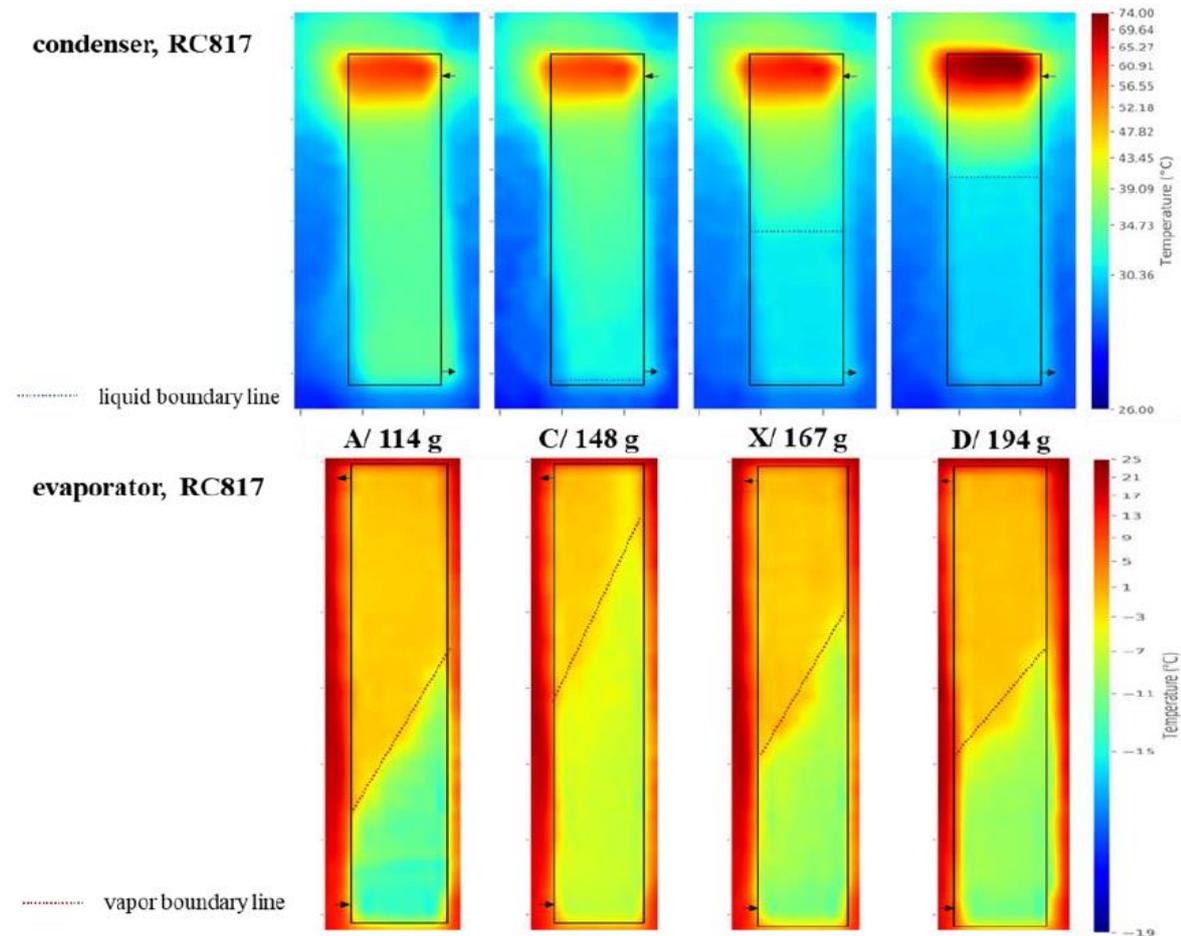


Abbildung 14: Darstellung der Infrarotaufnahmen von zwei Wärmeübertragern. Oben: Verflüssiger. Unten: Verdampfer.

In Abbildung 14 wird mit den gestrichelten Linien die Änderung zwischen dem Zweiphasengebiet und dem Einphasengebiet (komplett flüssig bzw. komplett gasförmig) dargestellt. Im Folgenden werden die einzelnen Füllmengenmessungen mit Verweis auf die Abbildung 14 und die Abbildung 15 beschrieben.

Punkt A (114 g R290): Das System ist unterfüllt: Es existiert noch keine Unterkühlung (keine gestrichelte Linie im Verflüssiger). Der Verdampfer zeigt eine deutlich niedrigere Temperatur (türkise Farbe) als in den anderen Punkten (das System muss auf einen niedrigeren Druck (=Temperatur) entspannen, um genügend Wärmemenge aus dem Verdampfer zu ziehen). Es ist mit einer sehr schlechten Effizienz zu rechnen

Punkt C (148 g R290): Das System befindet sich in der minimalen optimalen Füllmenge. Am Austritt des Verflüssigers staut sich flüssiges Kältemittel vom Expansionsventil zurück. Das Expansionsventil ist komplett flüssig beaufschlagt. Der Pinch-Point zur Wasserseite ist minimal. Am Verdampfereintritt sind leicht höhere Temperaturen zu beobachten. Es ist mit der größten Effizienz zu rechnen.

Punkt X (167 g R290): Das System befindet sich in einem überfüllten Zustand. Der halbe Verflüssiger steht voll mit flüssigem Kältemittel. Es steht weniger Wärmeübertragerfläche zur Verfügung. Die Kondensationstemperatur steigt. Der Pinch-Point vergrößert sich. Die Verdampferbedingungen sind ähnlich zum vorherigen Punkt. Auf Grund des Verflüssigers ist mit schlechteren Effizienzen zu rechnen.

Punkt D (194 g R290): Das System befindet sich in einem deutlich überfüllten Zustand. Der Flüssigkeitsstand im Verflüssiger ist noch mal gestiegen. Die Wärmeübertragerfläche wird noch mal kleiner. Die Kondensationstemperatur (siehe log(p)-h-Diagramm) und die Heißgastemperatur steigen deutlich an (dunkelroter Bereich am Verflüssigereintritt). Der Pinch-Point ist weiter weg von der Wasserseite. Die Verdampferbedingungen sind ähnlich zum vorherigen. Auf Grund des Verflüssigers ist mit schlechteren Effizienzen zu rechnen.

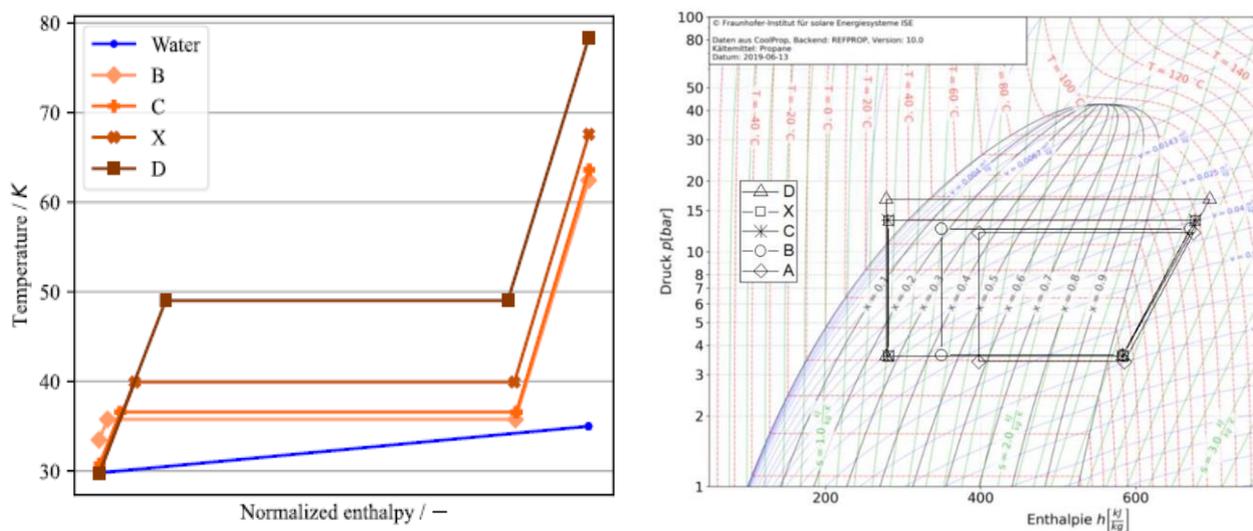


Abbildung 15: Links: Vergleich des Verlaufes der Verflüssigertemperaturen des gleichen Betriebspunktes bei verschiedenen Kältemittelfüllmengen. Rechts: Darstellung der Messungen im log(p)-h-Diagramm

Neben der Zustandsbeurteilung von Kältekreisen mittels Infrarotbilder kann unter anderem auch auf die Fehlverteilung des Kältemittels in Wärmeübertragern geschlossen werden. Auf Grund von inhomogener Temperaturverteilung des Infrarotbildes (= Oberflächentemperatur des Messobjektes), kann auf eine Fehlverteilung geschlossen werden. Ein schematischer Vergleich einer schlechten (links) und einer guten Verteilung (Mitte) ist in Abbildung 16 dargestellt. Ebenso zeigt die Abbildung ein Infrarotbild mit einer inhomogenen Verteilung (rechts). Eine homogene gute Verteilung des Kältemittels bewirkt eine optimale Ausnutzung der Wärmeübertragerfläche und führt so zu guter Effizienz und kleineren Bauteilen. Schlechte Kältemittelverteilungen treten meist bei Verdampfern auf, da dort das Kältemittel in einem zweiphasigen Aggregatzustand in den

Verdampfer eintritt. Auf Grund der unterschiedlichen Dichten der flüssigen und der gasförmigen Phase kann es leichter zu Ungleichmäßigkeiten führen.

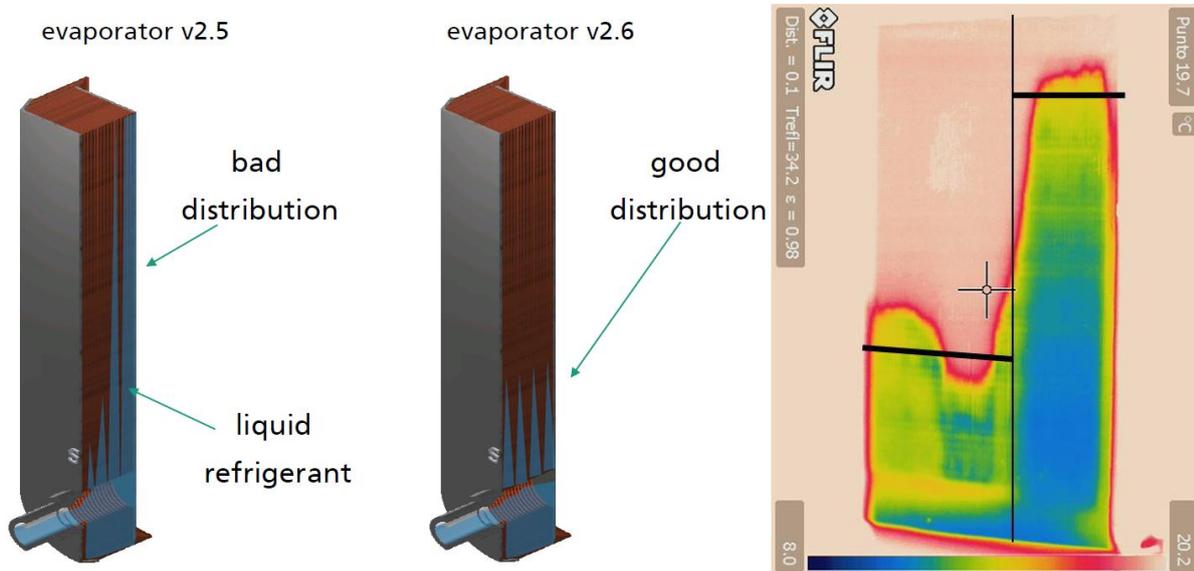


Abbildung 16: Links: Schematische Kältemittelverteilung im Plattenwärmeübertrager. Rechts: Infrarotbild einer inhomogenen Verteilung.

2.2.2.3 Zwischenwärmeübertrager

Im Rahmen des Projektes wurde der Effekt eines internen Wärmeübertragers auf die Füllmenge und die Effizienz untersucht. Der Wärmeübertrager ist von der Firma Danfoss GmbH und ist in Abbildung 17 zu sehen.

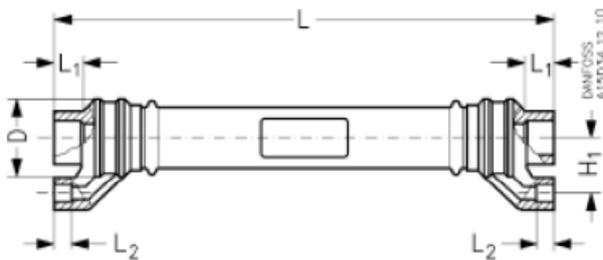


Abbildung 17: Interner Wärmeübertrager in Rohr-in-Rohr Bauweise¹

¹ 19.02.2024, Danfoss GmbH, Interner Wärmetauscher Typ HE, <https://assets.danfoss.com/documents/latest/247537/A1124486417614de-001201.pdf>

In Abbildung 18 ist ein log(p)-h-Diagramm der Messungen mit diesem Wärmeübertrager dargestellt. Es wird der theoretische Effekt der zusätzlichen Überhitzung von Punkt 1*’ zu 1’ sowie die zusätzliche Unterkühlung von 3*’ zu 3’ abgebildet.

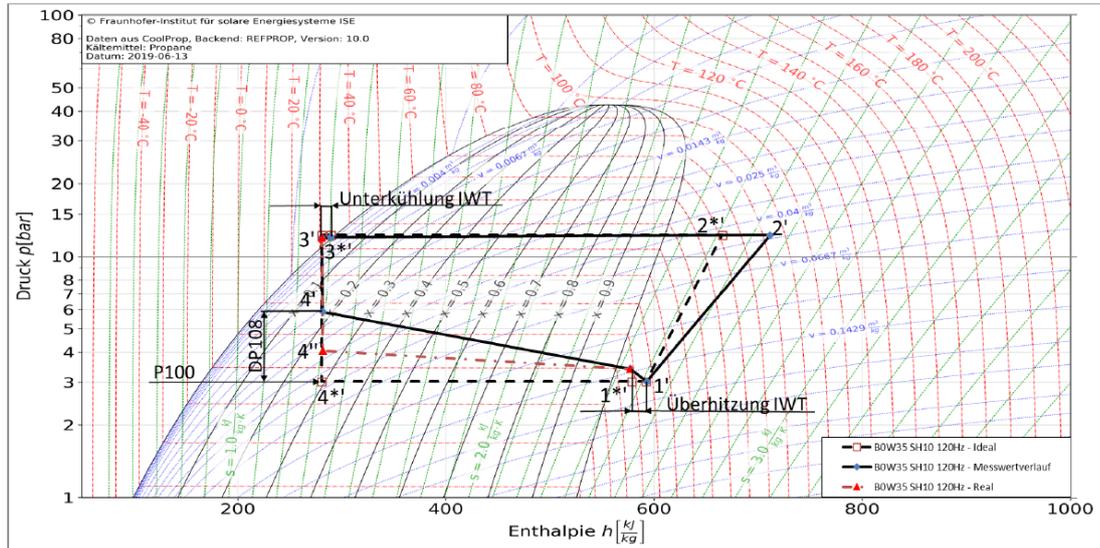


Abbildung 18: Übertragene Enthalpiemengen des internen Wärmeübertragers im log(p)-h-Diagramm.

Der Kältekreis inklusive internem Wärmeübertrager wurde mit einem Referenzsystem ohne internen Wärmeübertrager verglichen. Der Leistungs- bzw. COP-Zugewinn sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 aufgelistet und zeigen den unterschiedlichen Effekt bei unterschiedlichen Betriebspunkten.

Tabelle 1: COPs der Kältekreises mit und ohne internen Wärmeübertrager an verschiedenen Betriebspunkten.

	COP IWT [-]	COP Ref. [-]	Zuwachs [%]
BOW34F108SH10	3.49	3.36	3.9
BOW27F54SH10	4.20	3.72	12.8
BOW24F35SH10	4.89	4.39	11.5
BOW31F89SH10	5.38	4.99	7.7
BOW30F73SH10	3.34	3.24	3.1
BOW35F120SH10	3.81	3.71	2.7

Tabelle 2: Heizleistungen der Kältekreise mit und ohne internen Wärmeübertrager an verschiedenen Betriebspunkten.

	Q Heiz IWT [kW]	Q Heiz Ref. [kW]	Zuwachs [%]
BOW34F108SH10	8.71	8.53	2.0
BOW27F54SH10	6.03	5.58	7.9
BOW24F35SH10	4.64	4.28	8.3
BOW31F89SH10	2.96	2.79	6.0
BOW30F73SH10	9.65	9.61	0.5
BOW35F120SH10	7.15	7.05	1.4

Zusammengefasst erreicht der Kältekreis leicht bessere COP-Werte. Wird daraus der SCOP bestimmt, ergibt sich eine Verbesserung von 0,34 Punkten im Vergleich zum Referenzsystem. Bezüglich der Füllmenge wurden die beiden Kreise ebenso miteinander verglichen. Das Ergebnis ist in Tabelle 3 dargestellt. Die Gesamtfüllmenge unterscheidet sich um 10 g Propan. Der Kältekreis mit internem Wärmeübertrager benötigt 10 g mehr.

Tabelle 3: Verteilung der Propanfüllmenge im Kältekreis mit und ohne internen Wärmeübertrager.

	Verdichter	Kondensator	Verdampfer	Interner Wärmeübertrager	Gesamt
Mit internem Wärmeübertrager	60,0 g	61,1 g	73,3 g	15,7 g	210 g
Referenzsystem.	86,4 g	52,3 g	61,3 g	-	200 g

Die Ergebnisse zeigen Potential zur Effizienzsteigerung und zur Füllmengenreduktion im Verdichter. Wohingegen die gestiegene Füllmenge in den Wärmeübertragern weiter untersucht werden muss. Erste Überlegungen führen dazu, dass diese Füllmengensteigerung zu einem gewissen Teil durch optimierte Wärmeübertragerauslegung reduziert werden kann. Aus den Ergebnissen werden Weiterentwicklungsmöglichkeiten innerhalb des Projektes erarbeitet.

Weitere häufig angewendete Bauformen sind Plattenwärmeübertrager. Für die Anwendung innerhalb dieses Projektes ist die Leistung auch von kleinen Plattenwärmeübertragern zu groß und die absolut benötigte Kältemittelfüllmenge für einen Plattenwärmeübertrager würde sich negativ auf die gesamte Kältemittelfüllmenge der Wärmepumpe auswirken.

2.2.2.4 Ölretention in Wärmeübertragern

Neben den oben beschriebenen Arbeiten wurden die Auswirkungen von Ölretention (Verbleib von Kältemaschinenöl im Kältekreis insbesondere in Plattenwärmeübertragern) abgeschätzt. Der Verbleib von Öl in Wärmeübertragern oder in Rohrleitungen, in Kombination mit der Ölabsorption (vgl. Abschnitt 2.2.4), wurde auf 0-2 g Propan abgeschätzt. Damit ist die Menge an Propan, die sich in dem Öl lösen kann äußerst gering und hat kaum einen Einfluss auf die Gesamtfüllmenge des Kältekreises. Gerade wenn lokale Minima reduziert werden (siehe Abschnitt 2.2.1), wird der Anteil an absorbiertem Propan im Öl in den Wärmeübertragern noch geringer. In dieser Untersuchung wurde die mögliche Beeinträchtigung der homogenen Verteilung des Kältemittels auf die unterschiedlichen Platten des Wärmeübertragers nicht betrachtet.

2.2.3 Auswahl Verdichter

Zu Beginn des Projektes wurde eine Verdichterstudie durchgeführt, bei der der Markt nach Verdichtern für das Kältemittel R290 und den Leistungsbereich 4-12 kW Heizleistung durchsucht wurde. Zum damaligen Zeitpunkt hatte noch nicht jeder Verdichterhersteller Verdichter für dieses Kältemittel qualifiziert. Aus dieser Recherche wurden die vielversprechendsten Verdichter nach den folgenden Randbedingungen ausgewählt:

- Verdichter mit einem geringen Ölvolumen sind zu bevorzugen, um die Absorption von Propan zu minimieren. Das verwendete Kältemaschinenöl soll eine geringe Absorptionsfähigkeit von Propan aufweisen.
- Verdichter mit einer hohen maximalen Drehzahl sind zu bevorzugen, um hohe Heizleistungen mit einer geringen Menge an Kältemittel zu erreichen.
- Verdichter mit einem kleinen inneren Volumen sind zu bevorzugen, um den Propananteil im Verdichter so gering wie möglich zu halten
- Verdichter mit einem Ölsumpf auf der Hochdruckseite sind zu bevorzugen, da die hohen Temperaturen Propan aus dem Ölsumpf desorbieren und der Kältekreis absolut weniger Kältemittel benötigt.

Analog zu Abschnitt 2.2.2 (Vermessung Wärmeübertrager) wurden Messungen und Simulationen für die Bestimmung der Kältemittelmenge im Verdichter durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 19 dargestellt. Die Simulationen geben einen sehr guten Anhaltspunkt für die tatsächliche Ölmenge aus den experimentellen Untersuchungen. Die Hauptkältemittelmenge im Verdichter entfällt dabei auf das gelöste Propan im Öl. Ein kleinerer Teil entfällt dabei auf die Hoch- und Niederdruckseite.

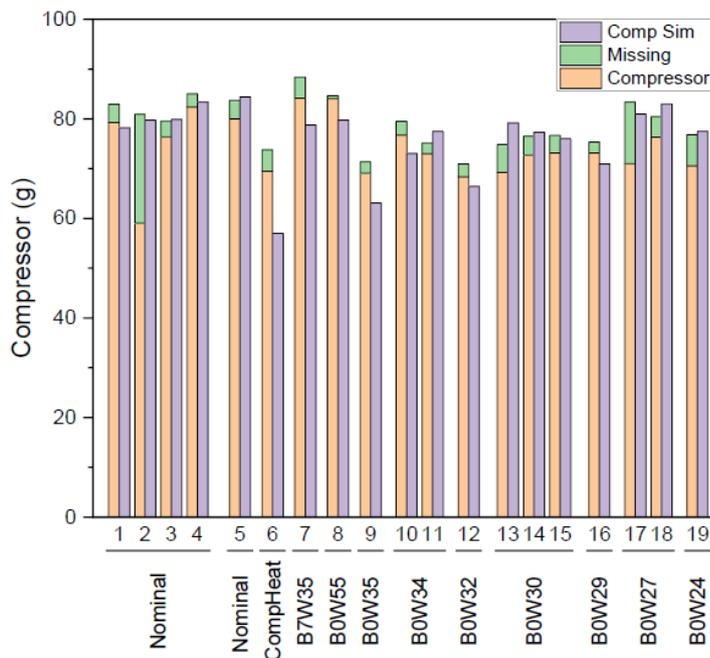


Abbildung 19: Vergleich der Kältemittelmengen je nach Betriebspunkt zwischen Simulation und Experiment für einen Verdichter.

2.2.4 Ölcharakterisierung

Für ein sehr häufig eingesetztes Kältemaschinenöl hat das Fraunhofer ISE eine detaillierte Untersuchung dieses Öls beauftragt, um die genaue Absorptionscharakteristik zu kennen. Bei den Untersuchungen wurden weitere Parameter bestimmt. Die Ergebnisse für die Absorptionscharakteristik sind in Abbildung 20 dargestellt. Abhängig von den jeweiligen Betriebszuständen fließen diese Ergebnisse direkt in Simulations- und Auslegungstools für Kältekreise ein, um eine detailliertere Kältemittelmengenberechnung durchführen zu können, was zuvor nur abschätzend möglich war.

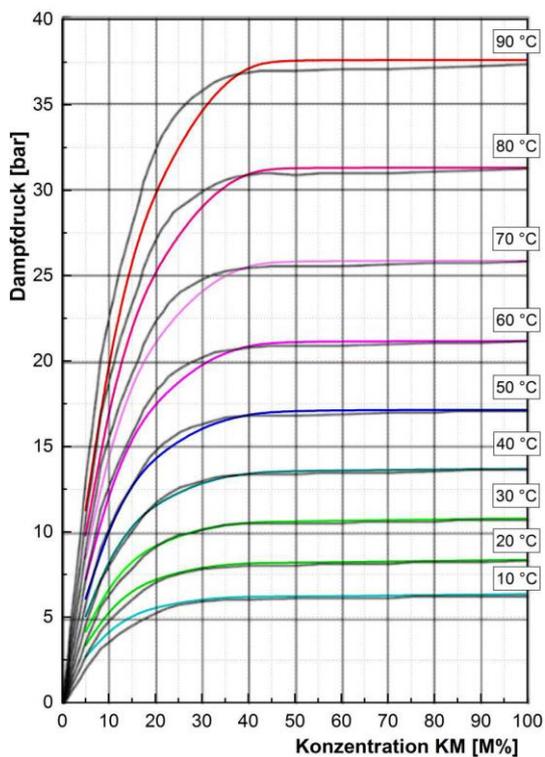


Abbildung 20: Absorptionscharakteristik eines Kältemaschinenöls in Abhängigkeit von Dampfdruck und Temperatur

2.3 AP 3 – Charakterisierung füllmengenreduzierter Komponenten im Kältekreis

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, für die drei mit dem Industriebeirat abgestimmten Ziel-Heizleistungen (4 kW, 8 kW und 12 kW Heizleistung) möglichst kältemittelleffiziente Kältekreise zu entwickeln, die gleichzeitig einen marktakzeptierten SCOP von <4,3 erreichen. Der SCOP bezieht sich auf eine Quellensoletemperatur von 0 °C und eine Senktemperatur von 24 - 35 °C (je nach SCOP-Punkt).

2.3.1 Auswahl und Zusammenstellung der Komponentenkombinationen

Zu Beginn des Projektes wurden aus dem Komponenten-Screening in Arbeitspaket 2 (vgl. 2.2) die Komponenten für die verschiedenen Ziel-Heizleistungen ausgewählt und bei den Komponentenherstellern angefragt. Die Komponentenzulieferer waren nicht Teil des Industriebeirats. Das Fraunhofer ISE arbeitete jedoch während der gesamten Laufzeit eng mit ihnen zusammen. Sie waren für den Erfolg des Projektes ebenso wichtig wie der Industriebeirat. Mit den Komponentenzulieferern wurden jeweils vor jeder Bereitstellung mögliche Änderungen und Modifikationen der Standardkomponenten besprochen, um eine höhere Füllmengeneffizienz der Einzelkomponente zu erreichen. Zum Teil kamen bei den Messungen Prototypen von Verdichtern und Wärmeübertragern zum Einsatz.

Von folgenden Zulieferern (in alphabetischer Reihenfolge) hat das Fraunhofer ISE über die Projektlaufzeit Komponenten beschafft. Auf Grund der Vielzahl der Komponentenhersteller und Komponenten, konnten am Ende nicht alle beauftragten Komponenten in der Kreuzevaluation berücksichtigt werden:

- Verdichter: Copeland Europe GmbH, GMCC Welling, Samsung Electronics GmbH, Sanden International (Europe) GmbH, Mitsubishi Electric Corporation
- Wärmeübertrager: AKG Verwaltungsgesellschaft mbH, Alfa Laval Mid Europe GmbH, Danfoss GmbH, Kelvion Holding GmbH, Multichannel AB, SWEP International AB

Aus den verfügbaren Komponenten wurden Kombinationen aus Verdichter, Verflüssiger und Verdampfer für die Vermessung innerhalb der Kreuzevaluation ausgewählt. Parallel konnten an den Testständen des Fraunhofer ISE drei Kältekreise parallel vermessen werden. Siehe dazu auch Abschnitt 2.3.2 (Planung und Inbetriebnahme von Prüfinfrastruktur). Nach der Auswertung jeder Messung wurde entschieden, welche Komponente ausgetauscht werden sollten, um den Kältekreis hinsichtlich der Kältemittelfüllmenge und der Effizienz zu optimieren oder ob eine neuen Komponentenkombination vermessen werden soll. Die Ergebnisse der Kreuzevaluation sind in Abschnitt 2.3.3 (Messkampagne zur Kreuzevaluation von Einzelkomponenten im Kältekreis) dargestellt.

2.3.1.1 Unterstützung der Komponentenauswahl mit Hilfe von Simulationsumgebungen

Um die Auswahl der Komponenten zu unterstützen, wurden parallel in den Simulationsumgebungen IMST-ART und TIL-Suite Strukturen aufgesetzt, um vorab eine Aussage über die Kältemittelmenge, Heizleistung und Effizienz abschätzen zu können.

Zu Beginn wurden die beiden Simulationsumgebungen (IMST-ART und TIL-Suite) für die Industriepartner verglichen. Zum Vergleich der beiden Simulationsumgebung hat das Fraunhofer ISE auf der DKV¹ Tagung 2022 in Magdeburg einen Vortag² gehalten und ein Manuskript eingereicht³.

Tabelle 4: Wichtigste Komponenten der analysierten Anlage

Komponente	Typ	Spezifikationen
Verdichter	Doppel-Rollkolben	275 ml Öl Hubvolumen $V_V: 28 \text{ cm}^3$
Verflüssiger	Asymmetrischer Plattenwärmeübertrager	46 Platten (Fischgräten-Prägung) 393 · 76 · 61 mm $A_{HX} = 1,28 \text{ m}^2$ $V_{HX,KM} = 0,41$
Expansionsventil	Elektrisch	
Verdampfer	Asymmetrischer Plattenwärmeübertrager	20 Platten (Dimple-Prägung) 525 · 118 · 42 mm $A_{HX} = 0,99 \text{ m}^2$ $V_{HX,KM} = 0,561$

Für den Vergleich der beiden Simulationsumgebungen IMST-ART und TIL-Suite wurden die wichtigsten Komponenten (vgl. Tabelle 4) sowie die Längen und Dimensionen der Verbindungsrohre (vgl. Tabelle 5) identisch in beide Simulationsumgebungen eingepflegt.

Im Rahmen des Vergleichs der beiden Softwarelösungen wurden die beiden Simulationstools Modelica / Dymola mit der externen Bibliothek TIL-Suite und IMST-ART im Hinblick auf die Modellierung einer füllmengenreduzierten Wärmepumpe miteinander verglichen. Der Kältekreis der Wärmepumpe wird in beiden Umgebungen abgebildet und simuliert. Die Eingangsparameter sind zuvor definierte Messpunkte, die bereits an einer realen Anlage untersucht wurden, und werden in beiden Programmen vorgegeben. So kann das vorhergesagte Verhalten der Anlage bei verschiedenen Betriebsbedingungen den realen Ergebnissen gegenübergestellt werden.

¹ Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V.

² Vergleich verschiedener Simulationswerkzeuge am Beispiel einer füllmengenreduzierten Propanwärmepumpe (Moritz BECKSCHULTE)

³ Vergleich verschiedener Simulationswerkzeuge am Beispiel einer füllmengenreduzierten Propanwärmepumpe (Moritz BECKSCHULTE, Torsten WILL, Adel KOURA, Clemens DANKWERTH, Timo METHLER, Dr.-Ing. Katharina MORAWIETZ, Dr.-Ing. Lena SCHNABEL)

Tabelle 5: Länge und Innendurchmesser der Verbindungsrohre

Leitung	Länge (mm)	Innendurchmesser (mm)
Heißgasleitung	810	10
Flüssigleitung	210	10
Einspritzleitung	210	10
Sauggasleitung	1070	16

Beide Modelle bilden das Verhalten der füllmengenreduzierten Anlage qualitativ ab. Der Verlauf der Heizleistung und der Leistungszahl der Simulationen entspricht dem Verlauf der gemessenen Werte. Bei beiden Simulationen ergibt sich eine Differenz der Füllmenge. Das IMST-ART-Modell unterschätzt die Füllmenge der Anlage beim untersuchten Betriebspunkt um etwa 110 g, die Differenz des Modelica-Modells zur realen Anlage liegt bei ca. 50 g. Der Unterschied der beiden Simulationen resultiert aus der Absorption des Propans im POE-Öl des Verdichters und des flüssigen Kältemittels im Port am Einlass des Verdampfers. Beide Effekte wurden in IMST-ART noch nicht abgebildet. Über die Projektlaufzeit bestand eine enge Kooperation mit der Universität Valencia (Herausgeber der Software IMST-ART). In Abbildung 21 wird die Verbesserung der Software IMST-ART hinsichtlich der Abschätzung der Kältemittelfüllmenge zwischen der Version 3.9 und der Version 4.1 gezeigt. Die Genauigkeit der Vorhersage hat sich stark verbessert. Je nach Kältekreis kann die exakte Kältemittelfüllmenge bis auf 12 g genau vorhergesagt werden. Das entspricht einer Ungenauigkeit von ~7 %. Die Füllmengen werden nach wie vor von den Softwareumgebungen unterschätzt.

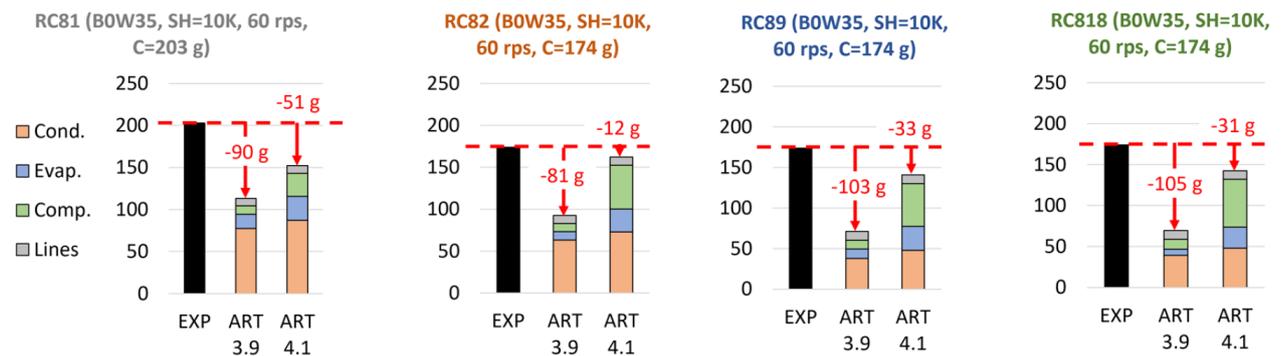


Abbildung 21: Darstellung der Verbesserungen der Softwareumgebung IMST-ART im Projektverlauf von der Version 3.9 zu der Version 4.1.

Eine wahrscheinliche Ursache für die Ungenauigkeit ist die Modellierung des Volumendampfgehalts in den Ports und Plattenzwischenräumen der Plattenwärmeübertrager beider Simulationsumgebungen. Ein geeignetes Modell für die Vorhersage des Volumendampfgehalts im Plattenwärmeübertrager ist für eine akkurate Füllmengenberechnungen wesentlich. Für die Bewertung der Anlageneffizienz sind die Verdichtereffizienzen

von besonderer Bedeutung. Das verwendete Modell aus den AHRI-Koeffizienten überschätzt die Effizienz des Verdichters vor allem bei erhöhten Überhitzungen (10 K und 15 K) und daher im unterfüllten Betrieb deutlich. Ein angepasstes Modell würde die Genauigkeit der Simulation verbessern.

Der Wärmetransport in den Plattenwärmeübertragern wird in beiden Fällen gut abgebildet. Die modellierten Sättigungstemperaturen des Kältemittels weichen um weniger als 1 K von den gemessenen Werten ab. Allgemein ist diese Differenz bei den Simulationen mit Modelica geringer als bei IMST-ART.

Zur Abbildung des Anlagenverhaltens im unterfüllten Bereich mit IMST-ART ist ein physikalisches Modell des Expansionsventils mit maximalem Öffnungsgrad nötig, das einen begrenzten Öffnungsgrad hat. So könnte die Überhitzung am Verdampferaustritt auch für unterfüllte Betriebspunkte besser abgebildet werden.

In Abbildung 22 ist ein schematischer Vergleich der beiden Simulationsumgebungen dargestellt. Mit der Simulationsumgebung IMST-ART kann die Parametrierung sehr einfach erfolgen und es werden schnelle Rechenzeiten erreicht. Die Simulationsumgebung TIL-Suite erlaubt hingegen einen hohen Detaillierungsgrad und eine Variabilität bei den Verschaltungsmöglichkeiten.

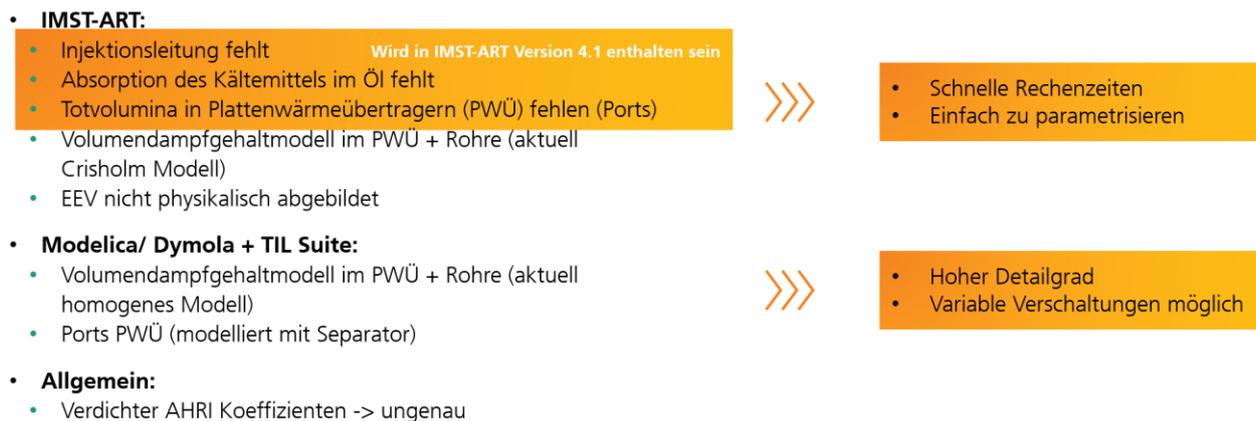


Abbildung 22: Vergleich zweier Simulationswerkzeuge für eine füllmengenreduzierten Propanwärmepumpe

2.3.2 Planung und Inbetriebnahme von Prüfinfrastruktur

Um eine Kreuzevaluation für drei Ziel-Heizleistungen in diesem Umfang messen zu können, sind parallele Messungen und ein hoher Automatisierungsgrad der Teststände notwendig. Dieser Teil des Arbeitspaketes stellt dar, welche Anschaffungen und Arbeit in der Projektlaufzeit in die Infrastruktur gesteckt worden ist.

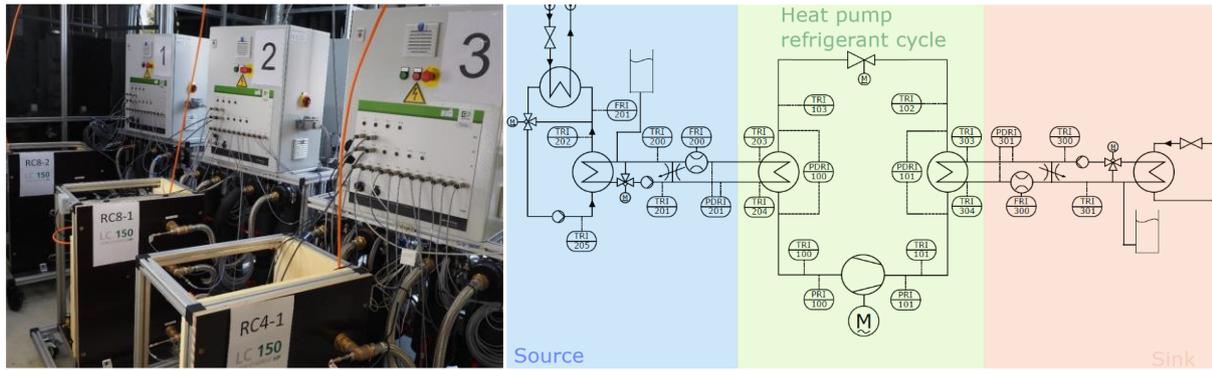


Abbildung 23: Systemprüfstände für die Durchführung der Kreuzevaluation. Links: Prüflingen im Labor. Rechts: Fließschemata des Aufbaus

Mit der Firma Ehler Prüftechnik GmbH wurden drei parallele Systemprüfstände (vgl. Abbildung 23) für Sole-Wasser-Wärmepumpen mit einer maximalen Kapazität von 20 kW Heizleistung geplant. Eine Voraussetzung für die Teststände war der Automatisierungsgrad. Eine manuelle Vermessung von einer so großen Anzahl an Prüflingen und verschiedenen Prüfpunkten wäre nicht leistbar gewesen. Sobald der Wärmepumpenprüfling angeschlossen wurde, initial durch die vom Fraunhofer ISE entwickelte Füllmengenstation (vgl. Abbildung 24) befüllt wurde, müssen alle weiteren Messschritte selbstständig ablaufen, bis die gesamte Messmatrix beendet ist.

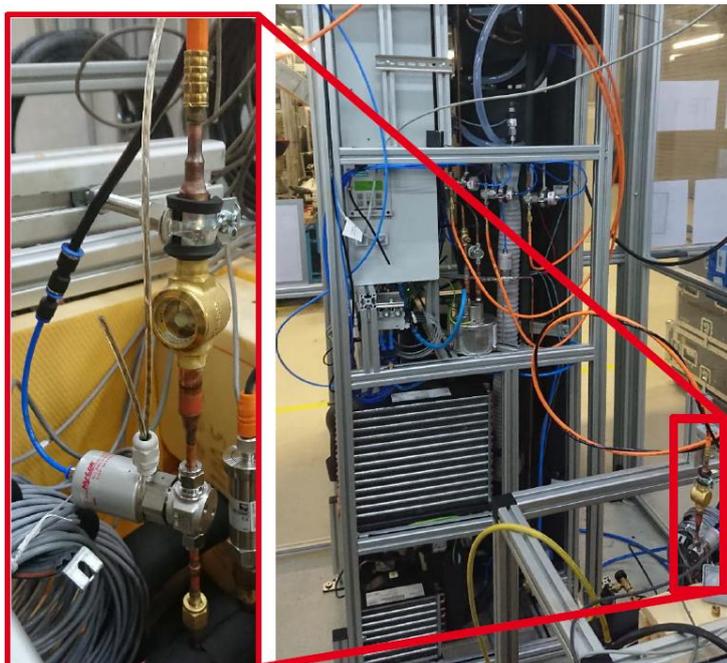


Abbildung 24: Füllmengenstation zur automatisierten Befüllung von Kältekreisen

Eine Messung innerhalb der Kreuzevaluation erfolgte nach dem folgenden Ablauf:

1. Auswahl der zu messenden Komponentenkombination und Benennung des Prüflings (z.B.: RC-8-02 = Refrigerant Circuit-8kW-Prüflingsnummer).
2. Aufbau des Kältekreises in der Werkstatt des Fraunhofer ISE inkl. Drucktest.

3. Rüsten des Kältekreises auf dem Systemprüfstand.
4. Anschluss aller Sensoren und Aktoren an der Übergabestation des Systemprüfstandes.
5. Evakuierung des Kältekreises mit der Vakuumpumpe.
6. Initialisierung des Kältekreises in der Software des Systemprüfstandes zur späteren Rückverfolgbarkeit der Messergebnisse zu dem Kältekreisprüfling.
7. Laden der Messmatrix für diesen Wärmepumpenprüfling.
8. Start der Messung.
 - a. Die Füllstation befüllt eine initiale Menge Kältemittel.
 - b. Die Messmatrix wird gestartet. (ab hier ist keine weitere Interaktion notwendig)
Die Software erkennt stationäre Betriebspunkte und schaltet nach einem stationären Betriebspunkt auf den nächsten Betriebspunkt der Messmatrix weiter. Wenn ein Betriebspunkt eine bestimmte Zeit nicht erreicht wird, greift das Abbruchkriterium und der Systemprüfstand schaltet ohne erfolgreiche Messung zum nächsten Betriebspunkte. So kann eine beliebige Anzahl an Betriebspunkten hintereinander angefahren werden.
 - c. Die Messmatrix erreicht einen Betriebspunkt mit höherer Füllmenge. Die Füllmengenstation beginnt eine definierte Kältemittelmenge in den Kältekreis zu füllen. Meist waren das 10 g Schritte. Die Messmatrix aus Punkt b) beginnt von neuem.
 - d. Alle Betriebspunkte mit allen Kältemittelfüllmengen sind angefahren und vermessen worden (oder Abbruchkriterium). Der Systemprüfstand meldet die Beendigung der Messung.
 - e. Alle Messdaten werden vom Systemprüfstand in eine SQL-Datenbank geladen. Die Messdaten werden hier zum Teil weiter prozessiert. (Zwischenergebnisse wurden alle 24h an die Datenbank übertragen.)
 - f. Die webbasierte Auswertungssoftware Grafana (es entstehen Beispiel-Auswertungsgraphen wie in Abbildung 25 und in Abbildung 26) greift auf die SQL-Datenbank zu und generiert vorgefertigte Auswertungsgraphen.
9. Die Auswertung der Graphen erfolgt wieder manuell durch die Projektmitarbeitenden.



Abbildung 25: Darstellungsbeispiel für den Kältekreis RC12-02. Heizleistung über der Kältemittelfüllmenge.



Abbildung 26: Darstellungsbeispiel für den Kältekreis RC12-02. COP über der Kältemittelfüllmenge.

Eine Messmatrix hat in der Regel die folgenden Betriebspunkte (18 Punkte) pro Füllmenge durchfahren. Meist wurden die Messungen mit einer Kältemittelfüllmenge von 100 g Propan gestartet. Die Kältekreise wurden dann in 10 g Schritten bis 200 - 250 g gefüllt (16 verschiedenen Kältemittelfüllmengen). Dadurch ergaben sich bei einem kompletten Durchlauf der Messmatrix 288 Messpunkte je Kältekreisprüfling. Eine Messmatrix bestand aus den folgenden Betriebspunkten (B=Soleeintrittstemperatur in den Verdampfer [°C]; W=Wasseraustrittstemperatur aus dem Verflüssiger [°C]; SH=Überhitzung [K]; Frequenz des Verdichters [%]):

- Variation Überhitzung: B0/W35/SH5/F40; B0/W35/SH10/F40; B0/W35/SH15/F40
- Variation Verdichterfrequenz: B0/W35/SH10/F10; B0/W35/SH10/F70; B0/W35/SH10/F100
- Variation Quelle: B-7/W35/SH10/F40; B10/W35/SH10/F40
- Variation Senke: B0/W45/SH10/F40; B0/W55/SH10/F40; B0/W65/SH10/F40; B0/W75/SH10/F40
- SCOP-Punkte: SCOP A; SCOP B; SCOP C; SCOP D; SCOP E; SCOP F

Alle Kältekreise für dieses Projekt wurden in der Werkstatt des Fraunhofer ISE selbst nach entsprechenden Anforderungen hergestellt. Für das Rüsten der Kältekreisprüflinge auf den Systemprüfständen wurden Checklisten abgearbeitet, um eine korrekte Installation und Qualität zu gewährleisten.

2.3.3 Messkampagne zur Kreuzevaluation von Einzelkomponenten im Kältekreis

Im Laufe des Projektes wurden drei Kreuzevaluation mit der Ziel-Heizleistung von ca. 4 kW, 8 kW und 12 kW Heizleistung durchgeführt. Der Fokus lag dabei nach Rücksprache mit dem Industriebeirat auf den 8 kW Heizleistungs-Demonstratoren. Die Abbildung 27 zeigt alle vermessenen Kältekreisprüflinge mit kleinen blauen Kreuzen.

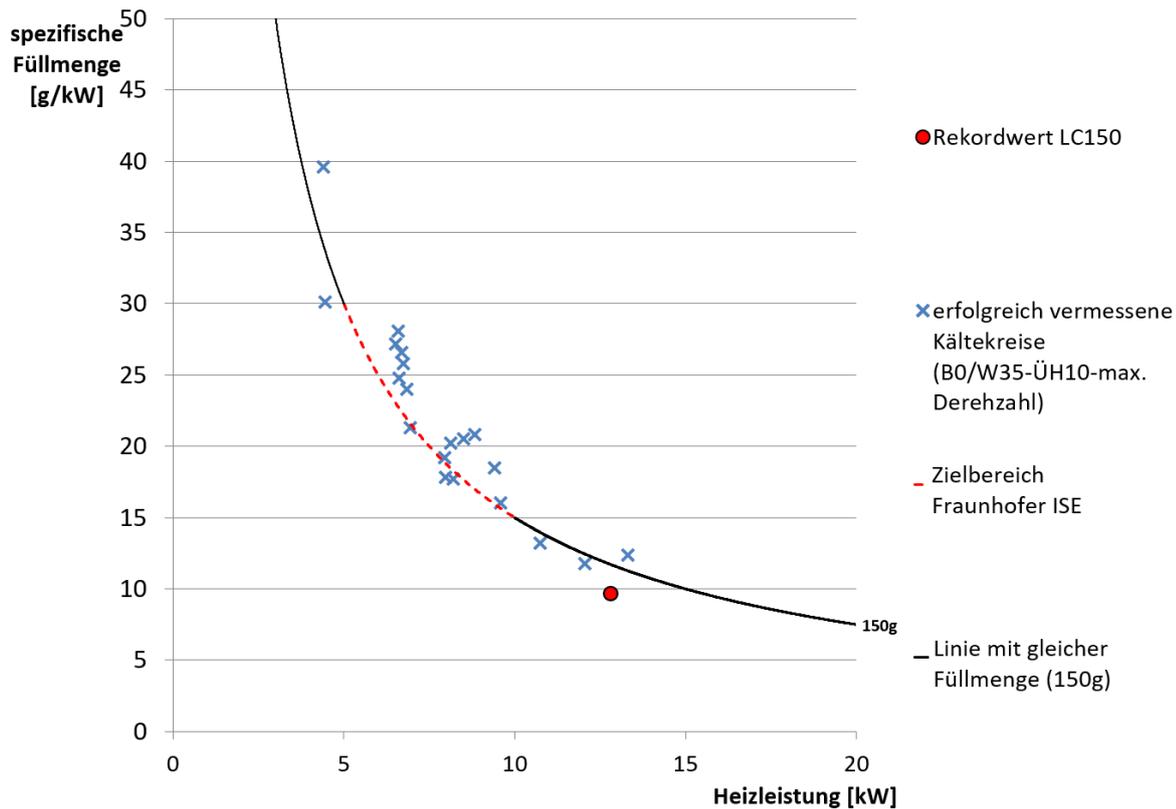


Abbildung 27: Erfolgreich vermessene Wärmepumpenprüflinge im Projekt LC150 mit Angabe der spezifischen Füllmenge aufgetragen gegenüber der Heizleistung.

Die spezifische Füllmenge (g/kW) ist dabei gegenüber der Heizleistung (kW) aufgetragen. Die schwarze durchgezogene Linie ist eine Linie mit gleicher Kältemittelfüllmenge (hier: 150 g). Kreuze, die oberhalb der Linie liegen, benötigen eine Kältemittelfüllmenge, die 150 g überschreitet. Kreuze, die unterhalb der Linie liegen, weisen eine Kältemittelfüllmenge auf, die kleiner ist als 150 g. Der Zielbereich ist in dieser Abbildung mit einer rot gestrichelten Linie dargestellt. Es sollen spezifische Heizleistungen zwischen 15 und 30 g/kW erreicht werden. Die Grafik zeigt, dass nicht alle Kreuze unterhalb der 150 g-Linie liegen, jedoch einige einen Wert kleiner 150 g erreichen. Das beste Ergebnis¹ (hier roter Kreis mit schwarzer Umrandung) wurde von einem Kältekreis mit einer Kältemittelfüllmenge von 124 g erreicht. Der Kältekreis erreicht dabei eine Heizleistung von 12,8 kW. Das entspricht einer spezifischen Füllmenge von 9,7 g/kW. Die Erwartungen wurden insbesondere mit dem Ergebnis dieses Kältekreises aber auch mit den Ergebnissen der and anderen Kältekreise übertroffen. In Abbildung 28 sind analog zu den Daten aus der obigen Abbildung die minimalen optimalen Füllmengen aller vermessenen Kältekreise dargestellt und welche Leistung bzw. welche Effizienz diese mit der minimalen optimalen Füllmenge erreichen. Links: Alle Kältekreise benötigen eine Füllmenge die kleiner als 190 g beträgt. Rechts: Alle Kältekreise erreichen einen SCOP-Wert zwischen 4 und 5. Viele der Kältekreise liegen oberhalb des Zielwerts 4,3.

¹ Pressemitteilung zu diesem Ergebnis: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2022/effizienzrekord-fuer-waermepumpen-kaeltekreis-mit-propan.html>

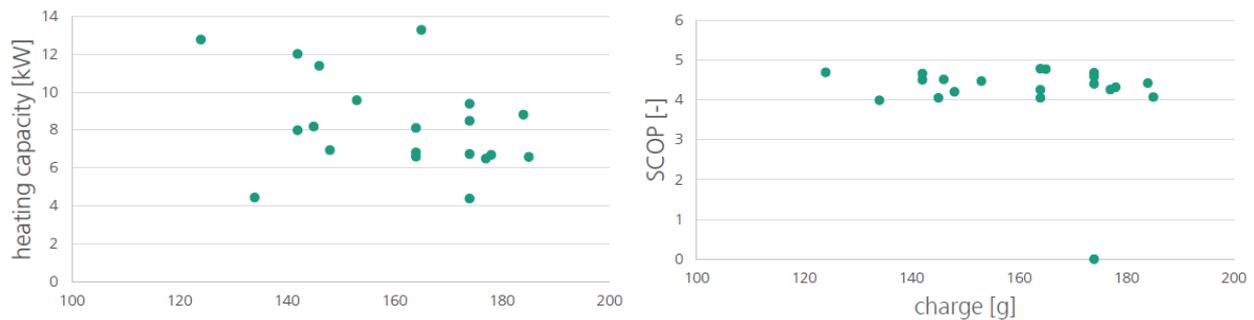


Abbildung 28: Heizleistung (links) und SCOP (rechts) aller gemessenen Kältekreise gegenüber der Kältemittelfüllmenge.

Neben der minimalen optimalen Füllmenge wurde in der Kreuzevaluation auch die thermische Performance der Kältekreise bestimmt. Mit minimalen Füllmenge wurden die SCOP-Punkte für eine Senktemperatur zwischen 24 und 35 °C, der entsprechenden Verdichterdrehzahl und einer Quelltemperatur von 0 °C angefahren. Die jeweiligen Ergebnisse wurden nach Norm gewichtet und gemittelt. Das Ergebnis ist in der Tabelle 6 in Spalte 3 zu sehen. Neben dem SCOP-Wert ist in der Tabelle ebenfalls die minimale Füllmenge in Spalte 2 dargestellt und in Spalte 5 die Heizleistung bei dem angegebenen Betriebspunkt. Spalte 6 gibt die spezifische Füllmenge des jeweiligen Kältekreises in g/kW an. Besonders herausragende Ergebnisse sind in der Tabelle **fett** markiert.

Tabelle 6: Übersicht über die gemessenen Kältekreise mit minimaler Füllmenge, SCOP und Heizleistung.

ID	min. opt. Charge [g]	SCOP @B0W24-35 [-]	SCOP @B0W44-55 [-]	heating capacity @B0W35/SH10 [kW]	spec. Charge [g/kW]
RC8-01	185	4,1	-	6,6	28,1
RC8-02	174	-	-	8,5	20,5
RC8-06	174	4,4	-	6,8	25,8
RC8-09	164	4,8	-	8,1	20,2
RC8-10	164	4,3	-	6,6	24,8
RC8-14	164	4,1	-	6,8	24,0
RC8-16	145	4,1	-	8,2	17,7
RC8-17	148	4,2	-	7,0	21,3
RC8-18	174	4,6	-	4,4	39,6
RC8-21	124	4,7	-	12,8	9,7
RC8-22	174	4,7	-	9,4	18,5
RC8-24	154	4,8	-	13,3	12,4
RC8-25	178	4,3	-	6,7	26,6
RC8-26	177	4,3	-	6,5	27,2
RC8-29	184	4,4	-	8,8	20,8
RC8-28 – 100%	142	4,5	3,1	12,0/ 10,8	11,8/ 13,2
RC8-28 – 8kW	142	4,7	3,0	8,0	17,8
RC8-30 – 100%	153	4,5	2,8	9,6/ 8,0	16,0/ 19,2
RC4-04	134	~4,0	-	4,5	30,1
RC12-03	146	4,5	-	11,1	12,8

Die Bestimmung der minimalen Kältemittelfüllmenge hat in diesem Projekt eine zentrale Rolle für die Einordnung der Kältekreise untereinander aber auch zur 150 g Zielmenge eingenommen. Für die Bestimmung der minimalen Kältemittelfüllmenge wurden verschiedene Methoden angewandt. Mit der Methode Heatmap (vgl. Tabelle 7 mit nebenstehender Legende) wurden aus der Messmatrix der Kreuzevaluation die unterschiedlichen Betriebspunkte in die erste Spalte geschrieben. Mit den Messungen aus der Kältemittelmengenvariation (erste Spalte) ist für jeden Messpunkt schnell ersichtlich, welcher Füllstatus besteht.

Tabelle 7: Heatmap zur Darstellung der minimalen Kältemittelfüllmenge in Abhängigkeit des Betriebspunktes.

Charge [g]	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
Operation																		
BOW24F35SH10	U	U	U	C	C	C	O	O	O	O	O	O	T	T	T	T	T	T
BOW27F55SH10	U	U	U	C	C	C	O	O	O	O	O	O	T	T	T	T	T	T
BOW30F73SH10	U	U	U	U	C	C	C	O	O	O	O	O	O	T	T	T	T	T
BOW32F90SH10	U	U	U	U	C	C	C	O	O	O	O	O	O	T	T	T	T	T
BOW34F108SH10	U	U	U	U	U	C	C	C	O	O	O	O	O	O	T	T	T	T
BOW35F120SH10	U	U	U	U	U	C	C	C	O	O	O	O	O	O	T	T	T	T
BOW35F60SH10	U	U	U	U	U	U	U	C	C	C	O	O	O	O	O	O	T	T
BOW45F60SH10	U	U	U	U	U	U	U	U	C	C	C	O	O	O	O	O	O	T
BOW55F60SH10	U	U	U	U	U	U	U	U	C	C	C	O	O	O	O	O	O	T
BOW65F60SH10	U	U	U	U	U	U	U	U	C	C	C	O	O	O	O	O	O	T
BOW35F120SH5	U	U	U	U	U	U	U	C	C	C	O	O	O	O	O	O	O	T
BOW35F60SH15	U	U	U	U	C	C	C	O	O	O	O	O	O	T	T	T	T	T
BOW24F35SH5	U	U	U	U	U	U	C	C	C	O	O	O	O	O	O	T	T	T
BOW27F55SH5	U	U	U	U	U	U	C	C	C	O	O	O	O	O	O	T	T	T
BOW30F73SH5	U	U	U	U	U	U	U	C	C	C	O	O	O	O	O	O	T	T
BOW32F90SH5	U	U	U	U	U	U	U	C	C	C	O	O	O	O	O	O	T	T
BOW34F108SH5	U	U	U	U	U	U	U	C	C	C	O	O	O	O	O	O	T	T
BOW35F120SH5	U	U	U	U	U	U	U	C	C	C	O	O	O	O	O	O	T	T
BOW35F60SH5	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	C	C	C	O	O	O	O	O

U	=Underfill
C	=Correct
O	=Overfill
T	=Too overfilled

Ein rot hinterlegtes „U“ gibt dabei an, dass der Messpunkt zu wenig Kältemittel besitzt. Das kann zum einen an dem Öffnungsgrad des Expansionsventils (100 % geöffnet) abgelesen werden oder dass die Überhitzung ihren Sollwert noch nicht erreicht hat (hier meist 10 K). Erst, wenn der Öffnungsgrad des Expansionsventils einen stabilen Wert erreicht (vgl. Abbildung 29; roter Strich; ca. 170 g), führt das zu einem korrekt befüllten Kältekreis. Dies wird durch ein grün hinterlegtes „C“ markiert. Je nach Kältekreisdesign gibt es einen kleinen oder größeren Bereich, in dem der Kältekreis optimal befüllt ist. In Tabelle 7 ist dieser Bereich 30 g breit. Der COP ist konstant wie in Abbildung 26 zu sehen. Wird mehr Kältemittel dem Kältekreis hinzugefügt wird der überfüllte Bereich erreicht. Dies ist mit einem gelb hinterlegtem „O“ markiert. In dem überfüllten Bereich lässt sich der Kältekreis problemlos regeln. Das zusätzlich hinzugefügte Kältemittel sammelt sich im Verflüssiger (alle Kältekreise wurden auf Grund der benötigten Kältemittelleffizienz ohne Sammler gebaut). Dadurch steht dem Verflüssiger weniger Wärmeübertragerfläche zur Verfügung. Um die gleiche Leistung zu übertragen, steigen Kondensationstemperatur und -druck an. Infolgedessen sinkt der COP (vgl. Abbildung 26). Bei weiterer Füllung von Kältemittel steigt der Hochdruck so weit an, dass der Druckschalter auslöst und einen weiteren Betrieb des Kältekreises unterbindet. Dieser Bereich ist in der Tabelle mit einem rot hinterlegtem „T“ markiert.

Die minimale optimale Füllmenge für den gezeigten Kältekreis bei einer Überhitzung von 10 K (nur Zeilen mit SH10) beträgt 180 g Propan. Für die Auswahl der minimalen optimalen Füllmenge wird der Betriebspunkt mit der höchsten minimalen optimalen Füllmenge ausgewählt, damit im späteren „realen“ Betrieb auch alle Betriebspunkte, die weniger Kältemittel benötigen, stabil angefahren werden können.

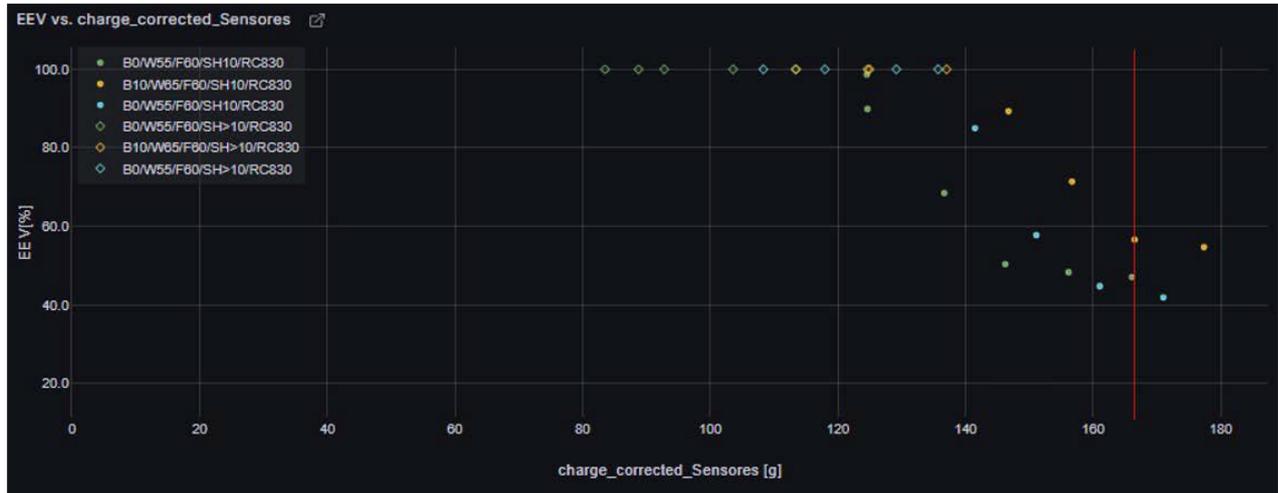


Abbildung 29: Darstellung des Öffnungsgrades des Expansionsventils in Abhängigkeit der Kältemittelfüllmenge.

Aus den in der Kreuzevaluation durchgeführten Messungen konnten allgemeine Abhängigkeiten für die Kältemittelfüllmenge, für den COP und für die Heizleistung abgeleitet werden. Die Abhängigkeiten sind in Abbildung 30 dargestellt. Als Einflussparameter wurden die Quellen- und Senkentemperatur, die Verdichterdrehzahl und die Überhitzung gewählt. Die einzelnen Pfeile in der Abbildung geben an, ob sich der Einflussfaktor steigend oder reduzierend auf Kältemittelfüllmenge, COP und Heizleistung auswirken. In der letzten Spalte der Abbildung ist der logische Zusammenhang detaillierter beschrieben, warum sich eine Änderung ergibt.

	Charge	COP	Heat cap.	Comments/ mechanic charge impact
Temp- source ↑	↑ ↑↑	↑	↑	↑ evap. pressure -> ↑ density in evap. -> ↑ charge ↑ evap. pressure -> ↓ dp compressor -> ↓ oil sump temp -> ↑ absorption in oil (strongly dependent on compressor type/ oil amount)
Temp- sink ↑	0 ↑	↓	↓	↑ cond. pressure -> ↑ density cond. -> ↑ charge ↑ cond. pressure -> ↑ dp compressor -> ↑ oil sump temp -> ↓ absorption in oil (strongly dependent on compressor type/ oil amount)
RPM ↑	↓	↓	↑↑	↑ rpm-> ↑ hot gas temp -> ↑ oil sump temp -> ↓ absorption in oil (marginal changes in other components)
SSH ↑	↓↓	↓	↓	↑ SSH -> ↓ evaporating region evap.-> ↓ avg. density in evap. -> ↓ charge

Abbildung 30: Einflüsse der Betriebsparameter auf die Kältemittelfüllmenge, den COP und die Effizienz.

2.3.4 Vertiefte Untersuchungen ausgewählter Komponentenkombinationen

Aus den Ergebnissen der Kreuzevaluation wurden die besten Komponentenkombination ausgewählt und zu zwei neuen Kältekreisen zusammengebaut. Für diese beiden Kältekreise wurden besonders viele unterschiedliche Messungen sowie Messungen mit anspruchsvollen Betriebspunkten für eine längere Zeit durchgeführt.

Zu Beginn der Langzeitmessungen war es notwendig die minimale optimale Füllmenge für alle Betriebspunkte zu bestimmen. Dazu wurde der Betriebspunkt angefahren, der die höchste Kältemittelfüllmenge benötigt.

Dieser Betriebspunkt lautet wie folgt:

- Senktemperatur = 75 °C
- Quelltemperatur = 12 °C
- Überhitzung = 5 K
- Verdichterdrehzahl = 10%

Bei diesem Betriebspunkt wird eine Massenvariation durchgeführt. Das bedeutet, dass die Kältemittelmenge schrittweise in 10 g Schritten von einer Füllmenge von ca. 100 g bis ca. 200 g erhöht wird. Anhand der Messdaten kann die minimale optimale Füllmenge bestimmt werden, indem die Reaktion des Expansionsventils (Änderung von 100 % geöffnet zu aktiver Regelung), der Überhitzungswert (Erreichen von 5 K) und die erreichte Heizleistung (die Heizleistung erreicht ein Plateau, an dem die Leistung nicht mehr zu nimmt) ausgewertet werden. Im Anschluss an die Bestimmung der minimalen optimalen Füllmenge wird dieser Kältekreis mit genau dieser Menge an Kältemittel befüllt und die Langzeit-Tests werden nach dem folgendem Messplan durchgeführt. Es handelt sich um den RC08-28 und den RC08-30. Der RC08-28 erreicht eine minimale optimale Kältefüllmenge von 142 g. Der RC08-30 eine Menge von 153 g (siehe Tabelle 6).

1. Bestimmung des SCOP bei 35 °C Senktemperatur:

- Durchführung ohne eine Frequenzbeschränkung. Der Verdichter läuft bis zu seiner maximalen Drehzahl
- Durchführung mit einer Frequenzbeschränkung. Die maximale Heizleistung wird auf 8 kW beschränkt. Dadurch läuft der Verdichter öfter in Teillast und es wird ein besserer SCOP erwartet. Ggf. wird die maximale Heizleistung noch weiter reduziert, um Druckverluste auf der Sekundärseite weiter zu reduzieren.
- Durchführung mit verschiedenen Überhitzungswerten

2. Bestimmung des SCOP bei 55 °C Senktemperatur:

- Durchführung ohne eine Frequenzbeschränkung. Der Verdichter läuft bis zu seiner maximalen Drehzahl
- Durchführung mit einer Frequenzbeschränkung. Die maximale Heizleistung wird auf 8 kW beschränkt. Dadurch läuft der Verdichter öfter in Teillast und es wird ein besserer SCOP erwartet. Ggf. wird die maximale Heizleistung noch weiter reduziert, um Druckverluste auf der Sekundärseite weiter zu reduzieren.

3. Messungen mit besonders hohen Senktemperaturen von 75 °C

4. Messungen mit verschiedenen Überhitzungswerten von 2 – 10 K

5. Messungen im gleichen Betriebspunkt mit hohen und niedrigen Frequenzen

6. Dynamische Messungen mit zunehmender und abnehmender Drehzahl des Verdichters
7. Start/ Stopp Messungen des Verdichters mit 10 Neustarts pro Stunde
8. Wiederkehrend zwischen jeder neuen Messung wird immer wieder der gleiche Referenzpunkt angefahren. So kann festgestellt werden, ob die Performance des Kältekreises auch über die Zeit konstant ist

In Abbildung 31 sind die Betriebszeiten der beiden Kältekreise RC08-28 und RC08-30 je nach Betriebspunkt nach dem obigen Messplan dargestellt.

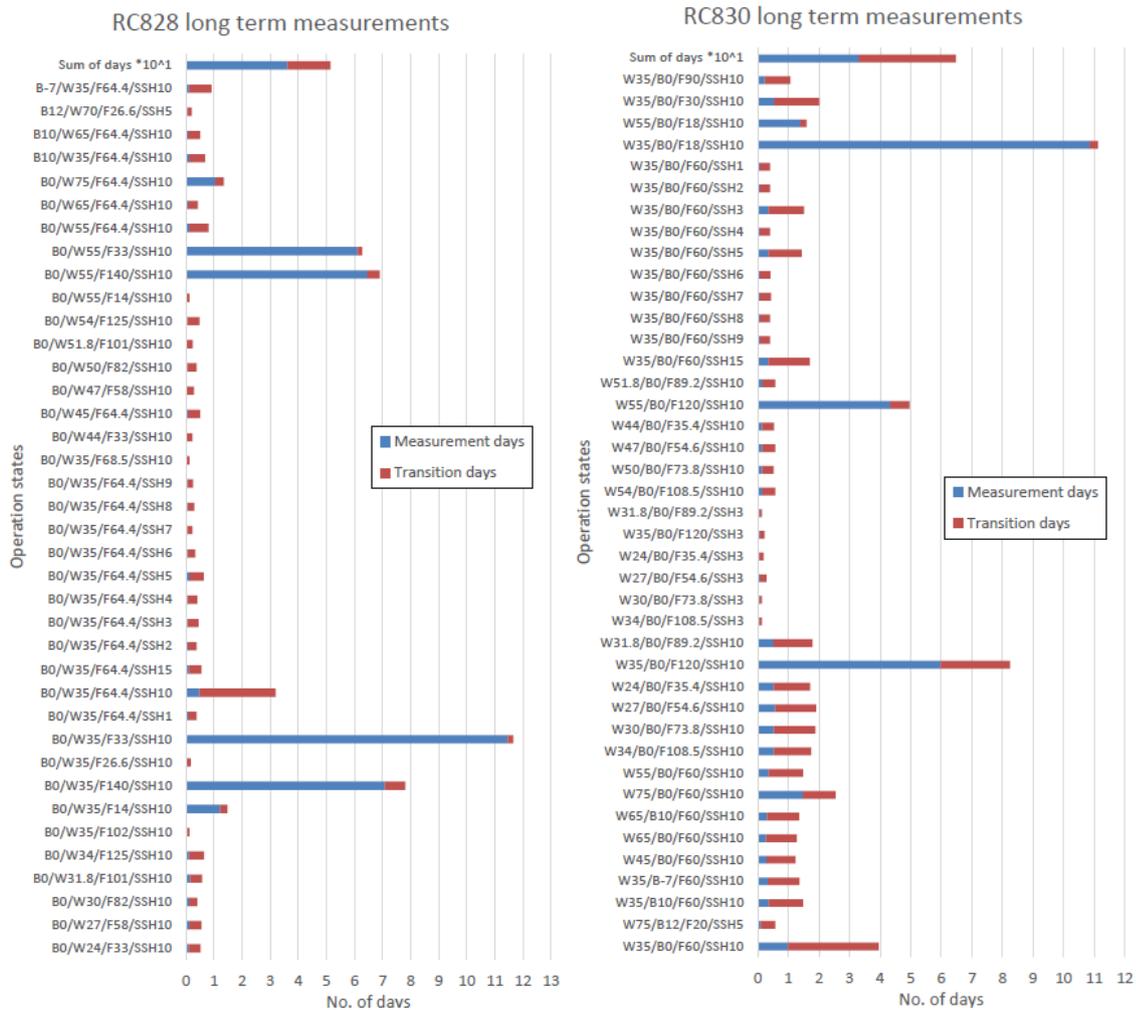


Abbildung 31: Auflistung der Betriebszeiten je Betriebspunkt für RC08-28 (links) und RC08-30 (rechts)

Im Anschluss an diese Langzeitmessungen werden Ölproben gezogen und an ein Labor zur Analyse geschickt, um mögliche Rückstände im Öl analysieren zu lassen. Des Weiteren wurden die Verdichter zu den jeweiligen Verdichterherstellern geschickt, um herauszufinden, ob die Reduktion der Ölmenge einen Einfluss auf die Abnutzung des Verdichters hatte. Die Ölproben waren unauffällig und es konnten keine besonderen Abnutzungserscheinungen nachgewiesen werden. Die Untersuchung der Verdichter selbst war zum Zeitpunkt des Berichtes noch nicht durch die Hersteller abgeschlossen.

2.4 AP 4 – Bauraum und Verrohrung

Um die Kältemittelreduktion der Kältekreise aus Arbeitspaket 3 erfolgreich durchzuführen, wurden alle Bauteile des Kältekreises (ausgenommen Verdichter und Wärmeübertrager (siehe Abschnitt 2.2)) besonders hinsichtlich ihres Potentials zur Kältemittelreduktion untersucht. Im Folgenden werden alle Bauteile startend beim Verdichter aufgeführt und bewertet.

Heißgasleitung: Bei der Dimensionierung und der Führung der Heißgasleitung haben die Vorgaben der Verdichterhersteller für die Führung des Rohres zu Schwingungsentkopplung höchste Priorität. Bei der Dimensionierung könnte der Rohrquerschnitt kleiner gewählt werden. Das wirkt sich negativ auf den COP aus und die Kältemittelsparnis ist gering, weil das Kältemittel in gasförmiger Phase vorliegt und somit eine kleine Dichte besitzt. Deswegen wurden in der Heißgasleitung keine Optimierungen vorgenommen.

Flüssigleitung: Die Flüssigleitung ist die maßgebliche Rohrleitung zur Reduktion von Kältemittel. Hier liegt das Kältemittel in flüssiger Phase vor und hat somit einen Einfluss auf die Gesamtfüllmenge. Die Dimensionierung dieser Rohrleitung wurde stets so kurz wie möglich ausgeführt. Als Rohrdurchmesser wurde meist ein 8 mm Rohr gewählt. Die Strömungsgeschwindigkeiten sind in der Flüssigleitung gering und zusätzliche Druckverluste sind tragbar, da im Anschluss das Expansionsventil ebenso Druck abbauen muss.

Filtertrockner: In vielen Kältekreisen wird in der Flüssigleitung ein Filtertrockner verbaut. In diesem Projekt wurde der Filtertrockner, entweder in die Sauggasleitung integriert oder komplett weggelassen. Der Filtertrockner in der Saugleitung spart in etwa 7 g Kältemittel bei einem 8 kW Kältekreis. Das Weglassen des Filtertrockners spart weitere 7 g Kältemittel. Ein Verzicht auf den Filtertrockner ist dann zulässig, wenn durch qualitätssichernde Maßnahmen gewährleistet wird, dass keine Partikel in den Kältekreis gelangen und dass bei der initialen Evakuierung des Kältekreises die Feuchte gut entfernt wird.

Sammler: Ein Sammler wurde in keiner der verwendeten Kältekreise verbaut. Ein Sammler trägt sehr stark zu einer höheren Kältemittelfüllmenge bei und wird primär benötigt, wenn Kältekreise unterschiedlichen Quellentemperaturen ausgesetzt sind (vgl. Abbildung 30 in Abschnitt 32) oder eine Prozessumkehr betrieben wird. In der Messmatrix wurden die Quellentemperaturen von -7 °C bis +10 °C variiert. Eine Möglichkeit zur Prozessumkehr wurde nie verbaut. In der Realität liegt die Quellenvariation von Erdreichwärmepumpen laut eines breit durchgeführten Wärmepumpenmonitorings¹ in Deutschland zwischen 2 – 12 °C. Eine Spreizung von 10 K in der Quelle ermöglicht es Kältekreise ohne einen extra Sammler zu konzipieren. Für die in diesem Projekt gemessenen unterschiedlichen Quellentemperaturen, benötigten die Kältekreise unterschiedliche Mengen an Kältemittel. Die Differenz dieser Mengen war gering, so dass sich das Kältemittel in der Flüssigleitung und im Sammelkanal des Verflüssigers befinden konnte.

Schauglas: In der Regel werden in Kältekreisen vor Expansionsventilen Schaugläser zur optischen Kontrolle der Strömungsform vorgesehen. Dieses Bauteil wurde in diesem Projekt nie verbaut, um die Kältemittelmenge zu reduzieren. Die Möglichkeit der Stellungsrückmeldung des Expansionsventils ermöglichte nicht die genaue

¹ „WP Monitor“ Feldmessung von Wärmepumpenanlagen, Danny Günther, Marek Miara, Robert Langner, Sebastian Helmling, Jeannette Wapler

Aussage über die Strömungsform, jedoch konnte bei unterschiedlichen Füllmengen genau zwischen zweiphasiger und flüssiger Vorlage vor dem Expansionsventil unterschieden werden.

Einspritzleitung: Für die Einspritzleitungen wurden die Vorgaben des Verdampferherstellers eingehalten. Weiterhing gilt, dass die Einspritzleitung so gering wie möglich gehalten werden sollte, um Kältemittel einzusparen.

Sauggasleitung: Bei der Dimensionierung und der Führung der Sauggasleitung haben die Vorgaben der Verdichterhersteller für die Führung des Rohres zu Schwingungsentkopplung höchste Priorität. Bei der Dimensionierung könnte der Rohrquerschnitt kleiner gewählt werden. Das wirkt sich negativ auf den COP aus und die Kältemittelsparnis ist gering, weil das Kältemittel in gasförmiger Phase vorliegt und somit eine kleine Dichte besitzt. Deswegen wurden in der Sauggasleitung keine Optimierungen vorgenommen.

Sensorik: In vielem Kältekreisen wird die Sensorik auf ein Minimum reduziert. Es werden in der Regel zwei Druckschalter und zwei Drucksensoren installiert. Je einer in Heiß- und einer in der Sauggasleitung. Meist sind die Sensoren mit kleinen 6 mm Röhrchen angebunden und dadurch nahezu füllmengenneutral. Die Temperatursensoren sind vorwiegend Anlegefühler und haben gar keinen Einfluss auf die Füllmenge. Bei diesen Messungen wurde zum einen hochwertige und zum anderen zusätzliche Sensorik verbaut, um die Messergebnisse in ausreichendem Detailierungsgrad vorliegen zu haben. Das heißt im Detail, dass Sensoren zum Teil mit größeren Leitungen und an Positionen (Flüssigleitung) angebunden wurden, die mit einer Zunahme der Kältemittelmenge verbunden sind.

2.5 AP 5 – Kältemittel und Sicherheit

2.5.1 Einführung

Das Arbeitspaket „Sicherheit“ bestand aus mehreren Aktivitäten während der Projektlaufzeit von LC150. Zum einen organisierte das LC150 Fraunhofer-Team Sicherheitsworkshops zu Fragen der Sicherheit von Kältemitteln sowie der Anlagensicherheit, um eine möglichst effiziente Weitergabe wichtiger Informationen für die Einführung brennbarer Kältemittel in dem Teil der Wärmepumpenbranche, die sich zur Teilnahme am LC150 Projekt entschieden hatten, effektiv zu erweitern. Andererseits wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt, die auch den Hauptzweck und Inhalt dieses Abschlussberichts darstellen. Die Auslegung des Versuchskonzepts erfolgte stets nach Worst-Case-Prinzipien.

2.5.2 Untersuchung der Propanverteilung im Raum

Die Visualisierung der Propanverteilung kann auf der Grundlage von CFD-Simulationen erfolgen. Es sind mehrere Aktivitäten für einen solchen Simulationsansatz bekannt.

Zum Beispiel hat das Fraunhofer ISE eine groß angelegte Simulationsstudie für Außenanlagen mit Propan durchgeführt, um die Sicherheitszonen um diese Anlagen auf der Basis von OpenFOAM zu analysieren.

Darüber hinaus wurden vor allem durch D. Colbourne viele modellreduzierte – teilweise dimensionslose – Ansätze entwickelt, die sich für die Betrachtungen von Propanfreisetzungen in einem Innenraum eignen. Diese sind vielfach in die Normung (IEC 60335-2-40 und die Serie an Sicherheitsnormen EN 378, Teile 1-4) geflossen.

2.5.3 Teststand und allgemeiner Aufbau

In Zusammenarbeit mit der Firma EP Ehrler Prüftechnik Engineering wurde eine Prüfkammer spezifiziert. Mit der Prüfkammer kann die Ausbreitung von Propan im Falle eines Lecks in einem sehr luftdichten (Keller)-Raum simuliert und analysiert werden. Die Messkammer ist in Abbildung 32 dargestellt. In der Messkammer selbst wurden mehrere Gassensoren im Raum installiert. Diese messen die Konzentration von Propan an den verschiedenen Stellen und erlauben so eine Aussage zu Bereichen mit hoher/ niedriger Gefährdung durch Entzündung.



Abbildung 32: Prüfkammer für Propanausbreitungstests

Eine Kernkomponente ist das Gehäuse einer Wärmepumpen-Kompaktanlage. Das Gehäuse beeinflusst bei einer Leckage am Kältekreis den Weg, wie Propan in die Umgebung gelangt. Gehäuse sind unterschiedlich dicht und haben an unterschiedlichen Stellen Öffnungen. Dies musste in einem generischen Gehäuse berücksichtigt werden. Das Gehäuse wurde so konzipiert, dass es einen sehr hohen Modifikationsgrad aufweist. Die Herausforderung bestand hier zum einen in der Abbildung des Differenzdrucks, der bei jedem Wärmepumpenhersteller unterschiedlich ist. Dieser Differenzdruckansatz wurde dahingehend modifiziert, dass eine Erhebung über "typische Querschnittsflächen", die von jedem Projektpartner hergestellt werden können, angefordert wurde. Auf dieser Grundlage wurde eine Öffnung von 16 cm² als typisch für die Toleranzen der Bodenplatte, der Seitenwände und der Oberseite der Gerätehülle ermittelt.



Abbildung 33: Prüfaufbau Level 2 (einfaches Gehäuse), mit belegtem Raum innerhalb des Gehäuses in der Prüfkammer

Der generische Gehäuseansatz erlaubt auch, dass ein kleineres Gehäuse in ein größeres Gehäuse implementiert werden kann und somit nicht nur das Kältekreislaufgehäuse (siehe Abbildung 33), sondern auch die gesamte Wärmepumpenanlage (siehe Abbildung 34) dargestellt werden kann.



Abbildung 34: Prüfaufbau Level 3 (Gehäuse im Gehäuse), mit dem gleichen freien Innenvolumen wie der Aufbau des Level 2,

Das größere Gehäuse entspricht den Einbaumaßen der "Weißen Ware" und enthält viel freies Volumen, um Pumpen und ein "4/2-Wege-Ventil" zu integrieren. Auf diese Weise können auch die Anforderungen eines umgekehrten Prozesses erfüllt werden. Typische freie Volumina wurden durch den Einbau von "Komponenten" simuliert, die den Volumenbedarf für Wärmetauscher, Verrohrung und andere Teile einer innen aufgestellten Kompaktwärmepumpe simulieren. Dies führte zu einem freien Volumen von etwa 60 % des gesamten Innenvolumens, das zu 62 % als freies Volumen realisiert wurde; siehe Tabelle 8 für Details.

Tabelle 8: Übersicht über das freie und belegte Volumen in den getesteten Geräten.

Level 2 und Level 3 Gehäuse		
Teil	Inneres Volumen	Anteil
Physikalische Einheit	[Liter]	[-]
Zu prüfendes Gerät	296,0	
Gefüllte Volumenkörper		
Holz	56,3	19%
Kompressor	2,0	1%
Dummy-HEXs	7,0	2%
Stücke einer Holzpalette	39,4	13%
Andere "Komponenten"	6,6	2%
Gefülltes Gesamtvolumen	111,3	38%
Freies Volumen		62%

Die zu prüfenden Geräte wurden vor der Wand platziert, um typische Installationsorte an Wänden widerzuspiegeln, wie z. B. in einem typischen Keller; siehe Abbildung 35.

Der Testraum musste modifiziert werden, um dem Worst-Case eines sehr kleinen Kellerraums nahe zu kommen. Er hat ein Innenvolumen von 12,5 m³ sowie eine Raumfläche von 5,7 m² (siehe Abbildung 35). Der Testraum ist mit einer Konstruktion aus Aluminiumprofilen ausgestattet, die für die Installation der Sensoren, der Schaltkästen und der mobilen Wand vorgesehen ist. Die Aluminiumprofile haben einen quadratischen Querschnitt von 40 mm.

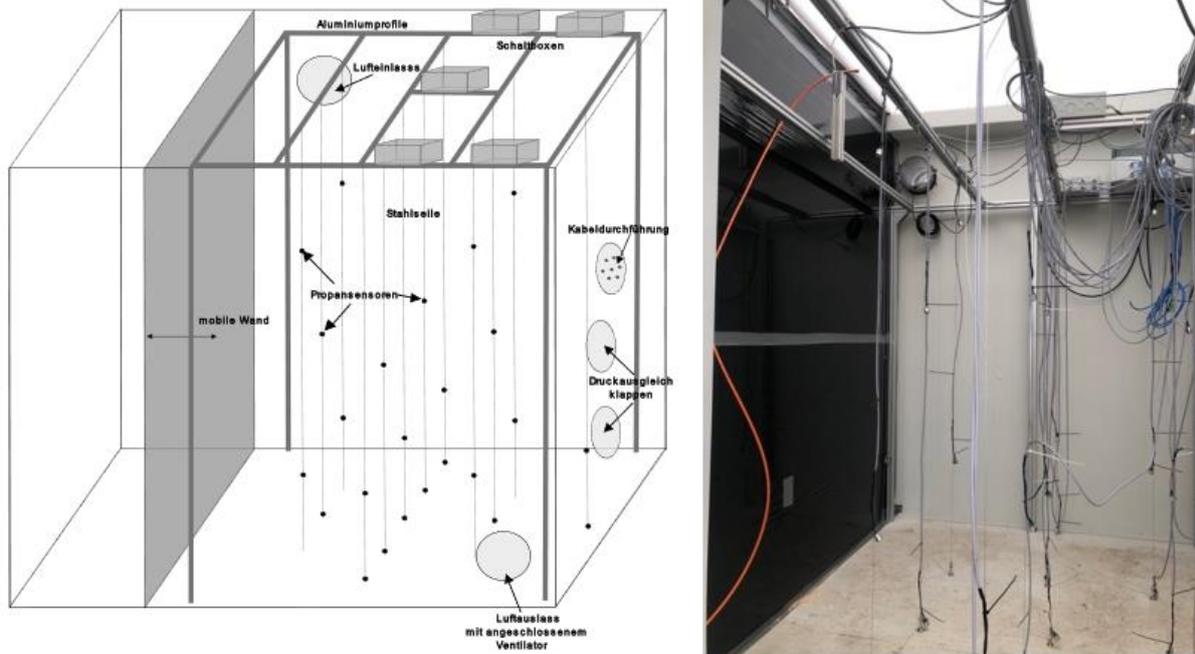


Abbildung 35: Geänderte Prüfkammer mit einer temporären Wandstruktur mit einer Raumfläche von 5,7 m².

2.5.4 Entwicklung des Versuchskonzepts

Die Tests wurden auf der Grundlage des folgenden Parameterraums für Testvarianten durchgeführt (Tabelle 9). Die Dauer eines Leckageereignisses für die Kombination aus der freigesetzten Ladung und dem geprüften Leckagemassenstrom wird als "Leckageereignisdauer" angegeben. Die Werte sind in Sekunden und in Dezimalstunden angegeben.

Tabelle 9: Parameterraum für die Freisetzungsversuche.

Position [m]	Air exchange [1/h]	Mass [g]	Mass flow [g/s]	Casing-Level	Level 1	Level 2	Level 3
				Leakage event duration [s h]	Exp.	Exp.	Exp.
0,05	0	150	0,5	300 0,1	115	186	247
0,05	0	150	0,05	3000 0,8	179	187	222
0,05	0	350	0,5	700 0,2	180	188	248
0,05	0	350	0,05	7000 1,9	182	203	224
0,05	0,1	150	0,5	300 0,1	114	204	227
0,05	0,1	150	0,05	3000 0,8	183	205	225
0,05	0,1	350	0,5	700 0,2	184	218	226
0,05	0,1	350	0,05	7000 1,9	249	219	223
0,6	0	150	0,5	300 0,1	157	201	229
0,6	0	150	0,05	3000 0,8	158	193	230
0,6	0	350	0,5	700 0,2	159	194	231
0,6	0	350	0,05	7000 1,9	177	195	232
0,6	0,1	150	0,5	300 0,1	175	196	233
0,6	0,1	150	0,05	3000 0,8	165	197	235
0,6	0,1	350	0,5	700 0,2	176	199	236
0,6	0,1	350	0,05	7000 1,9	164	200	237
2,2	0	150	0,5	300 0,1	136	210	238
2,2	0	150	0,05	3000 0,8	141	211	239
2,2	0	350	0,5	700 0,2	142	212	240
2,2	0	350	0,05	7000 1,9	143	213	241
2,2	0,1	150	0,5	300 0,1	145	214	246
2,2	0,1	150	0,05	3000 0,8	146	215	243
2,2	0,1	350	0,5	700 0,2	251	216	244
2,2	0,1	350	0,05	7000 1,9	252	217	245

Es gibt neun Szenarien von Level 1 bis Level 3 mit jeweils drei Höhen zur Freisetzung von 0,05 m, 0,60 m sowie 2,20 m (Abbildung 36). Die angestrebten Freisetzungsmengen von 150 g und 350 g würden für den gesamten Raum (12,5 m³ und eine angenommene Dichte von 1,83 kg/m³) immer zu einer idealen Mischungskonzentration von insgesamt etwa 0,65 % und 1,52 % führen.

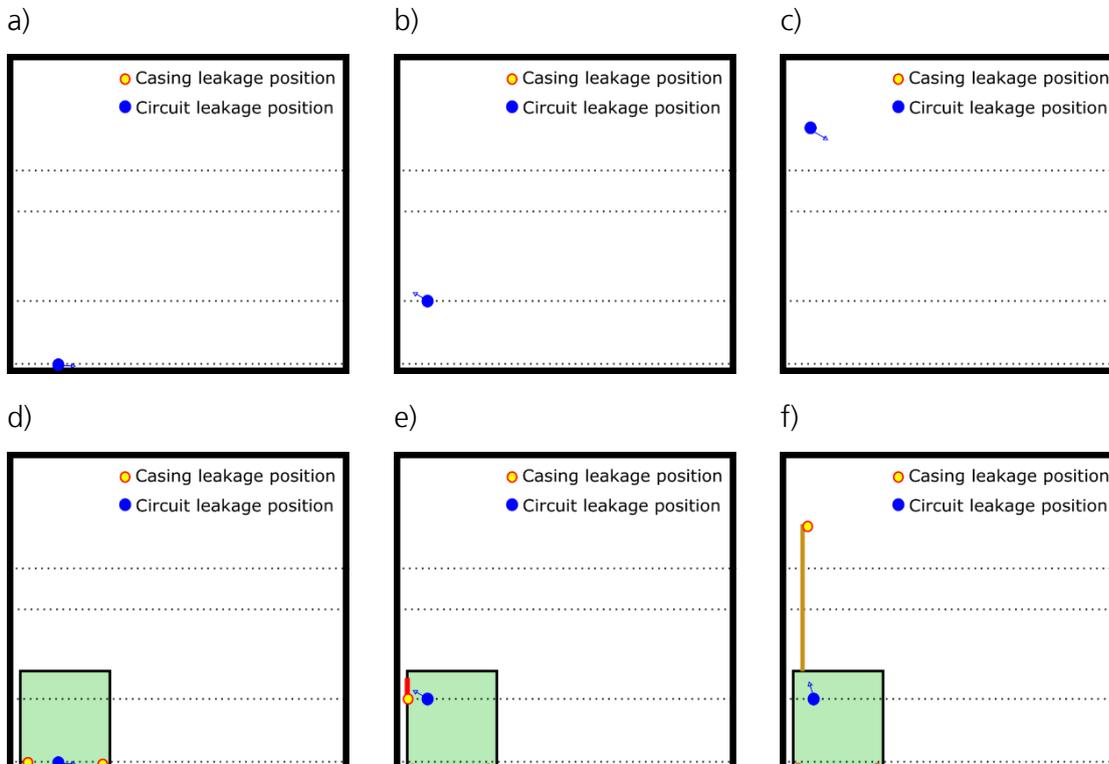
Folgende drei „Level“ werden analysiert:

- Freisetzung in den leeren Prüfraum (Level 1)
- Freisetzung in Wärmepumpe und Prüfraum (Level 2)
- Freisetzung mit Gehäuse und abgedichtetem Kältekreis (Level 3)

Die realisierten Worst-Case-Prinzipien für jeden realisierten Aufbau waren:

- die Leckage möglichst eindeutig in die Richtung einer Öffnung lenken, so dass jeder Strömungsimpuls zu einer erhöhten Gasmasse führt, die aus dem Gehäuse strömt.
- Bei mehreren Öffnungen ist diejenige zu wählen, durch die der größte Propan-Massenstrom aus dem Gerät strömt.
- Bei gleich großen Öffnungen die Leckage auf die Öffnung richten, die der Raummitte am nächsten liegt.

Die kleinen Pfeile innerhalb der Abbildung 36 zeigen an, wie diese Strömungsrichtungen realisiert wurden. Es wurden jeweils drei Testszenarien für Stufe Level 1 (freies Raumvolumen, a bis c), Stufe Level 2 (einfaches Gehäuse als kompaktes Wärmepumpen-Innengerät, d bis f) und Stufe Level 3 (Gehäuse im Gehäuse mit Kältekreislaufmodul innerhalb eines kompakten Wärmepumpengeräts, g bis i). Jeder gerichtete Austritt der Leckage folgt einem bestimmten Worst-Case-Prinzip. Auch die Größe eines Kreises als "Leckageposition" hat die Bedeutung, dass ein kleinerer oder größerer Strömungsquerschnitt realisiert wird. Das bedeutet, dass die Prüfungen der Stufen Level 2 und 3 Ausströmhöhen mit größeren bzw. kleineren Öffnungsquerschnitten als bei der kleinsten Ausströmhöhe haben, um im Falle einer Leckage eine Entleerung des Gehäuses zu Wartungszwecken zu ermöglichen, sobald ein Techniker (nach Stunden eines aufgetretenen Lecks) eintreffen könnte. Im Zeitbereich ist der Ausfluss dann recht asymmetrisch und der größte Anteil der ausgetretenen Masse verlässt das Gehäuse - wie vorgesehen - an der höhergelegenen Ausströmhöhe. Die vier Sensorschichten bei 0,02 m, 0,6 m, 1,25 m und 1,7 m sind in jeder Zeichnung als gestrichelte Linien dargestellt.



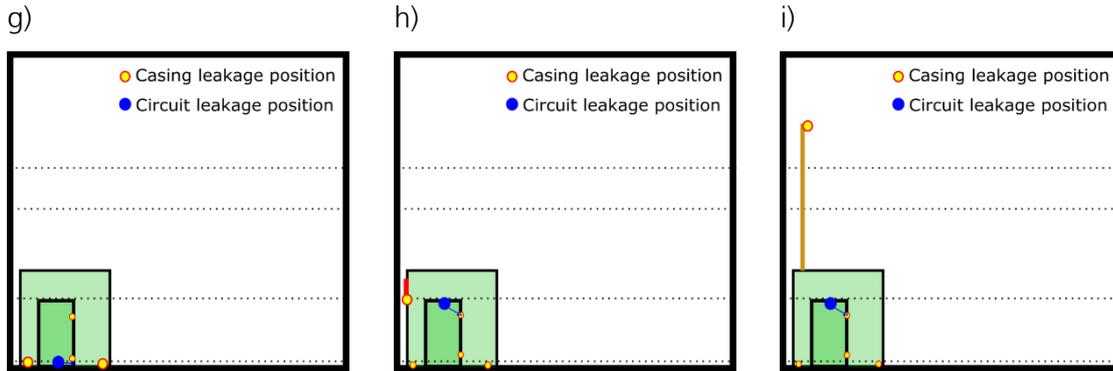


Abbildung 36: Neun Testszenarien für Stufe Level 1 bis Level 3

2.5.5 Diskussion der Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die verschiedenen Einflüsse auf die Tests erörtert. Details zu den Messungen sind im Anhang 3.1 zu finden.

2.5.5.1 Einfluss von Masse und Massenstrom

2.5.5.1.1 Freisetzung in den leeren Prüfraum (Level 1)

5 cm:

- Bei kleinen Leckagemassenströmen steigt die Propankonzentration mit der Zeit immer weniger an. Dies ist auf den geringeren Konzentrationsgradienten zwischen Luft und Propan zurückzuführen.
- Der größere Strömungsimpuls bei einem höheren Massenstrom führt zu einer schnelleren Verteilung des Kältemittels und einer geringeren Propankonzentration im Bodenbereich.

60 cm:

- In allen Versuchen führt ein erhöhter Massenstrom zu deutlich niedrigeren Propankonzentrationen in der untersten Ebene, aber zu höheren Propankonzentrationen in den höheren Ebenen. Durch den Strömungsimpuls kommt es zu einer schnelleren Ausbreitung des schweren Gases.

220 cm:

- Durch das Absinken des Propans und den damit verbundenen Kontakt mit der Raumluft kommt es zu einer besseren Durchmischung mit der Luft.
- Die Propankonzentration im Raum ist für keinen der Tests entscheidend.

2.5.5.1.2 Freisetzung in Wärmepumpe und Prüfraum (Level 2)

5 cm:

- Die Propankonzentration bei einer Leckagehöhe von 5 cm bei einem Wärmepumpengehäuse hängt stark vom Massenstrom des Kältemittels ab.

- Bei einer langsamen Freisetzung steigt die Konzentration in der Hülle nicht auf mehr als auf 37-Volumenprozent an.
- Ein schnelles Ausströmen führt zu deutlich höheren Propankonzentrationen im Gehäuse und in der Prüfkammer. Der daraus resultierende Überdruck im Gehäuse sowie der Schwergaseffekt führen zu einem schnellen Ausströmen in den Raum.

60 cm:

- Die Ausströmung aus 60 cm Höhe ist der Ausströmung aus 5 cm Höhe sehr ähnlich. Die größere Höhe trägt nicht zu einer Verringerung der Konzentrationen bei. Die Wirkung einer größeren Ausströmhöhe ist vernachlässigbar im Vergleich zu den Experimenten des Level 1.
- Die Ausströmung gegen ein Lüftungsgitter bewirkt, dass die Konzentration im Gehäuse durch die direkte Ausströmung aus dem Gehäuse sinkt.

220 cm:

- Die Ableitung aus einem Schornstein hat zur Folge, dass bei einer schnellen Ableitung ein großer Teil des Propans direkt in den Prüfraum gelangt, was den Vorteil hat, dass der Propangasstrom über eine lange Strecke verdünnt werden kann.
- Es kann nicht festgestellt werden, dass das Propan bei einer langsameren Ausströmung gut aus dem Schornstein entweichen kann, weil der Strömungsimpuls nicht stark genug ist. Dies führt zu einer höheren Propankonzentration in der Hülle im Vergleich zu Versuchen mit deutlich größerer Querschnittsfläche auf niedrigen Ausströmungshöhen. Die zusätzlichen Öffnungen, die zum Zweck der langsamen Entleerung der Hülle belassen wurden, trugen zu einem langsamen Stoffaustausch zwischen Hülle und Raum bei.
- Die Gesamtkältemittelmenge kann beim Schornsteinkonzept größer gewählt werden, als es Formeln in Sicherheitsnormen zur Bestimmung einer erlaubten Raumgröße zulassen würden. Jedoch muss der als gefahrenfrei getestete Parameterraum durch konstruktive Maßnahmen und weitere Versuche vergrößert und abgesichert werden

2.5.5.1.3 Freisetzung mit Gehäuse und abgedichtetem Kältekreis (Level 3)

5 cm:

- Der Massenstrom von 0,5 g/s sorgt für einen deutlich stärkeren Anstieg der Propankonzentration im Innenmantel als bei einer langsameren Ausströmung.
- Bei einer langsamen Freisetzung, wie in Level 2, steigt die Konzentration nicht weiter als auf 37 % an.
- Im Prüfraum führt eine schnelle Freisetzung auch zu einer höheren Konzentration in der Prüfkammer.

60 cm:

- Zwischen einer Ausströmung auf 5 cm und einer auf 60 cm gibt es keine großen Unterschiede, wenn gleiche Querschnittsflächen verwendet werden.

- Aufgrund defekter Sensoren kann die Testmatrix für diesen Versuch nicht vollständig ausgewertet werden.

220 cm:

- Durch die Leckage im Wärmepumpengehäuse in 2,2 m Höhe steigen die Konzentrationen im Gehäuse bei allen Versuchen stärker an als bei den Level 1 und Level 2 Versuchen.
- Das Propan entweicht hauptsächlich in einem großen Maß über das 2 mm große Loch in der Bodenplatte des Gehäuses und in einem geringen Maß über den Schornstein.

2.5.5.2 Einfluss des Gehäuses

5 cm:

- Aufgrund des Strömungsimpulses bei freier Ausströmung ergeben sich bei allen Experimenten mit großem Massenstrom geringere Konzentrationen in Bodennähe als bei einer Leckage durch kleinere Öffnungen in Gehäusen. Auch die Dauer bis zur vollständigen Diffusion und Überschreitung der LFL ist bei freier Ausströmung deutlich kürzer.
- Ein langsamerer Abfluss ohne Strömungshindernis führt aufgrund der Schichtung zu einer höheren Konzentration im Bodenbereich als ein Abfluss mit einem Strömungshindernis.
- Eine doppelte Einhausung verhindert in mehreren Fällen, dass sich die schwere Gaswolke in die höheren Schichten ausbreitet, so dass die Durchmischung eher diffusionsgetrieben ist. Der Strömungsimpuls nimmt in den Experimenten des Level 3 stark ab.
- Kältemittelleitungen und -komponenten im Bodenbereich können bei freiem Ausströmen zu hohen Propanansammlungen führen (Zustand des Level 1).
- Hohe Druckniveaus in Dampfkompansionskreisläufen und damit schnelle Freisetzungen im Bodenbereich sind bei Versuchen mit Verrohrung wesentlich problematischer als bei freien Ausflussbedingungen.

60 cm:

- Durch die höhere Anordnung der Leckage ergeben sich unabhängig vom Massenstrom geringere Propankonzentrationen in Bodennähe als bei einer Ableitung aus 5 cm Höhe.
- Der Abfluss innerhalb eines Wärmepumpengehäuses sorgt für höhere Propankonzentrationen am Boden oder im Raum als bei freiem Abfluss.
- Die Propankonzentration im Gehäuse der Wärmepumpe ist hoch.

220 cm:

- Mit einem freien Ausfluss in 2,2 m Höhe sind risikofreie Tests innerhalb des Prüfraums möglich. Das Risikoniveau für den Innenraum des Gehäuses bleibt jedoch über lange Zeit auf einem hohen Niveau. Die Größe der Bodenplattenöffnungen muss besser (größer) an die vorhandenen dichte- und diffusionsbedingten Prozesse in Gehäuse und Prüfkammer angepasst werden

- Im Falle einer Freisetzung in den Level 2 und 3 wird die LFL im Prüfraum bei fast allen Tests nicht überschritten.
- Bei Prüfungen mit einem Gehäuse verbleibt der größte Teil des Kältemittels im Prüfling und kann nur langsam aus ihm herausdiffundieren.
- Leckstellen in Deckenhöhe haben keinen großen Einfluss auf einen Anstieg der Propankonzentration im Raum.

2.5.5.3 Einfluss der Luftwechselrate

Ein Vergleich der Tests mit und ohne Luftwechselrate würde eine sehr umfangreiche Analyse erfordern. Hier überschneiden sich die Einflussfaktoren für die Auswertung. Zum einen ist die Beschreibung der Propanströmung mit Hilfe der Sensoren nicht möglich, da sich das Propan mit der Luft vermischt und Grenzschichten gebildet werden. Für eine detaillierte Analyse fehlen bestimmte Sensordaten. Die Abbildung 37 zeigt beispielhafte Stromlinien vereinfacht für eine projizierte Ansicht auf eine zweidimensionale Ansicht. Die Strömung könnte laminar sein, was jedoch nicht bedeutet, dass keine unterbrochenen Stromlinien möglich sind. Wirbel oder Sackgassen könnten im gesamten Strömungsfeld aufgrund von Ecken oder Bereichen unterhalb der Einlass- und Auslasspositionen der Luken auftreten, wobei nur ein geringer Massentransfer mit jeglicher Strömung zwischen den Luken stattfindet.

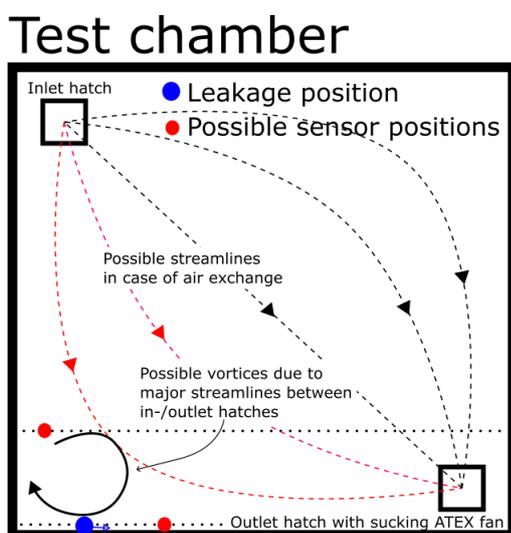


Abbildung 37: Beispielhafte Stromlinien für Ausströmversuche.

Dennoch ist eine Black-Box-Analyse möglich. Am Strömungsprofil des Propans und der Frischluft lässt sich ein Einfluss der Luftwechselrate erkennen. In Abbildung 38 sind die Versuche mit Luftwechselrate in blau dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Konzentrationswerte in den Versuchen ergibt sich ein unterschiedlicher Verlauf der Propankonzentration. Die Luftwechselrate führt jedoch in einigen Versuchen zu einer erhöhten Propankonzentration und in anderen zu einer reduzierten Propankonzentration. Die Dauer der Leckageereignisse beträgt:

Exp. 115: 0,1 h, Exp. 114: 0,1 h, Exp. 179: 0,8 h, Exp. 183: 0,8 h, Exp. 180: 0,2 h, Exp. 184: 0,2 h, Exp. 182: 1,9 h, Exp. 249: 1,9 h. Die Propankonzentration ist in % angegeben und die Zeit in Stunden aufgetragen.

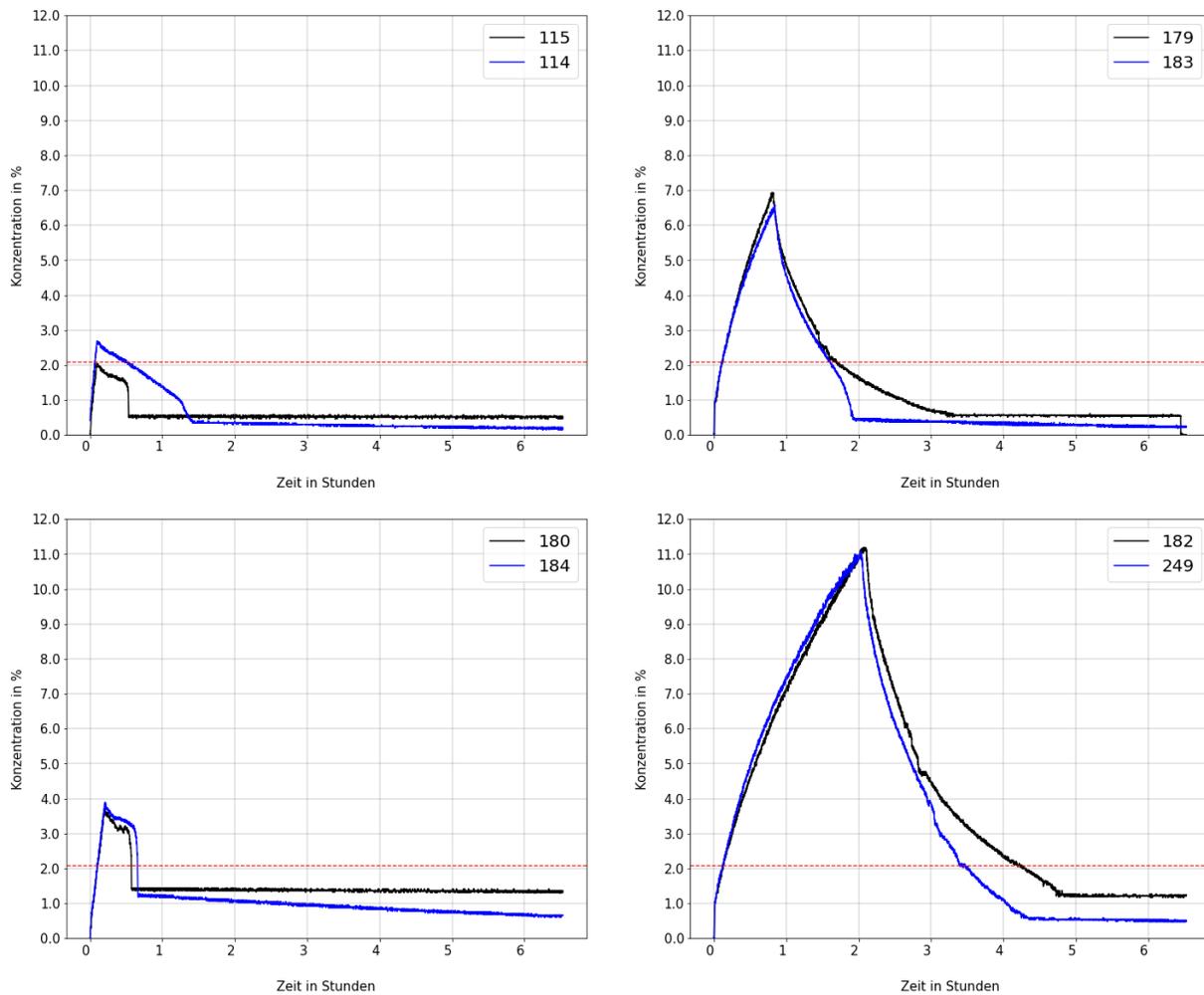


Abbildung 38: Vergleich der Versuche mit (blau) und ohne (schwarz) Luftwechselrate mit den gleichen Parametern in Level 1, Freisetzung in 5 cm Höhe.

Bei den Experimenten, bei denen das Propan vollständig im Raum verteilt wird, ist ein stetiger Konzentrationsabfall zu beobachten, der auf die Einstellung der Ventilatoren und Klappen zurückzuführen ist. Dieses Verhalten ist dargestellt in Abbildung 39. Die blauen Kurven sind mit Luftwechselrate, schwarze Kurven sind Versuche ohne Luftwechselrate. Die Dauer der Leckageereignisse sind:

Exp. 136: 0,1 h, Exp. 145: 0,1 h, Exp. 141: 0,8 h, Exp. 146: 0,8 h, Exp. 142: 0,2 h, Exp. 251: 0,2 h, Exp. 143: 1,9 h, Exp. 252: 1,9 h. Die Propankonzentration ist in % angegeben und die Zeit in Stunden aufgetragen.

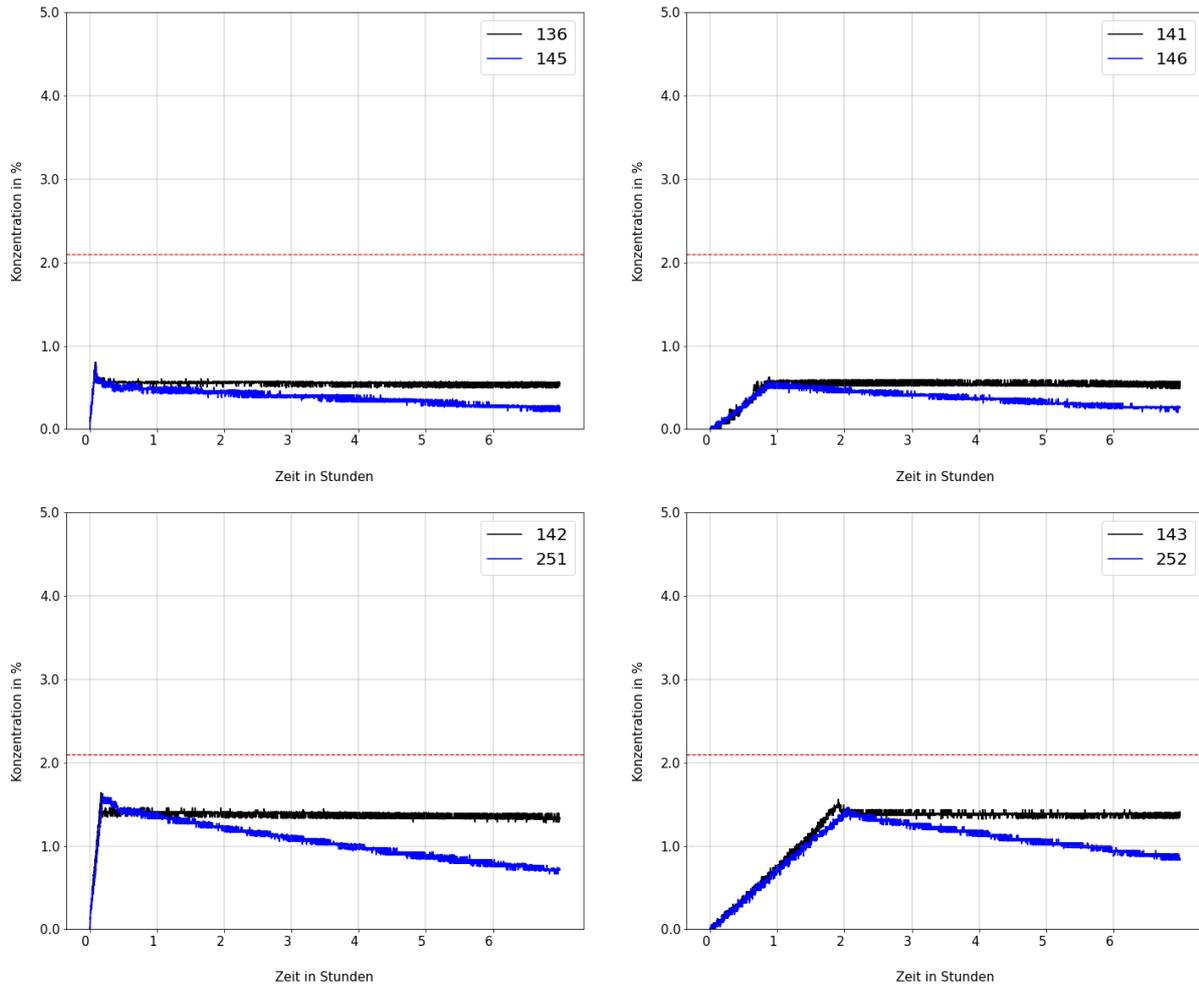


Abbildung 39: Einfluss der Luftwechselrate in Level 1, Abfluss aus 2,2 m.

2.5.6 Zusammenfassung

Die Ergebnisse für alle Tests sind in Tabelle 10 zusammengefasst, in denen Szenarien/ Ereignissen mit bzw. ohne Gefährdung festgestellt worden sind. Die Dauer der Leckageereignisse ist für jede Sensorschicht bei 0,02 m, 0,55 m, 1,25 m und 1,70 m angegeben. Die Spalte "alle" zeigt die maximale Dauer (Expositionszeit) für jedes Experiment. Dies ist nicht notwendigerweise eine Dauer, die innerhalb einer einzelnen Sensorschicht auftrat. Grün markierte Werte in der Gesamtspalte zeigen die risikofreien Ereignisse.

Unter Berücksichtigung der Parametersätze für die Tests (siehe Tabelle 9 und Tabelle 10 für den Aufbau und die Ergebnisse) konnten sowohl die Installations- als auch die Leckage-Szenario-Bedingungen identifiziert werden, bei denen das Risiko einer Überschreitung der LFL-Konzentrationswerte besteht.

Mit diesem Datensatz sind nun die Grenzen zwischen gefahrlosen und gefahrbehafteten Anlagen bekannt und können weiter genutzt werden, um sie in Abhängigkeit von konstruktiven Änderungen an den Gehäusen und dem Einsatz zusätzlicher Sicherheitsmaßnahmen zu verschieben. Es kann festgestellt werden, dass die Ausströmhöhe von 2,2 m zu den geringsten Risiken aufgrund von Verdünnungseffekten führt, die beim Abströmen des schweren Gases auf die Bodenhöhe auftreten. Dies stimmt mit den Standardbedingungen überein, die größere Raumflächen oder Kältemittelfüllungen für Geräte ermöglichen, die auf anderen Ebenen als der Bodenhöhe installiert sind.

Tabelle 10: Dauer aller Ereignisse, bei denen die LFL-Konzentrationen überschritten wurden.

Casing-Level				Level 1						Level 2						Level 3					
Position [m]	Air exchange [1/h]	Mass [g]	Mass flow [g/s]	Exp.	LFL exposure duration					Exp.	LFL exposure duration					Exp.	LFL exposure duration				
					0,02	0,55	1,25	1,7	All		0,02	0,55	1,25	1,7	All		0,02	0,55	1,25	1,7	All
0,05	0	150	0,5	115	366	0	0	0	366	186	3892	0	0	0	3892	247	4756	129	0	0	4756
0,05	0	150	0,05	179	6283	625	0	0	6283	187	2341	0	0	0	2341	222	6023	0	0	0	6023
0,05	0	350	0,5	180	1951	1176	0	0	1951	188	3078	7	0	0	3078	248	4963	0	0	0	4963
0,05	0	350	0,05	182	29063	8061	0	0	29063	203	14729	12557	0	0	14729	224	6278	0	0	0	6278
0,05	0,1	150	0,5	114	2221	1452	0	0	2221	204	1603	0	0	0	1603	227	4360	0	0	0	4360
0,05	0,1	150	0,05	183	5700	0	0	0	5700	205	1565	2302	0	0	2302	225	4731	0	0	0	4731
0,05	0,1	350	0,5	184	2314	1321	0	0	2314	218	9820	847	0	0	9820	226	3045	0	0	0	3045
0,05	0,1	350	0,05	249	12276	89	0	0	12276	219	5191	0	0	0	5191	223	7581	0	0	0	7581
0,6	0	150	0,5	157	237	0	0	0	237	201	1101	0	0	0	1101	229	4824	102	0	0	4824
0,6	0	150	0,05	158	2157	915	0	0	2157	193	2378	0	0	0	2378	230	27	0	0	0	27
0,6	0	350	0,5	159	2252	1569	0	0	2252	194	6652	0	0	0	6652	231	28711	18173	0	0	28711
0,6	0	350	0,05	177	0	0	0	0	0	195	2561	0	0	0	2561	232	9032	0	0	0	9032
0,6	0,1	150	0,5	175	210	0	0	0	210	196	2098	0	0	0	2098	233	1144	0	0	0	1144
0,6	0,1	150	0,05	165	0	0	0	0	0	197	524	0	0	0	524	235	4997	0	0	0	4997
0,6	0,1	350	0,5	176	2496	1559	0	0	2496	199	8148	0	0	0	8148	236	7099	0	0	0	7099
0,6	0,1	350	0,05	164	6760	4479	0	0	6760	200	6868	0	0	0	6868	237	6286	0	0	0	6286
2,2	0	150	0,5	136	0	0	0	0	0	210	0	0	0	0	0	238	54	0	0	0	54
2,2	0	150	0,05	141	0	0	0	0	0	211	0	0	0	0	0	239	0	0	0	0	0
2,2	0	350	0,5	142	0	0	0	0	0	212	14035	10651	0	0	14035	240	19936	39	0	0	19936
2,2	0	350	0,05	143	0	0	0	0	0	213	0	0	0	0	0	241	12667	0	0	0	12667
2,2	0,1	150	0,5	145	0	0	0	0	0	214	0	0	0	0	0	246	6300	0	0	0	6300
2,2	0,1	150	0,05	146	0	0	0	0	0	215	0	0	0	0	0	243	5845	0	0	0	5845
2,2	0,1	350	0,5	251	0	0	0	0	0	216	0	0	0	0	0	244	11661	4	0	0	11661
2,2	0,1	350	0,05	252	0	0	0	0	0	217	223	0	0	0	223	245	244	0	0	0	244

Es wurde festgestellt, dass innerhalb eines Wärmepumpengehäuses - unabhängig von der Betrachtung von Level 2 oder Level 3 - die Propankonzentrationen stark ansteigen. Es ist schwierig, wenn nicht gar unmöglich, Teile eines Gehäuses mit den üblichen Fertigungsprinzipien für Gehäuse so zu konstruieren, dass Bereiche der Zone 2 vermieden werden, d.h. dass im Falle einer Leckage Ereignisse mit weniger als 10 Stunden pro Jahr auftreten.

Die Verwendung einer größeren Kältemittelfüllung führt im Allgemeinen auch zu höheren Propankonzentrationen und längeren Zeiträumen, in denen die LFL überschritten wird. Hohe Konzentrationswerte werden bei hohen Druckwerten erreicht, wenn das Leck innerhalb eines Gehäuses austritt. Um eine möglichst geringe Propansammlung in einem Bereich mit einfacher Gehäusekonstruktion ohne weitere Kältemittelströmungsbarrieren oder Strömungssenken zu erreichen, sollten kältemittelhaltige Teile möglichst hoch angeordnet werden oder das Gehäuse sollte so konstruiert werden, dass eine größere Höhe bei der Freisetzung möglich ist.

Anhand des gewonnenen Datensatzes kann die zeitliche und räumliche Verteilung des Kältemittels für bestimmte Parameter in einem Leckagefall an einem bestimmten Ort bestimmt werden. Bei dieser Analyse lag der Schwerpunkt auf der Analyse im Zeitbereich. Die Konkurrenz von dichtegetriebenen und diffusionsgetriebenen Effekten wird beispielsweise beim Vergleich von Strömungsvorgängen innerhalb eines Gehäuses in Richtung eines Raumes und außerhalb des Gehäuses innerhalb eines Raumes sichtbar. Diese konkurrierenden Transportphänomene ermöglichen es, Sicherheitsschwellwerte für die zulässige Dynamik des Stofftransports für die Konstruktion von Gehäusen und andere Sicherheitsmaßnahmen festzulegen, um das Kältemittel innerhalb eines Gehäuses zu halten oder es in einen anderen kontrollierten Bereich zu leiten.

Ein Schritt für die räumliche Analyse war die Entwicklung von experimentell ermittelten 3D-Simulationsmodellen, mit denen die Experimente nachgestellt werden können.

2.5.7 Nächste Schritte

Im Nachfolgeprojekt LCR290 werden die nun vorhandenen, validen Daten bei Bedarf weiterverwendet und mit dimensionslosen Ansätzen verglichen, die auch zur Definition von Formelapparaten in Sicherheitsnormen (IEC 60335-2-40, EN 378 und weitere) angewandt werden. Bestenfalls werden bisherige empirische Ansätze mit den ermittelten Daten bestätigt und in allen anderen Fällen als Rückmeldung an relevante Normungsgremium zurückgespiegelt, zur Verbesserung des Stands der Technik.

Darüber hinaus erfolgt eine Einbettung der Ergebnisse in weitaus umfangreichere Studien, um die Datenlage für eine möglichst umfangreiche Anzahl von Aspekten zur sicherheitstechnischen Auslegung von Wärmepumpen mit brennbaren Kältemitteln zu verbessern.

2.6 AP 6 – Betriebsstrategien

2.6.1 Bewertung von kritischen Betriebszuständen

Aus den Messergebnissen konnten folgende Klassifizierung von Betriebszuständen erarbeitet werden (siehe dazu auch Tabelle 7 in Abschnitt 2.3.3):

- **Unterfülltes System:** Unterfüllte Systeme zeichnen sich durch geringere Effizienzen aus. Von einer kompletten Kondensation des Kältemittels im Verflüssiger kann nicht ausgegangen werden. Dadurch wird das Expansionsventil mit zweiphasigem Kältemittel beaufschlagt. Die Regelungsfähigkeit des Expansionsventils ist eingeschränkt. Große Überhitzungen sind die Folge. Ein unterfülltes System kann unter anderem durch Leckagen im System auftreten oder durch falsch bestimmte initiale Kältemittelfüllmengen.
- **Optimal gefülltes System:** Überhitzung wird erreicht. COP ist maximal.
- **Gefülltes System ohne Zugewinn von Leistung:** Dies ist kein kritischer Betriebszustand für die Funktionsfähigkeit der Wärmepumpe aber dennoch einer, der unbedingt vermieden werden sollte. Dadurch, dass ab einer bestimmten Kältemittelfüllmenge kein Zugewinn an Heizleistung oder Effizienz mehr erreicht werden kann, sinkt die spezifische Heizleistung [g/kW].
- **Überfülltes System:** In einem überfüllten System staut sich überschüssiges Kältemittel im Sammler (wenn vorhanden) oder im Verflüssiger zurück. Das Kältemittel nimmt nicht an der Wärmeübertragung „teil“. Das Kältemittel „blockiert“ den Verflüssiger und sorgt für eine geringere Effizienz der Wärmepumpe. Staut sich zu viel Kältemittel zurück, steigt der Hochdruck der Wärmepumpe.

Mit neuen Regelungsansätze wurde versucht die benötigte Kältemittelfüllmenge in Kältekreisen aktiv zu beeinflussen. Dies erfolgte mit optimierten Regelungsansätzen zur Kältemittelmengenregulation. Die Kältemittelfüllmenge in Kältekreisen ist von der Quelltemperatur (vgl. Abbildung 30) abhängig. Es wurde nachgewiesen, dass es möglich ist auf die wechselnden Umgebungstemperaturen im Jahresverlauf reagieren zu können, so dass ein Kältemittelsammler überflüssig ist. Neben der Abhängigkeit der Quelle besteht eine entgegengesetzt gerichtete Abhängigkeit der Kältemittelabhängigkeit der Überhitzung. Es wurden Untersuchungen an einem Sole-Wasser-Kältekreis für die folgenden Quelltemperaturen und Überhitzungen durchgeführt.

- Quelltemperaturen [°C]: -10/ -7/ +2/ +7/ +12
- Überhitzungen [K]: 2/ 4/ 6/ 8/ 10

Bei hohen Quelltemperaturen wurden hohe Überhitzungen eingeregelt, um dadurch den Mehrbedarf an Kältemittel durch die höhere Quelle zu kompensieren. Dadurch wird eine reduzierte Effizienz in Kauf genommen, aber es ermöglicht ggf. mit der Kältemittelfüllmenge unter bestimmte Schwellenwerte (z.B.: 150 g

Propan) zu fallen. Die reduzierte Effizienz ist in diesem Fall nicht problematisch, da die Wärmepumpe bei hohen Quellen keinen signifikanten Anteil am Jahresverbrauch hat. Im Sommer weist die Wärmepumpe die geringsten Betriebsstunden auf.

2.7 AP 7 – Demonstration

Im Rahmen dieses Projekts wurde eine Kältekreis-Demonstrationsanlage für eine Wärmerückgewinnung im Industriekontext geplant und aufgebaut. Dafür war eine Analyse des bestehenden Abwärmeprozesses und die Abstimmungen der Anforderungen mit dem ZAE Bayern¹ innerhalb des Projektes „ETA im Bestand“ (Fkz: 03EN2048A-I) notwendig. Für den speziellen Abwärmeprozess einer Reinigungsanlage für Bohr- und Fräswerkzeuge des Herstellers MAFAC² aus Alpirsbach gelten folgende Anforderungen und Randbedingungen:

- Vorlauftemperaturen bis zu 65 °C
- Quellentemperaturen bis zu 20 °C
- Leistungen von mindestens 7,5 kW
- Die Kältemittelmenge soll so gering wie möglich gehalten werden.
- Der Kältekreis darf die maximale Abmessung von 400 x 500 x 700 mm (L x B x H) nicht überschreiten.

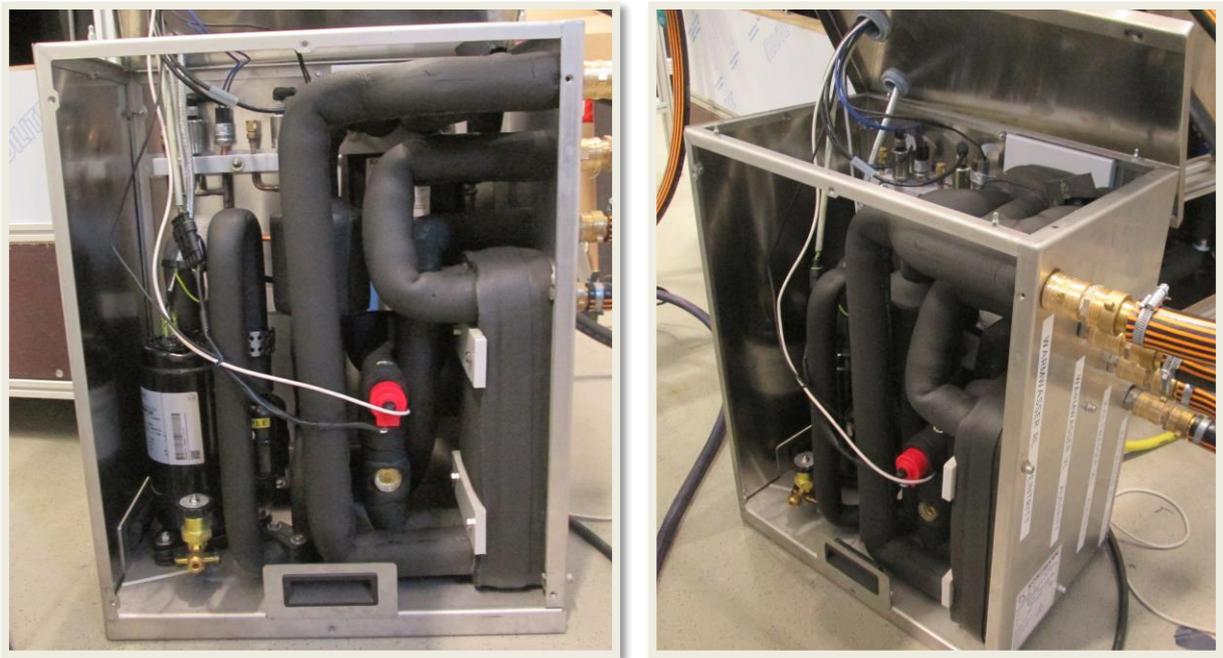


Abbildung 40: Aufgebautes Kältekreismodul zur Wärmerückgewinnung in Industrieanwendungen.

Das Aufgebaute Kältekreismodul ist in Abbildung 40 zu sehen. Aus den Messungen geht hervor, dass das Kältekreismodul bei einer Quellentemperatur von 20 °C, einer Senkentemperatur von 70 °C und einer Verdichterdrehzahl von 90 Hz einen COP von 2,5 erreicht. Dafür benötigte der Kältekreis eine Füllmenge von in etwa

¹ <https://www.zae-bayern.de/>

² <https://www.mafac.de/>

250 g Propan. Für diesen Aufbau wurden Filtertrockner sowie einen Schauglas verbaut. Die Implementierung des Kältekreismoduls in die Reinigungsanlage erfolgt beim ZAE Bayern.

2.8 Erfolgte Veröffentlichungen

Im Laufe des Projekts wurde das Forschungsvorhaben immer wieder der Öffentlichkeit in anonymisierter Form vorgestellt. Dies geschah z.B. durch Messebeteiligungen, Vorträge auf Konferenzen, Beiträge in Fachzeitschriften und der Veröffentlichungen von Papern. Die wichtigsten Paper, Präsentationen, Artikel sind auf der Homepage¹ des Projekts zu finden (nur noch bis Ende 2024 online). Im Folgenden werden in chronologischer Reihenfolge die Veröffentlichungen aufgeführt.

2.8.1 Paper

13th IEA Heat Pump Conference - Jeju

Title: "Evaluation of a low charge heat pump circuit using propane"²

14th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants - Japan

Titel: "Experimental Evaluation of a charge reduced Heat Pump Module using 150g of Propane"³

15th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants - Trondheim

Title: "Experimental Analysis of Various Refrigerant Circuit Component Combinations for Low Charge Propane Heat Pumps"⁴

15th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants - Trondheim

Title: "Simulation and experimental analysis of a low-charge ground-source heat pump using propane as refrigerant"⁵

14th IEA Heat Pump Conference - Chicago

Title: "How to cover 10 kW heating capacity with 150g of R290?"⁶

Research Article – "Chemie Ingenieur Technik"

title: "Design and Analysis of Charge-Reduced Refrigerant Cycles Using R290"⁷

2.8.2 Präsentationen

22./23.10.2019 – European Heat Pump Summit

title: "Low charge 150g heat pump with R290 as refrigerant"⁸

¹ www.lc150.eu

² Clemens Dankwerth, Timo Methler, Simon Braungardt, Christian Sonner, Thore Oltersdorf, Marek Miara, Peter Schossig, Lena Schnabel

³ Clemens DANKWERTH, Timo METHLER, Thore OLTERS DORF, Peter SCHOSSIG, Lena SCHNABEL

⁴ Timo Methler, Clemens Dankwerth, Lukas Joos, Hannes Fugmann, Katharina Morawietz, Lena Schnabel

⁵ Luis SÁNCHEZ-MORENO-GINER, Timo METHLER, Francisco BARCELÓ-RUESCAS, José GONZÁLVEZ-MACIÁ

⁶ Timo Methler, Hannes Fugmann, Clemens Dankwerth, Christian Sonner, Katharina Morawietz, Lena Schnabel

⁷ Lena Schnabel, Timo Methler, Abdelrahman H. Hassan, Clemens Dankwerth, José María González Macía
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cite.202200150>

⁸ Clemens Dankwerth

21.11.2019 – DKV-Tagung (Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V.)

title: „ENTWICKLUNG EINER PROPAN WÄRMEPUMPE MIT EINER KÄLTEMITTELFÜLLMENGE VON 150 GRAMM“¹

18.02.2020 –DKV-IZW Veranstaltung Darmstadt

Title: „ENTWICKLUNG EINER PROPAN WÄRMEPUMPE MIT EINER KÄLTEMITTELFÜLLMENGE VON 150 GRAMM“²

15.10.2020 – Chillventa e Special

title: “Low Charge Heat Pump Module – development and evaluation of charge reduced designs using 150g of R-290”³

20.11.2020 – DKV-Tagung (Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V.)

title: „Low Charge Heat Pump Module using 150g of R-290“⁴

09.12.2020 – 15th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants - Japan

title: “EXPERIMENTAL EVALUATION OF A CHARGE REDUCED HEAT PUMP MODULE USING 150G OF PROPANE”⁵

19.03.2021 –13th IEA Heat Pump Conference - “Heat Pumps - Mission for the Green World”

title: “EVALUATION OF A LOW CHARGE HEAT PUMP CIRCUIT USING PROPANE”⁶

03.05.2022 – Berliner Energietage

title: „Entwicklung und Rolle von Propanwärmepumpen“⁷

17./18.05.2022 – Kongress Energieforschung für Industrie und Gewerbe

title: „Propan-Kältekreise mit deutlich reduzierten Füllmengen“⁸

01.06.2022 – Innovationsforum Erneuerbare Wärme

title: „Innovationen bei Wärmepumpen“⁹

14.06.2022 – 16th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants - Norway

title: “Experimental Analysis of Various Refrigerant Circuit Component Combinations for Low Charge Propane Heat Pumps”¹⁰

18.10.2020 – DKV-Tagung (Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e.V.)

title: „Erstellung eines Benchmarks für Propan Wärmepumpen – LC150 – Low Charge 150g“¹¹

¹ Clemens Dankwerth

² Marek Miara

³ Lena Schnabel

⁴ Lena Schnabel

⁵ Lena Schnabel

⁶ Clemens Dankwerth, Video: <https://cloudtube.ise.fraunhofer.de/w/DFHMk8KCt6WZvDfZabuUZ?start=2s>

⁷ Lena Schnabel

⁸ Lena Schnabel

⁹ Lena Schnabel/ Thore Oltersdorf

¹⁰ Hannes Fugmann

¹¹ Lena Schnabel/ Clemens Dankwerth

20.12.2022 – VDI TGA & DKV UBZ Karlsruhe
title: „Was ist mit 150g Propan in Wärmepumpen erreichbar?“¹

2.8.3 Pressemitteilungen

October 22, 2019

<https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2019/heat-pumps-with-climate-friendly-refrigerant-developed-for-indoor-installation.html>

October 13, 2020

<https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2020/consortium-develops-compact-refrigeration-circuit-for-heat-pumps-using-propane.html>

October 26, 2021

<https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2021/unique-measurement-campaign-launched-to-reduce-refrigerant-charge-in-heat-pumps.html>

October 10, 2022

<https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2022/propane-based-refrigeration-circuit-for-heat-pumps-achieves-new-efficiency-record.html>

October 20, 2022

<https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/news/2022/propan-waermepumpe-fraunhofer-ise-auf-zweitem-platz-beim-deutschen-rohstoffeffizienz-preis-2022.html#:~:text=Das%20Fraunhofer%20Institut%20f%C3%BCr%20Solare,in%20der%20Kategorie%20%20BBForschungseinrichtung%20AB>

June 20, 2023

<https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2023/climate-friendly-heating-fraunhofer-ise-develops-low-charge-refrigeration-circuit-for-propane-heat-pumps.html>

2.8.4 Artikel in Fachzeitschriften

September 2022 – Article in the magazine **klimajournal**
title: “Kältemittel Propan - Klimafreundlich und effizient”²

2.8.5 Andere öffentliche Auftritte

Nomination for the German Raw Material Efficiency Award
2nd place and production of a LC150 video³

Large Fraunhofer booth on trade fair Chillventa 2022 – Nürnberg
LC150 – demonstrator on the booth

¹ Lena Schnabel

² Lena Schnabel

³ Video: <https://cloudtube.ise.fraunhofer.de/w/3j82kQs93qgh6mEvFyZLge?start=15s>

3 Anhang

3.1 Anhang zu "AP 5 – Kältemittel und Sicherheit" - Testergebnisse am Beispiel Freisetzung in Wärmepumpe und Prüfraum (Level 2)

Die Testergebnisse werden in diesem Abschnitt im Detail für eine Beispielkonfiguration beschrieben. Diese Zeitreihenanalyse wird für einen Sensor pro Schicht durchgeführt. Die Sensoren in jeder Schicht wurden nach einer gründlichen Analyse ihrer Stabilität ausgewählt. Eine erste abstrakte Ebene der Ergebnisdiskussion findet sich in Abschnitt 2.5.5.

Vor der Darstellung der Versuchsergebnisse ist zu beachten, dass Verteilungs- und Strömungsphänomene immer ein Zusammenspiel von Druck-, Dichte- sowie Konzentrationsgradienten sind, während der Dichtegradient nur in einem Gravitationsfeld auftritt. Das Ausmaß jedes dieser Phänomene, das zu einem Massentransport von Propan in Luft oder von Luft in Propan beiträgt, hängt vom auftretenden Gradienten ab. Der Austausch von Wärmeenergie kann dieses Zusammenspiel noch komplexer machen. Der Versuchsaufbau zur Ermittlung der Konzentrationen wird durch diese Phänomene beeinflusst und kann aufgrund fehlender Informationen nicht vollständig analysiert werden.

3.1.1 Ausströmung aus 0,05 m

3.1.1.1 Phänomene, die in der Hülle auftreten

Durch das impulsivere Ausströmen entsteht im Gehäuse eine Konzentration von 67 % bei 150 g und 77 % bei 350 g. Durch die in das Gehäuse strömende Masse entsteht ein Druckgefälle zwischen dem Prüfraum und dem Gehäuse. Dies führt dazu, dass das Propan-Luft-Gemisch in den Raum ausströmt. Siehe Abbildung 41.

Es ist zu beobachten, dass über den gesamten Zeitraum von 8 h die LFL für die Versuche mit einer Masse von 350 g immer überschritten wird. Im Gegensatz dazu liegt die Konzentration bei Versuchen mit 150 g Kältemittelfüllung bereits nach etwa 2 h unter der LFL.

Bei einem Massenstrom von 0,05 g/s steigt die Konzentration in beiden Fällen auf etwa 37 % im Gehäuse an. Dieses stationäre Verhalten während des Szenarios der langsamen Freisetzung deutet darauf hin, dass ein Mischeffekt auftritt, bei dem permanent Luft in die Hülle eindringt und die Gesamtkonzentration unter diesem Schwellenwert von 37 % gehalten wird. Trotz des Massenunterschieds zwischen den Freisetzungsmassen von 150 g und 350 g ist kein Anstieg dieser Volumenkonzentration im Gehäuse zu erkennen. Nach diesen langsamen Freisetzungsabbrüchen setzt ein dichtegetriebener Prozess ein, der die Konzentrationen für diesen Sensor schnell senkt, gefolgt von dem typischen sehr langsamen diffusionsgetriebenen Prozess.

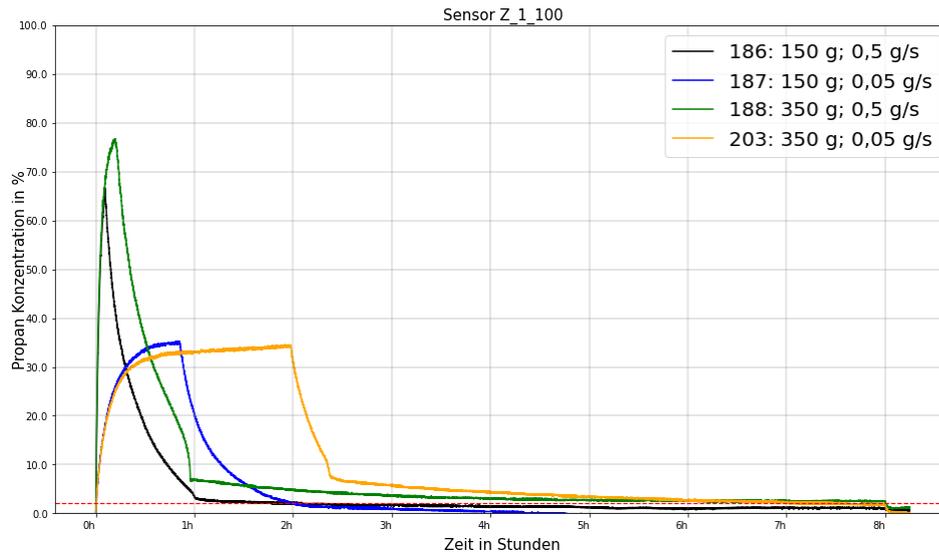


Abbildung 41: Ebene 2, Ausströmung aus 5 cm Höhe, Sensorwerte in der Stichprobe. Dauer der Leckageereignisse: Exp. 186: 0,1 h, Exp. 187: 0,8 h, Exp. 188: 0,2 h, Exp. 203: 1,9 h (Propankonzentration in % gegen Zeit in Stunden)

3.1.1.2 Phänomene, die in Bodennähe auftreten

Bei einem Massenstrom von 0,5 g/s (Versuche 186 und 188, siehe Abbildung 42) kommt es zu einem schnellen Anstieg der Propankonzentration in Bodennähe. Aufgrund des Druckgefälles kommt es zu einem dynamischen Ausfluss in Bodennähe, wobei die LFL in beiden Versuchen für weniger als 1 h überschritten wird. Aufgrund der höheren Propankonzentrationen zur gleichen Zeit im Gehäuse lässt sich schließen, dass die langsame Leckage nicht zu gefährlichen Konzentrationen führt.

Bei einem Massenstrom von 0,05 g/s ist nicht nur die Propankonzentration im Gehäuse, sondern auch die Konzentration in Bodennähe geringer. Die schwere Gaswolke bei langsamen Freisetzungen verlässt das Gehäuse mit deutlich geringeren Konzentrationen im Vergleich zu den schnellen Freisetzungen bei höheren Leckagemassenströmen.

Eine Masse von 150 g (Test 187) führt nur zu einer kurzen Überschreitung der LFL. Bei 350 g (Versuch 203) kommt es zu einer verzögerten Überschreitung und Konzentrationen von maximal 3,7 %. In diesem Versuch wird die LFL jedoch in Bodennähe für die längste Zeit von 3 h überschritten, was auf die geringere Dynamik und damit stabilere Schwergaswolke zurückgeführt werden kann. Es ist auch zu erkennen, dass die Raumluft am Ende des Versuchs noch nicht die gleiche Propankonzentration aufweist wie die Luft in der Hülle. Somit konnte nicht das gesamte Propan aus dem Gehäuse in die Raumluft diffundieren.

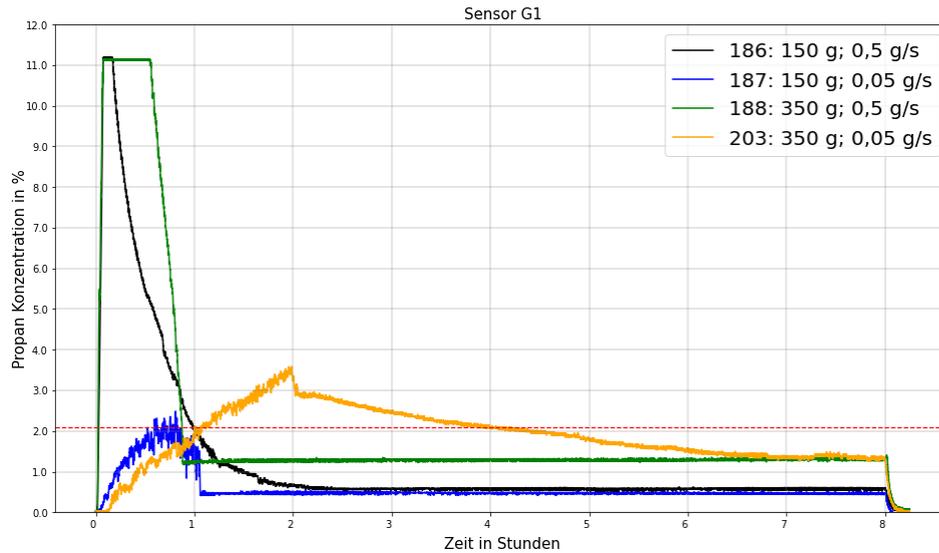


Abbildung 42: Ebene 2, Ausströmung aus 5 cm Höhe, Sensorwerte in Schicht 1 (2 cm Höhe). Dauer der Leckageereignisse: Exp. 186: 0,1 h, Exp. 187: 0,8 h, Exp. 188: 0,2 h, Exp. 203: 1,9 h (Propankonzentration in % gegen Zeit in Stunden)

3.1.2 Ausströmung aus 0,6 m

3.1.2.1 Phänomene, die in der Hülle auftreten

Wie bei der Messung aus 3.1.1 ist die Propankonzentration bei einem Massenstrom von 0,5 g/s größer als bei einem zehnmal kleineren Massenstrom. Allerdings ist die maximale Konzentration bei diesen Versuchen im Allgemeinen niedriger als im vorherigen Abschnitt. Da die gleiche Masse ausgestoßen wird, ist die geringere Propankonzentration auf den gegen das Lüftungsgitter gerichteten Ausstoß zurückzuführen (siehe Abbildung 43).

Wie zuvor bei den Experimenten des Level 1 nimmt die Propankonzentration unmittelbar nach dem Ende des Ausflusses ab. Der Rückgang ist jedoch weniger schnell als im vorherigen Abschnitt. Aufgrund der Durchführungen in einer Höhe von 60 cm ist die Verteilung aufgrund des Schwergaseffekts geringer.

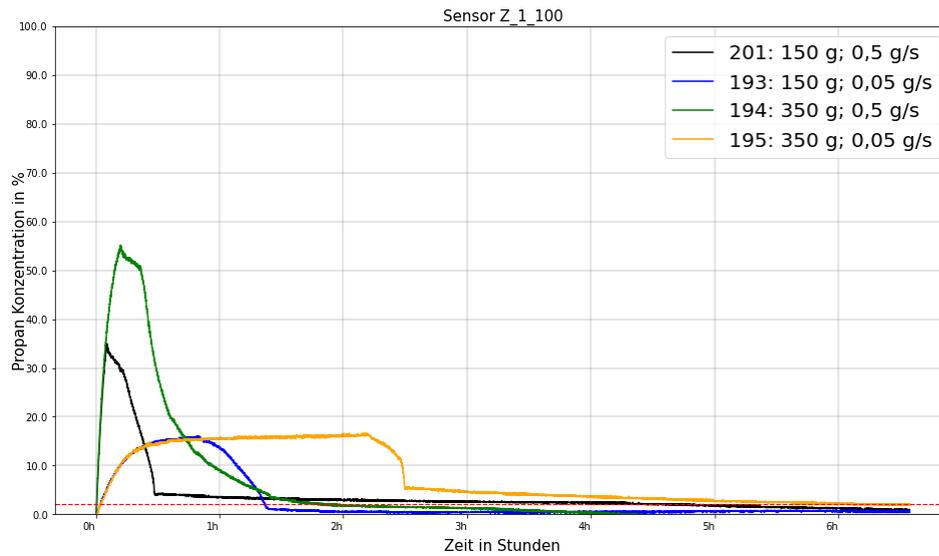


Abbildung 43: Ebene 2, Ausströmung aus 60 cm Höhe, Sensorwerte im Gehäuse. Dauer der Leckageereignisse: Exp. 201: 0,1 h, Exp. 193: 0,8 h, Exp. 194: 0,2 h, Exp. 195: 1,9 h (Propankonzentration in % gegen Zeit in Stunden)

3.1.2.2 In Bodennähe auftretende Phänomene

Die Dauer der Überschreitung der LFL ist bei einem Massenstrom von 0,5 g/s bei 150 g (Versuch 201) länger als bei 350 g (Versuch 194). Der Konzentrationsabfall in Versuch 201 ist schnell und endet bei der idealen Mischungskonzentration von 0,65 %, was auf eine schnelle Verteilung im Raum hinweist. Bei gleichem Massenstrom und einer Masse von 350 g (Versuch 194) kommt es aufgrund der größeren Masse zu einem langsameren Konzentrationsabfall. Aufgrund des raschen Konzentrationsanstiegs ist aber auch hier ein Abfluss durch einen Differenzdruck zu beobachten (siehe Abbildung 44).

Die LFL wird erst bei einem Massenstrom von 0,05 g/s mit einer Füllung von 350 g Propan überschritten. Auch hier ist zu erkennen, dass im Versuch 195 das Propan in der Prüfkammer nach 2,5 h vollständig diffundiert ist, während in der Hülle noch eine höhere Konzentration aufweist. Der Konzentrationsabbau im Prüfmuster ist dann aufgrund des geringen Impulses und des geringen Konzentrationsgefälles deutlich langsamer. Gleiches gilt für Test 193.

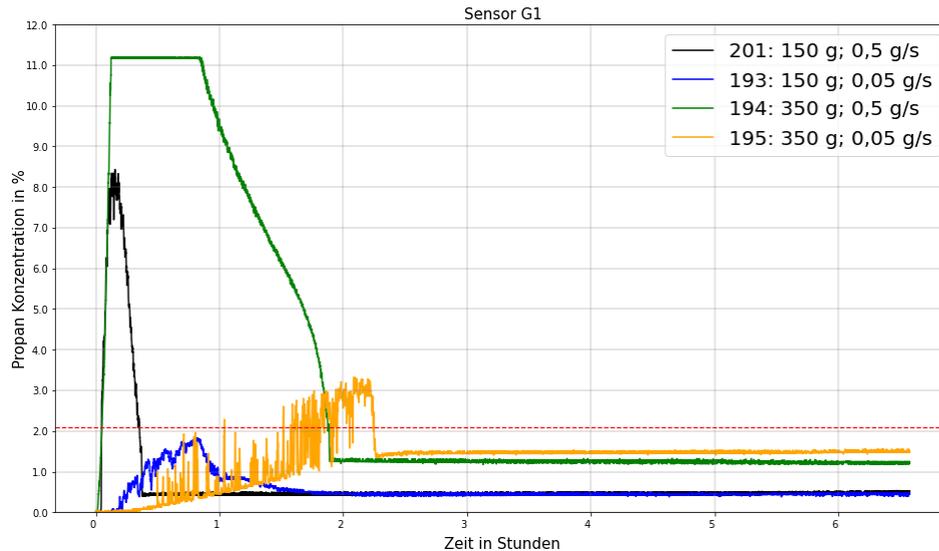


Abbildung 44: Ebene 2, Abfluss in 60 cm Höhe, Sensorwerte in Schicht 1 (2 cm Höhe). Dauer der Leckageereignisse: Exp. 201: 0,1 h, Exp. 193: 0,8 h, Exp. 194: 0,2 h, Exp. 195: 1,9 h (Propankonzentration in % gegen Zeit in Stunden)

3.1.3 Abfluss aus 2,2 m

3.1.3.1 Phänomene, die in der Hülle auftreten Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.

Nach dem Ausströmen ist ein ähnlicher Konzentrationsabfall sowohl für einen Massenstrom von 0,5 g/s als auch für 0,05 g/s festzustellen. Aufgrund der Konstruktion des Gehäuses mit dem eingebauten Schornstein und nur einer sehr viel kleineren Öffnung am Boden des Gehäuses kann geschlossen werden, dass die Propankonzentration nur sehr geringfügig abnimmt. Das Konzentrationsniveau bleibt im Inneren des Gehäuses hoch. Aufgrund des kleineren Querschnitts des Schornsteins, der in einer Höhe von 2,2 m installiert ist, im Vergleich zu den 16 cm² großen Öffnungen der beiden anderen Öffnungen innerhalb des Gehäuses, strömt in dieser Testmatrix weniger Kältemittel aus dem Gehäuse. Aus diesem Grund ist nach einer achtstündigen Messung bei allen Tests innerhalb des Gehäuses noch eine Propankonzentration von 20-40 Vol. % vorhanden. Der Dichteunterschied zwischen der schweren Gaswolke und der besser gemischten Luft um das Gehäuse herum ist nicht groß genug, um einen Gleichgewichtsprozess in Gang zu setzen. Die Gesamtkältemittelfüllung ist zu gering, um die Vorteile des Schornsteinkonzepts zu nutzen. Selbst bei einem freien Volumen von nur 62 % summiert sich das verbleibende Volumen auf etwa 180 Liter, die im Falle einer 100 %-igen Propan-Schwergaswolke etwa 340 g aufnehmen können.

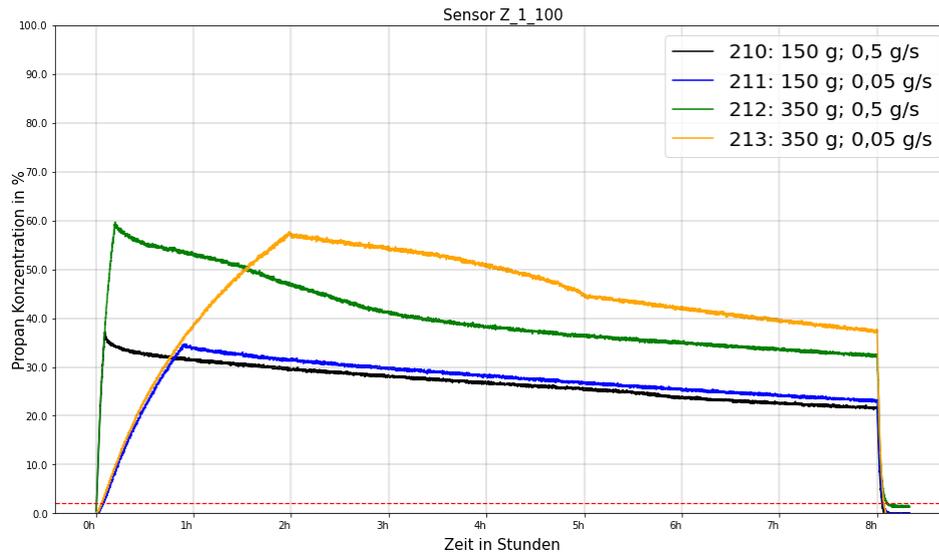


Abbildung 45: Ebene 2, Abfluss in 220 cm Höhe, Sensorwerte im Gehäuse. Dauer der Leckageereignisse: Exp. 210: 0,1 h, Exp. 211: 0,8 h, Exp. 212: 0,2 h, Exp. 213: 1,9 h (Propankonzentration in % gegen Zeit in Stunden)

3.1.3.2 Phänomene, die in Bodennähe auftreten

Außerhalb des Prüfobjekts tritt an keiner Sensorschicht ein brennbares Gemisch auf, was dieses Gehäusedesign im Vergleich zu anderen geprüften Designs sicherer macht. Da das Kältemittel im ungünstigsten Fall in Richtung des Schornsteins ausströmt, gibt es keinen eindeutigen Hinweis darauf, dass ein Freistrahler noch den Ausgang des Schornsteins erreicht hat. Anfänglich ist ein leichter Anstieg der Propankonzentration in dieser Sensorschicht im Testraum zu erkennen. Dieser geringe Anstieg ist jedoch nicht unbedingt ein Indikator für ein Freistrahlerverhalten am Schornsteinaustritt. Er könnte auch durch die typischen starken Überschwinger ausgelöst werden, die aufgrund der Auslegung des Regelkreises zur Fixierung des Massenstroms auf 0,5 g/s in den allerersten Sekunden nach Versuchsbeginn auftreten.

Wenn das Ausströmen aufhört, steigt die Konzentration draußen bei 150 g freigesetzter Ladung nicht an, obwohl im Inneren des Gehäuses ein Rückgang zu beobachten ist. Dies deutet darauf hin, dass der diffusive Transportprozess zur Durchmischung des Raumes ähnlich groß ist. Bei der Freisetzung von 350 g Ladung bleibt die Konzentration auf der Innenseite auf einem höheren Niveau, was den Dichtegradienten erhöht. Dies führt zu einer etwas schnelleren Ausflusssdynamik aus dem Inneren des Gehäuses in den Raum im Vergleich zum vertikalen Diffusionsprozess innerhalb des Raumes. Die kleinen Öffnungen in der Bodenplatte des Gehäuses eines Innengeräts, die zur Erleichterung eines künftigen Wartungsvorgangs vorzugsweise ohne brennbare Konzentration im Inneren des Gehäuses belassen werden, scheinen jedoch zu klein zu sein, um dieses Ziel einer brennbaren Atmosphäre im Inneren des Gehäuses zu erreichen.

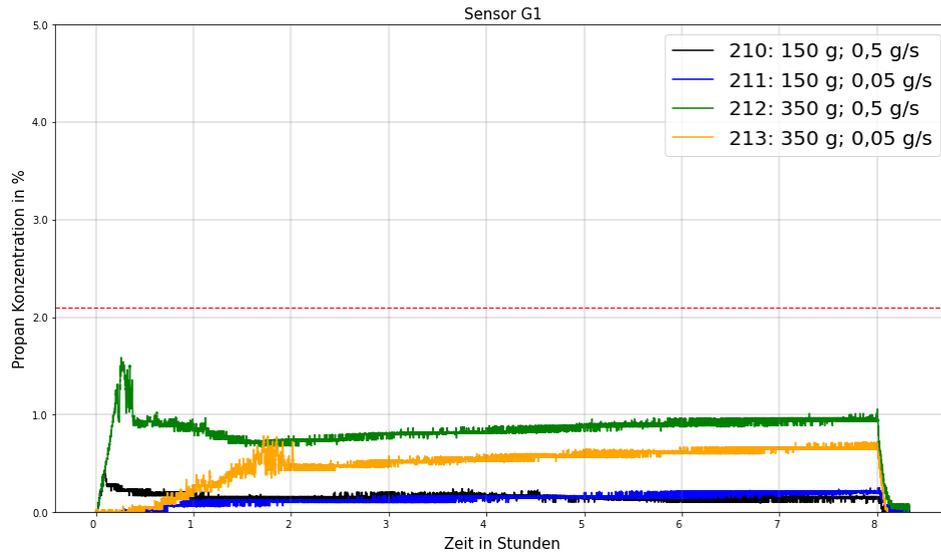


Abbildung 46: Ebene 2, Abfluss in 220 cm Höhe, Sensorwerte in Schicht 1 (2 cm Höhe). Dauer der Leckageereignisse: Exp. 210: 0,1 h, Exp. 211: 0,8 h, Exp. 212: 0,2 h, Exp. 213: 1,9 h (Propankonzentration in % gegen Zeit in Stunden)

4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Erfolgreich vermessene Wärmepumpenprüflinge im Projekt LC150 mit Angabe der spezifischen Füllmenge aufgetragen gegenüber der Heizleistung.	6
Abbildung 2: Zusammensetzung Industriebeirat	8
Abbildung 3: Schema der Entwicklungsmethodik in LC150.	10
Abbildung 4: Links: Kältemittelseitiger Eintritt eines Verdampfers mit manuell gefüllten Totvolumina mit Epoxidharz (Blick von der gegenüberliegenden Seite durch ein Schauglas). Rechts: Schematische Darstellung des Eintritts des Verdampfers.	12
Abbildung 5: EEV-Öffnungsgrad aufgetragen über der Füllmenge für Wärmeübertragervermessung	13
Abbildung 6: COP aufgetragen über der Füllmenge	14
Abbildung 7: Schematische Darstellung des Messaufbaus zur Bestimmung der Kältemittelmenge je Bauteil im Kältekreis.	15
Abbildung 8: Ergebnisse einer Kältemittelfüllmengenbestimmung nach Bauteilen im Kältekreis.	15
Abbildung 9: Ergebnisse einer Kältemittelfüllmengenbestimmung nach ErP Punkten mit einer Gesamtfüllmenge von 195 g R290.	16
Abbildung 10: Vergleich der Kältemittelmengen je nach Betriebspunkt zwischen Simulation und Experiment für einen Verdampfer.	17
Abbildung 11: Schematischer Aufbau Infrarotaufnahmen.	17
Abbildung 12: Wärmeübertragervermessungen im Wärmepumpensystem.	18
Abbildung 13: Wärmeübertragerteststand mit Verflüssiger und Verdampfer.	18
Abbildung 14: Darstellung der Infrarotaufnahmen von zwei Wärmeübertragern. Oben: Verflüssiger. Unten: Verdampfer.	19
Abbildung 15: Links: Vergleich des Verlaufes der Verflüssigertemperaturen des gleichen Betriebspunktes bei verschiedenen Kältemittelfüllmengen. Rechts: Darstellung der Messungen im log(p)-h-Diagramm	20
Abbildung 16: Links: Schematische Kältemittelverteilung im Plattenwärmeübertrager. Rechts: Infrarotbild einer inhomogenen Verteilung.	21
Abbildung 17: Interner Wärmeübertrager in Rohr-in-Rohr Bauweise	21
Abbildung 18: Übertragene Enthalpiemengen des internen Wärmeübertragers im log(p)-h-Diagramm.	22
Abbildung 19: Vergleich der Kältemittelmengen je nach Betriebspunkt zwischen Simulation und Experiment für einen Verdichter.	24
Abbildung 20: Absorptionscharakteristik eines Kältemaschinenöls in Abhängigkeit von Dampfdruck und Temperatur	25
Abbildung 21: Darstellung der Verbesserungen der Softwareumgebung IMST-ART im Projektverlauf von der Version 3.9 zu der Version 4.1.	28
Abbildung 22: Vergleich zweier Simulationswerkzeuge für eine füllmengenreduzierten Propanwärmepumpe	29

Abbildung 23: Systemprüfstände für die Durchführung der Kreuzevaluation. Links: Prüflingen im Labor. Rechts: Fließschemata des Aufbaus	30
Abbildung 24: Füllmengenstation zur automatisierten Befüllung von Kältekreisen	30
Abbildung 25: Darstellungsbeispiel für den Kältekreis RC12-02. Heizleistung über der Kältemittelfüllmenge.	31
Abbildung 26: Darstellungsbeispiel für den Kältekreis RC12-02. COP über der Kältemittelfüllmenge.	32
Abbildung 27: Erfolgreich vermessene Wärmepumpenprüflinge im Projekt LC150 mit Angabe der spezifischen Füllmenge aufgetragen gegenüber der Heizleistung.	33
Abbildung 28: Heizleistung (links) und SCOP (rechts) aller gemessenen Kältekreise gegenüber der Kältemittelfüllmenge.	34
Abbildung 29: Darstellung des Öffnungsgrades des Expansionsventils in Abhängigkeit der Kältemittelfüllmenge.	36
Abbildung 30: Einflüsse der Betriebsparameter auf die Kältemittelfüllmenge, den COP und die Effizienz.	36
Abbildung 31: Auflistung der Betriebszeiten je Betriebspunkt für RC08-28 (links) und RC08-30 (rechts)	38
Abbildung 32: Prüfkammer für Propanausbreitungstests	42
Abbildung 33: Prüfaufbau Level 2 (einfaches Gehäuse), mit belegtem Raum innerhalb des Gehäuses in der Prüfkammer	42
Abbildung 34: Prüfaufbau Level 3 (Gehäuse im Gehäuse), mit dem gleichen freien Innenvolumen wie der Aufbau des Level 2,	43
Abbildung 35: Geänderte Prüfkammer mit einer temporären Wandstruktur mit einer Raumfläche von 5,7 m².	44
Abbildung 36: Neun Testszenarien für Stufe Level 1 bis Level 3	47
Abbildung 37: Beispielhafte Stromlinien für Ausströmversuche.	50
Abbildung 38: Vergleich der Versuche mit (blau) und ohne (schwarz) Luftwechselrate mit den gleichen Parametern in Level 1, Freisetzung in 5 cm Höhe.	51
Abbildung 39: Einfluss der Luftwechselrate in Level 1, Abfluss aus 2,2 m.	52
Abbildung 40: Aufgebautes Kältekreismodul zur Wärmerückgewinnung in Industrieanwendungen.	58
Abbildung 41: Ebene 2, Ausströmung aus 5 cm Höhe, Sensorwerte in der Stichprobe. Dauer der Leckageereignisse: Exp. 186: 0,1 h, Exp. 187: 0,8 h, Exp. 188: 0,2 h, Exp. 203: 1,9 h (Propankonzentration in % gegen Zeit in Stunden)	64
Abbildung 42: Ebene 2, Ausströmung aus 5 cm Höhe, Sensorwerte in Schicht 1 (2 cm Höhe). Dauer der Leckageereignisse: Exp. 186: 0,1 h, Exp. 187: 0,8 h, Exp. 188: 0,2 h, Exp. 203: 1,9 h (Propankonzentration in % gegen Zeit in Stunden)	65
Abbildung 43: Ebene 2, Ausströmung aus 60 cm Höhe, Sensorwerte im Gehäuse. Dauer der Leckageereignisse: Exp. 201: 0,1 h, Exp. 193: 0,8 h, Exp. 194: 0,2 h, Exp. 195: 1,9 h (Propankonzentration in % gegen Zeit in Stunden)	66
Abbildung 44: Ebene 2, Abfluss in 60 cm Höhe, Sensorwerte in Schicht 1 (2 cm Höhe). Dauer der Leckageereignisse: Exp. 201: 0,1 h, Exp. 193: 0,8 h, Exp. 194: 0,2 h, Exp. 195: 1,9 h (Propankonzentration in % gegen Zeit in Stunden)	67

Abbildung 45: Ebene 2, Abfluss in 220 cm Höhe, Sensorwerte im Gehäuse. Dauer der Leckageereignisse: Exp. 210: 0,1 h, Exp. 211: 0,8 h, Exp. 212: 0,2 h, Exp. 213: 1,9 h (Propankonzentration in % gegen Zeit in Stunden) 68

Abbildung 47: Ebene 2, Abfluss in 220 cm Höhe, Sensorwerte in Schicht 1 (2 cm Höhe). Dauer der Leckageereignisse: Exp. 210: 0,1 h, Exp. 211: 0,8 h, Exp. 212: 0,2 h, Exp. 213: 1,9 h (Propankonzentration in % gegen Zeit in Stunden) 69

5 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: COPs der Kältekreises mit und ohne internen Wärmeübertrager an verschiedenen Betriebspunkten.	22
Tabelle 2: Heizleistungen der Kältekreise mit und ohne internen Wärmeübertrager an verschiedenen Betriebspunkten.	22
Tabelle 3: Verteilung der Propanfüllmenge im Kältekreis mit und ohne internen Wärmeübertrager.....	23
Tabelle 4: Wichtigste Komponenten der analysierten Anlage	27
Tabelle 5: Länge und Innendurchmesser der Verbindungsrohre	28
Tabelle 6: Übersicht über die gemessenen Kältekreise mit minimaler Füllmenge, SCOP und Heizleistung.....	34
Tabelle 7: Heatmap zur Darstellung der minimalen Kältemittelfüllmenge in Abhängigkeit des Betriebspunktes.	35
Tabelle 8: Übersicht über das freie und belegte Volumen in den getesteten Geräten.....	43
Tabelle 9: Parameterraum für die Freisetzungsversuche.....	45
Tabelle 10: Dauer aller Ereignisse, bei denen die LFL-Konzentrationen überschritten wurden.....	54