safeSENSE - Entwicklung und Bewertung einer innovativen Sicherheitseinrichtung für Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln basierend auf Sorptionselementen und neuartiger Sensorik

Gemeinsamer Schlussbericht
Teil I - Kurzbericht
Teil II – Eingehende Darstellung

Förderkennzeichen: 03EN2030A/B

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Projektträger Jülich Forschungszentrum Jülich

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

Danksagung

Das Forschungsprojekt safeSENSE wurde in der Zeit vom 01.01.2020 bis zum 31.12.2023 durch den Projektträger Jülich (PTJ) unter den Förderkennzeichen 03EN2030A/B betreut. Die Finanzierung erfolgte aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, wofür wir uns herzlich bedanken.

Das Vorhaben wurde als Verbundprojekt vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, dem Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Freiburg, und der Vaillant GmbH, Remscheid, gemeinsam durchgeführt. Dieser Bericht beinhaltet eine Beschreibung aller Teilprojekte im Sinne eines Gesamtberichts. Dieser umfasst so auch die folgenden Teilprojekte:
Teilprojekt A: Sorption und Sensorik, FKZ 03EN2030A
Teilprojekt B: Systemintegration, FKZ 03EN2030B

safeSENSE

Entwicklung und Bewertung einer innovativen Sicherheitseinrichtung für Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln basierend auf Sorptionselementen und neuartiger Sensorik

Dr. Gerrit Füldner, Fraunhofer ISE
Hans-Josef Spahn, Tobias Lingk, Christof Krampe-Zadler, Vaillant GmbH
Dr. Eric Laurenz, Dr. Hannes Fugmann, Philipp Hügenell, Dr. Thore Oltersdorf, Fraunhofer ISE

Fraunhofer IPM

Projektpartner:

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg (FKZ 03EN2030A)

Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM

Vaillant GmbH, Berghauser Straße 40, 42859 Remscheid (FKZ 03EN2030B)

Förderkennzeichen: 03EN2030A/B
Berichtszeitraum: 01.01.2020 – 31.12.2023

Fraunhofer IPM Vaillant Fraunhofer ISE

Inhalt

Abbildungsverzeichnis 5
Tabellenverzeichnis 8
Teil I: Kurzbericht 9
1. Aufgabenstellung 9
1.1 Gesamtziel des Vorhabens 9
1.2 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele 9
2. Wissenschaftlicher und technischer Stand 10
3. Ablauf des Vorhabens 17
4. Projektergebnisse 17
4.1 ISE 17
4.2 IPM 18
4.3 VAILLANT 18
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen 18
Teil II: Eingehende Darstellung der Ergebnisse 20
1. Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse 20
1.1 AP 1 Evaluierung des Sorptionsbettes – Untersuchung von Stabilität und Design 20
1.2 AP 2 Entwicklung eines Beladungssensors 39
1.3 AP 3 Absicherung Sekundärkreis 47
1.4 AP 4 Systemintegration 50
1.5 AP 5 Projektkoordination 59
1.6 AP 6 IEA-HPP Annex 54, Heat pump systems with low-GWP refrigerants 59
2. Voraussichtlicher Nutzen 63
3. Relevante Ergebnisse von dritter Seite 64
3.1 Gerät Hautec – Typ Carno HSC/ HSW 64
3.2 Gerät Nibe – Typ Fighter 470 HP 65
4. Erfolgte Veröffentlichungen 66
4.1 Konferenzbeiträge 66
4.2 Abschlussarbeiten 66
4.3 Weitere 66
4.4 Patentübersicht ➔ Siehe Erfolgskontrollbericht Vaillant 66
Literatur 67

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Heizwärmebedarf und korrespondierender Wärmeverlust durch ein Sicherheitskonzept basierend auf Ventilation abgeschätzt für drei verschiedene Gebäudetypen. 11
Abbildung 2: Aufbau und Funktionsweise eines Pellistors. Trifft brennbares Gas auf die mit Katalysator beschichtete Perle im Pellistor erhöht sich deren Temperatur und der Widerstand des darin enthaltenen Platindrahtes ändert sich. Dies kann als Spannungssignal im Vergleich zu einen nicht beschichteten Perle gemessen werden. [4] 13
Abbildung 3: Abhängigkeit der Permittivität (komplex) von der Frequenz, Art der Wechselwirkung des elektrischen Wechselfeldes mit dem Dielektrikum [Quelle: wikipedia] 14
Abbildung 4: Beispielhafte Sensorstruktur, unter anderem mit einem Heizerwiderstand R_{Bol}, auf den eine Testschicht des Adsorbens aufgebracht wird. Durch diesen wird ein Wechselwärme-strom in das Testmedium eingeprägt und die erforderliche Temperaturamplitude gemessen. Mit dieser thermischen Impedanzanalyse können Rückschlüsse auf Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit, und damit auf den Beladungsgrad des Adsorbens gewonnen werden [4]. 14
Abbildung 5: Vermessung der Adsorption von R290 durch thermische Impedanzmessung mittels Messstrukturen auf Glas- bzw. PEI-Chips die mit einer Aktivkohlebeschichtung als Absorbens ausgestattet wurden. 15
Abbildung 6: Typischer Plattenwärmeübertrager der Firma SWEP (links) und Darstellung potenzieller Leckageauswirkung im Sekundärkreis (rechts). 16
Abbildung 7: Arbeitsstrukturplan 17
Abbildung 8: Messdaten Temperatur und Feuchte (Raumluftdaten) Vaillant 22
Abbildung 9: Darstellung der generischen Geometrie des Reihenhauses 23
Abbildung 10: Häufigkeitsverteilung Ergebnisse von Druckdifferenzmessungen im Zeitraum 24
Abbildung 11: Jahresverlauf der Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit (rote Linie) inkl. 25
Abbildung 12: Exemplarische schematische Darstellung der Luftströme in m³/h sowohl durch In- und Exfiltration als auch innerhalb der Zonen des Gebäudes. Die Infiltration von außen wird durch blaue Pfeile symbolisiert, Exfiltration nach außen durch beige, interzonale Luftwechsel durch grün umrandete. 25
Abbildung 13: Simulierte Luftwechselraten versus Installationsraumgröße bei den betrachteten Worst-Case-Szenarien. 26
Abbildung 14: Simulation der thermisch induzierten Pendelströmung zwischen Kältekreisgehäuse und Aufstellungsraum. 27
Abbildung 15: Darstellung der Beiträge der externen Partner AGÖF und IUTA. 28
Abbildung 16: Übersicht über Substanzklassen, die im Rahmen der AGÖF-Datenbank aufgeführt werden. Übersicht über die gewählten Leitsubstanzen der Stoffklassen. 29
Abbildung 17: Skizze des Prüfstands AcCoS (Revisionsstand September 2020) zur systematischen Alterung von Aktivkohlebetten in anwendungsnaher Umgebung. 31
Abbildung 18: AcCoS Teststand — Zentraler Mischbehälter mit zwei angesetzten DUTs (Sorptionsbetten) und FAIMS Massenspektrometer zur insitu-Kontrolle der konditionierten VOC beladenen Testluft (links); viertes DUT (Sorptionsbett) mit Verdampfereinheit und beheizter Ringleitung (rechts). 32
Abbildung 19 — von links: an die Ringleitung angesetzter Verdampfer mit in der Revisionsphase entwickelter Dosiereinrichtung, Verdampfereinheit mit 5 Verdampfertiegeln, Dosiereinheit mit Injektorkapillaren – abgedockt von der Ringleitung. 33
Abbildung 20 — von links: Vorlagenkühlung der Leitsubstanzbehälter mit Niveausensorik, Dosierpumpen und Vorlagenkühlung. 33
Abbildung 21 — von links: Konditionierungs-Luftstrecke, thermisch isolierte Luftstrecke zur Vermeidung von Kondensation. 34
Abbildung 22: Simulation (CFD) der Wirbelströmung im Mischbehälter zur Verdünnung und Homogenisierung der mit VOC beladenen Testluft für die Sorptionsbetten. 34
Abbildung 23— von links: Innenansicht des Mischbehälters, eingesetzter Mischbehälter mit vier probeweise angesetzten Sorptionsbetten (DUTs), Mischbehälter mit Ringleitung. 35
Abbildung 24: Querschnittszeichnung eines Prüflings (DUT). DUT = Device under test, SMB = sorption material basket, SSP = Smart sensor PCB, MSP = material sampling port. 35

Abbildung 25— von links: Einzelner Sensorknoten, unisoliertes Sorptionsbett (DUT), thermisch isoliertes Sorptionsbett (DUT), gesamter Teststand AcCoS mit allen vier Sorptionsbetten (DUT). 36
Abbildung 26 — von links: Referenzprobe, Probenlanzen mit verlorenen Probenvolumina, eingesetzte Probenlanze am Sorptionbetteingang, Flansche entlang des Sorptionsbettes mit eingesetzten Probenlanzen. 36
Abbildung 27: Dashboard des Teststandes zur Darstellung des aktuellen Zustands (Temperatur, Feuchte, Druck, VOC-Konzentration, Ventilstatus etc.) für Verdampfer, Ringleitung, Mischbehälter, Luftkonditionierungsstrecke und der vier Sorptionsbetten 37
Abbildung 28: Vergleich der Massenspektrogramme über die Ausheizung einer Probe aus der ersten Randschicht (rechts) und tiefer aus dem Sorptionsbett (links). Innerhalb des Sorptionsbettes zeigen sich nur Bestandteile der Luft, in der Randschicht konnte eine signifikante Anreicherung mit VOCs festgestellt werden. 38
Abbildung 29: Vergleich sorptive Eigenschaften beider getesteter Sorptionsmaterialien (links Material A, rechts Material B). Grün zeigt die BET über die equivalente Testzeit und über die axiale Position im Sorptionsbett, blau die Beladungskapazität mit R290. 39
Abbildung 30: Sammlung und Vorbewertung der Idee. 41
Abbildung 31: Bewertung Konzepte. 42
Abbildung 32: Die ersten 10mm der 3-Omega-Sensorstruktur 2L3A. Der gesamte Sensor ist ein Streifen mit ca. 50mm Länge. Neben der 3-Omega-Struktur befindet sich auf dem Sensor auch ein nicht-isolierter IDK. So kann zusätzlich die Leitfähigkeit der Aktivkohle bestimmt werden. 43
Abbildung 33: Zur Bestimmung des Signalhubes bei der Beaufschlagung mit einem Messgas wurde im Bereich von 0.3 bis 5 Hz die Abweichung von der Luft-Kurve (hier 0%-He in rot) für verschiedene Substrat und Isolationskonfigu-rationen ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 31 zu sehen. 43
Abbildung 34: Vergleich der verschiedenen relativen Signalhübe bei der Beaufschlagung mit Helium bzw. Argon. Die Sensoren aus Polyimid und Polyetherimid zeigen tendenziell größere Signalhübe als die aus Keramik und Glas. Einen großen Einfluss hat auch die Isolation, ohne Isolation ist der Signalhub am stärksten. 44
Abbildung 35: Abbildung des Sensorlanzen- Layouts. Das PCB trägt sowohl den durch das IPM entwickelten Beladungssensor, sowie marktverfügbare Sensoren. Die Konzepte lassen sich so an gleicher Position im Sorptionsbett evaluieren. 44
Abbildung 36: Einbringung der Sensorlanzen in das Sorptionsbett 45
Abbildung 37: Sensorlanze mit integrierten Beladungssensor (grünes PCB) und Lanzenkäfig mit gewaschener Aktivkohle, um Belastung mit Kleinpartikeln an allen Sensoren zu vermeiden 45
Abbildung 38: Modulare Teststände zur Ankopplung an den Alterungs-teststand AcCoS, sowie zum Stand Alone-Betrieb unter einer Abzugskabine (links: vertikal orientiertes Sorptionsbett, oben, rechts: vertikal orientiertes Sorptionsbett unten 46
Abbildung 39: Prüfstand AcCoS zur systematischen Alterung mit angesetzten „Sensor-Chucks“ 46
Abbildung 40: Realisierte „Sensor Chucks“ in Betrieb 47
Abbildung 41: Mögliche Gefährdung durch Propanfreisetzung über den Sekundärkreise (oben) im Vergleich zur Freisetzung im Kältekreisgehäuse abgesichert über Sorptionsbett (unten) 48
Abbildung 42: Teststand zur Vermessung von Propanleckagen im Sekundärkreis einer Wärmepumpe. 48
Abbildung 43: Abscheidevorrichtung mit Manometer, Gasabscheider und Sicherheitsventil 49
Abbildung 44: Aufbau und Funktionsweise eines Schnellentlüfters. 50
Abbildung 45: Vaillant Group Systemprüfstand für Wärmepumpen mit „undichten Kältekreisen“. 51
Abbildung 46: Eingebaute Prüflinge (weiße Gehäuse, links: Nebenbett, rechts: Hauptbett) in der Prüfumgebung/ im Prüfraum in Hochdorf. 51
Abbildung 47: Historischer Verlauf der Luftwechselrate der Prüfkammer. 52
Abbildung 48: Ausströmkammer mit Verteilung der Gassensoren im Raum 52
Abbildung 49: Gezieltes Befüllen der Prüflinge mit Aktivkohle 53
Abbildung 50: Gemittelte Propankonzentration verschiedener Höhen (Layer 1 bis Layer 8) im Modellraum über der Zeit. Verwendete Aktivkohle: **Typ 1**, 30 Jahresäquivalent konditioniert 54
Abbildung 51: Gemittelte Propankonzentration verschiedener Höhen (Layer 1 bis Layer 8) im Modellraum über der Zeit. Verwendete Aktivkohle: **Typ 1**, 30 Jahresäquivalent konditioniert 54

Abbildung 52: Testmatrix Modulkonzepte 55
Abbildung 53: Systembetrachtung; Use-Case: Interne Undichtigkeit am Verflüssiger und / oder Verdampfer mit Feuchte- und Propanaustritt in das Kältekreisgehäuse. 57
Abbildung 54: Sensorlanze zur Evaluierung des FHG IPM Sensors und der marktverfügbaren Sensoren (T, r.H., R290) im Systemmodulkontext 57
Abbildung 55: Realisiertes Test- SetUp im Systemmodul- Kontext in der Modul-Testumgebung Hochdorf (schematische Darstellung) 58
Abbildung 56: Erweiterte Testumgebung in Hochdorf 59
Abbildung 57: Kältemittel, die zwischen 2016 und 2023 in geförderten Wärmepumpenanwendungen eingesetzt werden. 61
Abbildung 58: Innen stehende Hautec- Wärmepumpe vom Typ HSC/ WSW [6] 64
Abbildung 59: Auszug aus der Installationsanleitung Hautec HSC/ HSW 65
Abbildung 60: Nibe Abluftwärmepumpe vom Typ Fighter F470 für den Einbau in ein Passivhaus [7] 65

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Variantenmatrix 23
Tabelle 2: VOCs in öffentlichen Gebäuden – Substanzklassen und daraus abgeleitete Leitsubstanzen anhand der Literaturrecherche des IUTA und der AGÖF Studien 29
Tabelle 3: Spezifikationen und Kennzahlen des Prüfstandes AcCoS 31
Tabelle 4: Übersicht der im Prüfstand in Hochdorf durchgeführten Versuche 53

Teil I: Kurzbericht

1. Aufgabenstellung

1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Aufgrund steigender Emissionen von (teil-)fluorierten Kohlenwasserstoffen bei Kältekreisen trat die F-Gase-Verordnung im Jahr 2015 in Kraft. Als alternatives und natürliches Kältemittel wurde im Rahmen des **BMWi-Projektes safeHP** (FKZ: 03ET1353A/B) R290 (Propan) als Vertreter der Kohlenwasserstoffe untersucht. Propan ist ein brennbares Gas und mischt sich mit Sauerstoff zu einem explosiven Gemisch. Um einen **sicheren Betrieb** über den Lebenszyklus einer Wärmepumpe zu ermöglichen wurde die **Verwendung eines sorptiven Sicherheitselementes positiv** evaluiert. **In einer Risikobewertung zeigten sich Vorteile dieser innovativen Lösung gegenüber dem derzeitigen Stand der Technik**. Der Stand der Technik, der auch per Norm zugelassen ist, wird dadurch dargestellt, dass das Kältekreisgehäuse permanent belüftet wird. Dieses Konzept birgt energetisch Risiken, da permanent Energie aus dem Gehäuse abgeführt wird. Sicherheitsrisiken ergeben sich direkt aus Stromausfällen, die einen Ausfall der Lüftung zur Folge haben, wie auch durch den Stillstand während des Transportes. Im Rahmen der erwähnten Risikobewertung wurden verschiedene weitere Risiken aufgetan, die vor der Überführung in eine Vorserienentwicklung berücksichtigt werden müssen. Daher bedarf es noch einer weiteren Technologie- und Testentwicklung, um die entdeckten Risiken zu eliminieren und so die Voraussetzung für eine weitere Entwicklung zu schaffen, die eine bessere, im Sinne von sicherere, Alternative zum zugelassenen Stand der Technik bringen soll. Bisher kaum untersucht sind Einflüsse durch Umgebungsluft und Ausgasung aus der Wärmepumpe und **Leckagen über Wärmetauscher in die Sekundärkreisläufe,** wie beispielsweise in den Heizkreislauf. Zur Untersuchung der dargelegten Risiken umfasst die hier beschriebene Evaluation der Sicherheitseinrichtung **anknüpfend an das Projekt safeHP** folgende Punkte:

a. Die Untersuchung von Stabilität des Sorptionsbettes gegen Umwelteinflüsse und Degradation unter Umwelteinflüssen wie beispielsweise Feuchte und Lösungsmittel
b. Entwicklung eines **geeigneten Beladungssensors**, der eine Überwachung / ein Monitoring des Sorptionsbettes ermöglicht
c. Bewertung von **Sicherheitsrisiken in Sekundärkreisläufen** und Entwicklung geeigneter Maßnahmen.
d. **Integration** und Untersuchung der Sicherheitselemente im **Gesamtsystem**

Ziel des Vorhabens ist es, durch die Adressierung dieser Punkte das Umweltgefährdungs- und Gefahrenpotenzial zu minimieren und so die Marktakzeptanz für Wärmepumpen mit Kältemittel R290 im Bereich Ein- und Mehrfamilienhäuser für Heizung und Brauchwasser und die Umweltfreundlichkeit der Wärmepumpentechnologie zu steigern.

Das grundlegende Konzept ist über eine große Bandbreite von Anwendungen und Leistungsgrößen einsetzbar. Damit wird nicht nur der Heizungs- und Brauchwarmwassermarkt im Bereich Wohngebäude angesprochen. Langfristig handelt es sich um eine Schlüsselinnovation, die als neuartige Sicherheitstechnologie für brennbare und andere Kältemittel auch in größerem Leistungsbereich und für Industrieprozesse eine Anwendung finden kann.

1.2 Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele

Die Langzeitabsicherung einer innenaufgestellten Wärmepumpe, die mit einem natürlichen Kältemittel betrieben wird, soll im Wesentlichen auf drei Säulen ruhen: Einen wichtigen Grundpfeiler stellt die Untersuchung der Langzeitstabilität des Adsorbens, das in einer sorptiven Sicherheitseinrichtung eingesetzt wird, dar. Diese soll anhand von Experimenten zur Zyklenstabilität favorisierter Adsorbenzien gegenüber Modellkontaminanten wie Aceton, Toluol und Isopropanol untersucht werden. Durch das Design des Bettes und insbesondere durch die Einstellung eines Druckverlustverlaufes in einem Sorptionsbett kann die Belastung mit Kontaminanten gezielt beeinflusst werden. Dieser Einfluss soll anhand von Simulationen und Experimenten untersucht werden. Darauf aufbauend werden dann systematisch realitätsnahe Funktionsmuster definiert, die anschließend einer intensiven Prüfung unter allen bekannten Risikoaspekten unterzogen werden sollen. Hierfür soll eine Versuchseinrichtung entstehen, mit deren Hilfe man entsprechende realitätsnahe Sorptions-Sicherheitselemente unter Einbeziehung aller möglichen

Kontaminationen unter realistischen Bedingungen zyklieren lassen kann. Dazu soll ein Teil der bereits vorhandenen und im Vorgängerprojekt entstandenen Testmöglichkeiten umgebaut und erweitert werden. Ein weiterer Aspekt ist die Überprüfung der mechanischen Stabilität der eingesetzten Materialien, der aufgrund der ständigen Vibrationen, induziert durch beispielsweise den Kompressor, eine besondere Bedeutung zukommt. Durch mangelhafte mechanische Stabilität können sich Materialien zersetzen und so Strömungskanäle zusetzen, die für die Funktion des Sicherheitselementes benötigt werden. In diesem Zusammenhang ist es geplant, die mechanischen Eigenschaften verschiedener Materialien hinsichtlich der mechanischen Robustheit zu untersuchen.
Wie oben geschildert, unterscheiden sich die Aufstellräume zum Teil deutlich, weshalb das Adsorbens unter Umständen Bedingungen ausgesetzt werden kann, unter denen das Adsorbens bislang nicht untersucht wurde. Um dennoch den Zustand desselben überwachen zu können, soll die Möglichkeit evaluiert werden, das Sicherheitssystem mithilfe eines Sensors zu überwachen. Am Fraunhofer-IPM sollen im Rahmen des Vorhabens thermische und elektrische Impedanzsensoren hergestellt werden, die mit einer Schicht des Adsorbens belegt werden. Weitere Sensormechanismen beispielsweise basierend auf katalytischen Vorgängen oder der Veränderung der Leitfähigkeit sollen evaluiert und erprobt werden. Die zurzeit angestrebten Dimensionen des ‚Beladungssensors' und der Integrationsaufwand sollen ein Bauvolumen von wenigen cm³ pro Messstelle erlauben. Ziel soll sein, das Sorptionsbett durch mehrere Sensoren überwachen zu lassen und einen Gesamtzustand des Sicherheitskonzeptes detektieren zu können. So stellt die Entwicklung und Erprobung eines solchen Sensorsystems die zweite Säule dar.
Bisher kaum untersucht ist die Stabilität des Sekundärkreises. Die Absicherung desselben stellt die dritte Säule dar. Da zu den beiden zuletzt genannten Säulen bisher kaum nennenswerter Stand der Technik vorliegt, werden die bestehenden Konzepte zunächst in vorgeschalteten Workshops diskutiert und kritisch geprüft. In dieser Konzeptphase sollen dann auch weitere Rahmenbedingungen definiert werden. Das Ziel dieses Projektteils ist es, den Mechanismus des Kältemitteleintrags von der primären auf die sekundäre Seite zu verstehen und beschreibbar zu machen, um darauf aufbauend, technische alternative Lösungen zu entwickeln und technische wirksame Gegenmaßnahmen beschreiben zu können. Dazu gehört auch die Entwicklung von Testmethoden, einer Testeinrichtung, an der die entsprechenden Evaluierungsmessungen von technischen alternativen Lösungen im Rahmen eines *Proof-of-concept* überprüfen werden können.
Im folgenden Teil werden innerhalb der Säulen Entwicklungsstränge entlang der zuvor definierten Rahmenbedingungen verfolgt. Innerhalb dieses Entwicklungsteils sollen auch Prüfstände definiert werden, die im nachfolgenden Teil für Tests zur Verfügung stehen, um die erforderliche Datenlage zu schaffen, auf der eine Risikobewertung hinsichtlich der definierten Punkte und Kriterien zu leisten. Den Abschluss bilden die erfolgreiche Geräteintegration und deren Erprobung.

2. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Bislang werden in (innenaufgestellten) Wärmepumpen fast ausschließlich Kältemittel eingesetzt, die ein sehr hohes Treibhausgaspotential (GWP, *global warming potential*) aufweisen wie beispielsweise R-410A (GWP = 2088). Diese werden durch die F-Gase Verordnung bis 2025 zunehmend verknappt und dadurch verteuert. Neben anderen wird das Kältemittel R-32 (Difluormethan) als Alternative proklamiert, dessen GWP allerdings immer noch 675 Mal höher als das von CO_2 ist und das im Brandfall zu hochgefährlicher Flusssäure reagieren kann.
Mit dem natürlichen Kältemittel R290 (Propan) steht eine Alternative zu Verfügung, die ein GWP von lediglich 3 aufweist und bereits beispielsweise in Kühlschränken im Einsatz ist. Da R290 hochentzündlich ist, muss für den Einsatz in innenaufgestellten Wärmepumpen besonderes Augenmerk auf die Sicherheit im Leckagefall gelegt werden. Dies ist bei Kühlschränken nicht der Fall, da die Kältemittel-Füllmenge bei Kühlschränken aufgrund der wesentlich geringeren Leistung deutlich geringer ist (Kühlschränke < 150 g vs. Wärmepumpe ~ 1000g)..
Es gibt verschiedenste Wärmepumpenhersteller, die luftbeaufschlagte Wärmpumpen mit R290 als Arbeitsfluid entwickelt haben und vertreiben. Für die Außenaufstellung solcher Anlagen gibt es nach EN 378 keine Restriktionen. Demnach sind zusätzliche Gaswarnsysteme nicht nötig und es gibt keine Beschränkung der maximalen Kältemittelfüllmenge, sondern lediglich die Vorgabe eines minimalen Abstands für die Aufstellung. Derzeit vertreiben beispielsweise folgende Hersteller ein solches Gerät:

- ALPHA INNOTEC - Außenaufstellung LWD A-Serie
- Hautec – Außenaufstellung HWL-AS-Serie
- Novelan – Außenaufstellung LDA-Serie

- Neura – Produkt: Neuratherm
- Acalor – Produkt: ACALOR-Luftwärmepumpe mit Direktkondensation

Bei den innenaufgestellten Wärmepumpen gibt es beispielsweise die Brauchwasserwärmepumpe LWA 100 von Stiebel-Eltron mit einer Heizleistung von 3 kW. Das Gerät hat laut der „Bedienungs- und Installationsanleitung" eine Kältemittelfüllmenge von 150 g Propan (R290). Ein expliziter Verweis wird kältemittelseitig auf die EN 378 angegeben, jedoch kann die Wärmepumpe bedingt durch die geringe Füllmenge ohne Restriktionen im Sinne der Regelwerke oder einer Gaswarnanlage betrieben werden.
Neben der erwähnten LWA 100 gibt es die Abluftwärmepumpen von Nibe mit den Typen F370 und F470, welche Propan als Kältemittel mit einer nominalen Füllmenge von 440 g und 400 g, beinhalten. Der Kältekreis ist in der kontrollierten Wohnungslüftung installiert. Demzufolge kann sich Propan bei einer Kältemittelleckage in entsprechenden Räumen verteilen. Ein expliziter Verweis auf die EN378 oder eine ähnliches sicherheitstechnisches Regelwerk für brennbare oder explosive Gase ist nicht hinterlegt. Nach dem Datenblatt, das folgenden Hinweis beinhaltet: „Im Aufstellungsraum der Wärmepumpe muss ein Luftvolumenstrom mit mindestens 5 l/s (18 m³/h) vorliegen. Der Aufstellungsraum muss ein Volumen von mindestens 8 m³ aufweisen", kann auf eine permanente Raumlüftung als Sicherheitskonzept rückgeschlossen werden. Dies würde der Anforderung nach der EN 378 Abschnitt 6.2.14 „Anforderungen an belüftete Gehäuse" entsprechen, stellt aber hinsichtlich dem Teil 1 Abschnitt C.3 „Grenzwerte für die Kältemittel-Füllmenge auf Grund der Brennbarkeit bei Komfort-Klimageräten oder Wärmepumpen" einen „grauen Bereich" dar. Auf diesen Teil C.3 wird weder durch ein Gaswarnsystem, Berücksichtigung der maximalen Füllmenge bzw. der minimalen Raumfläche noch der Differenzierung des Aufstellungsraums eingegangen.
Von Hautec wird neben den außenaufgestellten Modellen noch die Produktreihe Carno angeboten, die innenaufgestellt mit dem Kältemittel R290 betrieben werden kann. Das Sicherheitskonzept ist auf permanente Ventilation mit Luft aus dem Aufstellraum ausgelegt, muss allerdings durch den Handwerker komplettiert werden.
Für drei verschiedene Gebäudetypen wurden der Heizbedarf und der korrespondierende Wärmeverlust durch einen leistungsschwachen Lüfter abgeschätzt und ist in Abbildung 1 dargestellt. Wie zu erkennen, geht ein Sicherheitskonzept basierend auf permanenter Durchlüftung mit einem permanenten Energieaustrag einher, was eine Effizienzminderung von teils deutlich über 10 % (im Neubau) zur Folge hat.

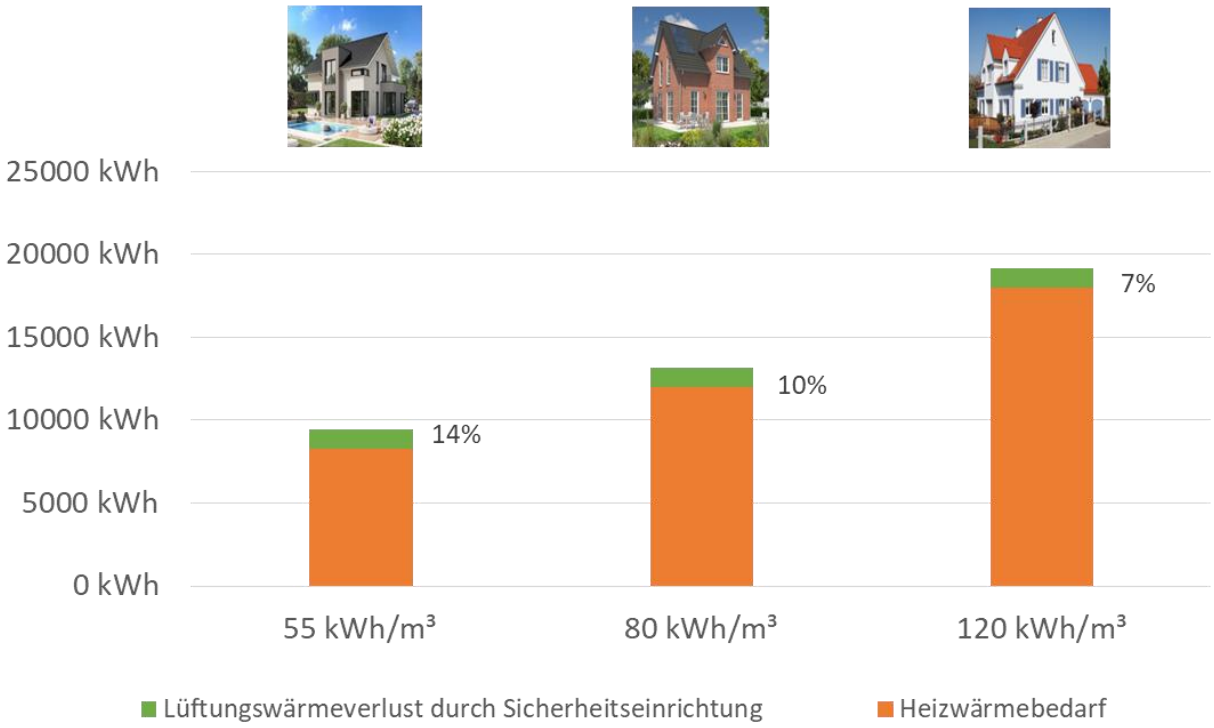


Abbildung 1: Heizwärmebedarf und korrespondierender Wärmeverlust durch ein Sicherheitskonzept basierend auf Ventilation abgeschätzt für drei verschiedene Gebäudetypen.

Den aktuellen Stand der Wissenschaft, der über die Verwendung eines belüfteten Gehäuses hinausgeht, stellt das Forschungsprojekt safeHP (FKZ: 03ET1353A/B) im Wesentlichen dar. In diesem Projekt werden derzeit Ansätze für einen sicheren Betrieb von innenaufgestellten Wärmepumpen untersucht, die mit einem natürlichen Kältemittel, im Wesentlichen R290, betrieben werden. Im bisherigen Projektverlauf hat sich die Verwendung von Aktivkohle zur sorptiven Bindung des ausgetretenen Propans als besonders vorteilhaft erwiesen. Ein erster Nachweis konnte erfolgreich erbracht werden. Aus einer Risikobewertung verschiedener Sicherheitskonzepte durch den TÜV Süd geht deutlich hervor, dass zum einen ein Sicherheitskonzept benötigt wird, zum anderen aber ein innovatives Sicherheitskonzept basierend auf Sorption einer normativen Lösung deutlich überlegen ist. Aus einem sorptiven Sicherheitskonzept ergeben sich weiterhin Vorteile durch den Schutz im Transportfall und im stromlosen Zustand (bei Stromausfall, ausgeschaltetem Gerät z. B. während eines Urlaubs oder während der Lagerung der Wärmepumpe bei Großhändler oder Fachhandwerker.) Zudem unterliegt die normative Lösung immer dem Risiko einer fehlerhaften Installation durch den Fachhandwerker beziehungsweise der Gefahr, dass aufgrund des Aufwands entgegen der Vorschrift auf eine Installation verzichtet wird. Eine sorptive Lösung ist demgegenüber inhärent sicher.

Der Stand der Technik für die aus den Risikoanalysen abgeleiteten Themen:

- Thema a): Langzeitstabilität des Sorptionsmaterials Querkontamination
- Thema b): Monitoring des Beladungszustandes
- Thema c): Sicherheit der Sekundärkreisläufe (Quellen-/ Heizkreislauf)

ist nachfolgend dargestellt:

Zu Thema a): Langzeitstabilität des Sorptionsmaterials

Als Gebrauchsdauer einer Wärmepumpe werden 20 Jahre angenommen, während der die Sicherheitseinrichtung im direkten Kontakt mit der Umgebung stehen kann und dann auch Fremdstoffen ausgesetzt wird. Erste Versuche zum Verhalten des Adsorbens im Kontakt mit Fremdstoffen (bspw. zur bevorzugten Adsorption einer unerwünschten Komponente) wurden in safeHP durchgeführt und die Langzeitstabilität war im Rahmen des durchgeführten Nachweises inhaltlich thematisiert, aber bis auf die Einflüsse der Luftfeuchte auf die Kältemittel-Adsorptionsfähigkeit wurden bislang keine tiefgreifenden Untersuchungen in Bezug auf Wechselwirkungen mit anderen Substanzen durchgeführt.

Da das Sicherheitskonzept gegenüber der Umwelt offen sein kann, kann das Adsorbens permanent durchströmt werden. Neben der kalendarischen Alterung des Adsorbens wechselwirken daher vor allem die in der Umgebungsluft auftretenden Fremdstoffe, beziehungsweise die Fremdstoffe, welche intrinsisch in der Wärmepumpe selbst verbaut sind (z. B. Lösungsmittel/ sonstige Rückstände auf Blechen/ Ausdünstungen aus Dämm-/ Isoliermaterialien etc.). Erste Ergebnisse aus safeHP deuten hier auf einen massiven Einfluss durch beispielsweise Aceton auf die Adsorptionsfähigkeit des Adsorbens hin. Richtwerte für realistische Konzentrationen im Gebäude sind schwer zu finden. Allerdings bieten Werte, veröffentlicht durch die Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e.V. (AGÖF), Anhaltspunkte [1]. Als mögliche Bestandteile der Umgebungsluft werden Aromate, Ketone, Alkohole, Terpene und andere Stoffklassen angegeben. Die genaue Zusammensetzung von Stoffen, die in Atmosphäre vorhanden sind, wird sich in Abhängigkeit des Aufstellraums stark unterscheiden.

Erste überschlägige Berechnungen ergeben einen täglichen Luftwechsel zwischen Kältekreisgehäuse unter Betriebsbedingungen hin zum Aufstellraum, aufgrund von Druckschwankungen, der sich über eine angenommene Produktlebensdauer von 15 Jahren auf ca. 180 m³ kumuliert. Im Rahmen von safeHP wurden und werden noch Experimente auf der Materialebene unter Berücksichtigung mehrerer Materialkandidaten durchgeführt, die helfen sollen, den Einfluss einzelner Komponenten auf die Adsorptionsleistung zu identifizieren. Die Übertragung dieser Ergebnisse von der Material- auf die Systemebene ist das vorranginge Ziel dieses Teils des neuen Vorhabens.

Zu Thema b): Monitoring des Beladungsstandes

Es gibt grundsätzlich drei verschiedene Gassensorklassen, die zur Detektion von Propan genutzt werden können. Die vielseitigste, aber auch teuerste, ist die optische Detektion von R290, meist erfolgt die Messung mittels Infrarotspektroskopie. Die Messgeräte können auch für sehr kleine Propanmengen optimiert werden. Allerdings sind sie empfindlich gegen Verschmutzung, da diese das Messsignal verfälschen. Deutlich billiger sind Metalloxid-Gassensoren oder Pellistoren. Beide Prinzipien messen allerdings unspezifisch die Anwesenheit von brennbaren Gasen oder Dämpfen. Für den Einsatz in einem typischen

Heizungskeller sind sie zudem nur bedingt geeignet, da sie durch Ausgasungen von z. B. Silikonfugen vergiftet werden können. Beide Sensortypen benötigen Sauerstoff für die Detektion des brennbaren Gases. Im Fall hoher R290-Konzentrationen besteht bei den Pellistoren außerdem die Gefahr der Überhitzung und damit verbundenen Zerstörung der sensitiven Schicht.
Bei intakter sensitiver Schicht ändert sich die Temperatur des Sensors, sobald er mit R290 in Kontakt kommt. Diese Temperaturänderung wird über einen Platinwiderstand im Inneren des Sensors detektiert. Ist die sensitive Schicht durch Überhitzung beeinträchtigt bleibt die Temperatur konstant, der Platinwiderstand im Inneren detektiert die Überhitzung allerdings auch nicht, da sie zu schnell stattfindet. Der dann defekte Sensor unterscheidet sich in seinen von außen messbaren Kenngrößen (Grundwiderstand) nicht vom intakten Sensor, kann aber kein Gas mehr detektieren. Daher ist dieses Sensorverfahren für die hier adressierte Applikation weniger geeignet. Alle drei Sensortypen können die Beladungszustand des Absorbens nicht detektieren, ein Beladungssensor muss daher komplett neu entwickelt werden.

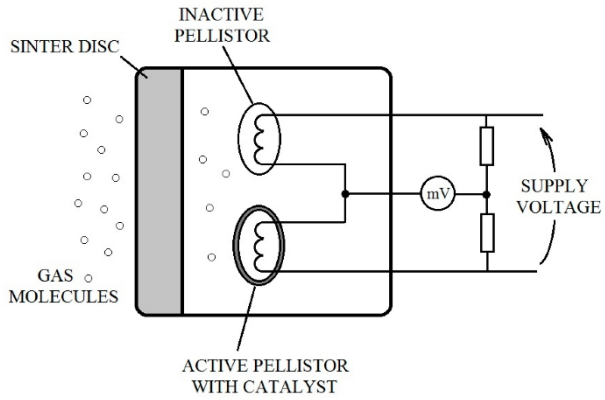


Abbildung 2: Aufbau und Funktionsweise eines Pellistors. Trifft brennbares Gas auf die mit Katalysator beschichtete Perle im Pellistor erhöht sich deren Temperatur und der Widerstand des darin enthaltenen Platindrahtes ändert sich. Dies kann als Spannungssignal im Vergleich zu einen nicht beschichteten Perle gemessen werden. [4]

Ein neu zu entwickelnder Sensor soll parallel zur Gebrauchsdaueranalyse des Adsorbens die Funktionalität der Sicherheitseinrichtung absichern und so einen integralen Bestandteil der Sicherheitseinrichtung darstellen. So wäre gewährleistet, dass im Falle einer Leckage ausreichend Sorptionsleistung zur Verfügung steht.
Es stehen verschiedene Methoden zur Messung des Beladungszustandes des Sorptionsmaterials zur Verfügung wie volumetrische, gravimetrische, isotherme, konduktive und dielektrische Verfahren. In diesem Teil des Projektes sollen verschiedene Methoden evaluiert und für eine ausgewählte Lösung bis zum Funktionsmuster geführt werden.

Zentrale Methode kann die Messung der Permittivität des Sorptionsmaterials sein, die sich nach dem jetzigen Erkenntnisstand relativ einfach umsetzen und integrieren lässt. Dabei wird das Sorptionsmaterial einem elektrischen Wechselfeld mit variierender Frequenz ausgesetzt und die Permittivität über den Frequenzbereich bestimmt (siehe Darstellung in Abbildung 3). Eine mögliche Beladung des Sorptionsmaterials wird die dielektrische Eigenschaft des Materials über die Frequenz ändern. Diese Änderungen sollten Charakteristika für den Beladungszustand und die Art der adsorbierten Substanzen sein.

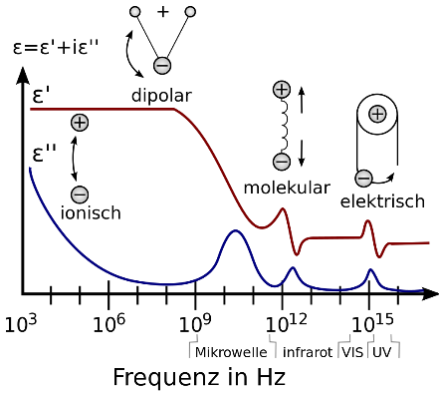


Abbildung 3: Abhängigkeit der Permittivität (komplex) von der Frequenz, Art der Wechselwirkung des elektrischen Wechselfeldes mit dem Dielektrikum [Quelle: wikipedia]

Zusätzlich zur Abhängigkeit der Permittivität des Sorptionsmaterials vom Beladungszustand können auch weitere Messverfahren angewandt und die Signale miteinander korreliert werden. Die Steigerung der Relevanz des Beladungszustandes und eine mögliche Unterscheidung der adsorbierten Substanzen könnten damit möglich sein.

Durch die Beladung eines Adsorbens mit R290 ändert sich ferner dessen Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität, sodass eine Messung der thermischen Impedanz den Beladungsgrad wiedergeben kann. Ein mögliches Sensorlayout zeigt Abbildung 4. Hier ist unter anderem eine Heizerstruktur R_{Bol} zu sehen, über die periodische Wärmeströme in das Testmedium eingeprägt werden können. Über eine spezielle Auswertung (3-Omega Methode) kann die hierfür erforderliche Temperaturamplitude und Phase frequenzabhängig gemessen werden. Mit dieser thermischen Impedanzanalyse können Rückschlüsse auf Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit, und damit auf den Beladungsgrad des Adsorbens gewonnen werden [4].

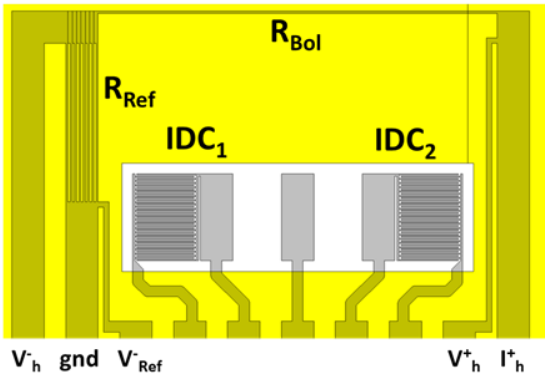


Abbildung 4: Beispielhafte Sensorstruktur, unter anderem mit einem Heizerwiderstand R_{Bol}, auf den eine Testschicht des Adsorbens aufgebracht wird. Durch diesen wird ein Wechselwärme-strom in das Testmedium eingeprägt und die erforderliche Temperaturamplitude gemessen. Mit dieser thermischen Impedanzanalyse können Rückschlüsse auf Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit, und damit auf den Beladungsgrad des Adsorbens gewonnen werden [4].

Erste Vortests haben gezeigt, dass Sensorstrukturen wie in Abbildung 4, die mit einem Adsorbens beschichtet wurden, eine Beladung mit R290 registrieren können. Die Messergebnisse sind in Abbildung 5 zu sehen. Dargestellt ist die Temperaturamplitude über der Frequenz des Anregungsstroms. Die Sensorstruktur wird dazu mit einem Wechselstrom der Frequenz ω zwischen GND und I^{+}_{h} beaufschlagt. Dabei entsteht Wärme mit definierter Heizleistung, die dadurch entstehende Temperaturänderung ist abhängig von den thermischen Eigenschaften (den thermischen Massen) der Umgebung, hier die des Absorbens. Ohne R290 ist die gemessene Temperaturamplitude größer als mit, da sich durch die Adsorption des Kältemittelsmittels die thermische Masse des Filmes erhöht hat, was eine Verringerung der Temperaturamplitude bewirkt. Die Sensorstrukturen in Abbildung 4 beinhalten auch Interdigitalkondensatoren (IDC_1 und IDC_2) mit der die Permittivität des Adsorbens über eine elektrische Impedanzmessung ermittelt werden können. Über die Messung beider Größen kann zwischen einer Beladung mit Wasser und mit R290 unterschieden werden. Das skizzierte Messverfahren benötigen keine Anwesenheit von Luftsauerstoff wie handelsübliche Propandetektoren s.g. Pellistoren.

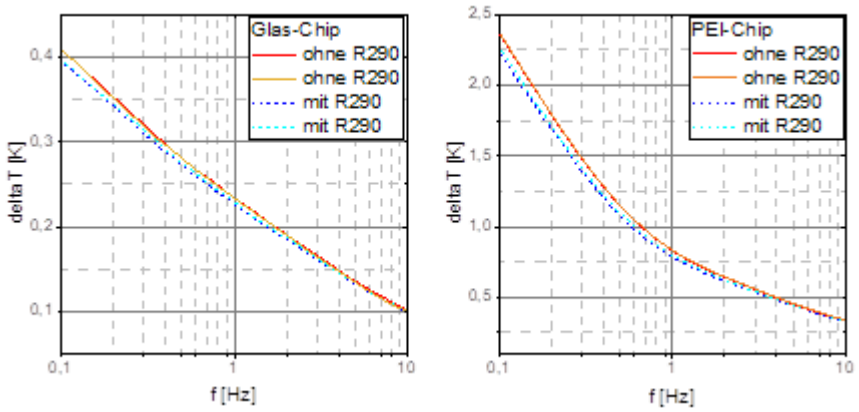


Abbildung 5: Vermessung der Adsorption von R290 durch thermische Impedanzmessung mittels Messstrukturen auf Glas- bzw. PEI-Chips die mit einer Aktivkohlebeschichtung als Absorbens ausgestattet wurden.

Diese vielversprechenden Vortests wurden mittels einer am Fraunhofer IPM vorhandenen Sensorplattform durchgeführt, diese ist zwar sehr flexibel, für den vorgesehenen Einsatzzweck aber nur bedingt tauglich. So sollen im Rahmen des Projektes die Empfindlichkeit gesteigert werden und Querempfindlichkeiten zu Temperaturänderungen und auf die Sensorumgebung minimiert oder kompensiert werden. Außerdem muss die notwendige Elektronik vereinfacht und dadurch günstiger und robuster werden, um in einem Wärmepumpensystem eingesetzt werden zu können. Weiterhin zu berücksichtigen ist der Aspekt des Explosionsschutzes.

Zu Thema c): Sicherheit der Sekundärkreisläufe (Quellen-/Heizkreislauf)

Aktuell sind für die traditionellen Sole-/ Wasser bzw. Wasser-/ Wasser- Anwendungen bis auf wenige Ausnahmen Plattenwärmetauscher- Technologien im Einsatz. Durch den Umstieg von Klasse 1-Kältemittel (R407C/ R410a/…) auf Klasse A2L/ A3-Kältemittel wechselt auch ein statistisches Problem die Klasse. Das praktische Problem besteht darin, dass sich brennbares Kältemittel im Leckagefall über den Heizungswasserkreislauf in der Heizungsanlage verteilen und sich vorzugsweise in systemdruckarmen, strömungsberuhigten Zonen (→ ungünstigster angebundener Heizkörper) ansammeln (siehe schematische Darstellung in Abbildung 6).

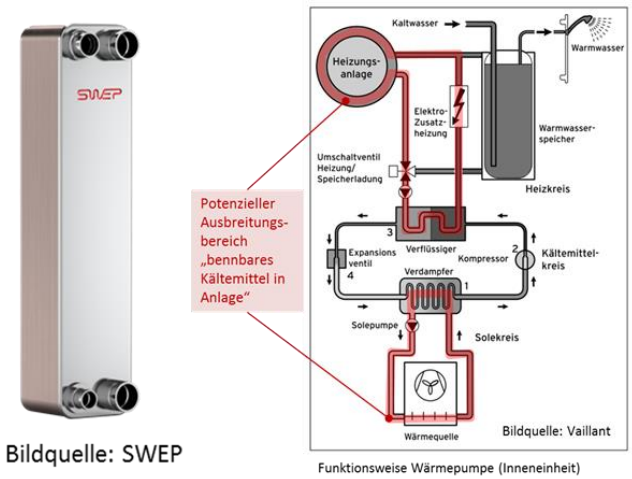


Abbildung 6: Typischer Plattenwärmeübertrager der Firma SWEP (links) und Darstellung potenzieller Leckageauswirkung im Sekundärkreis (rechts).

Nach ersten eigenen Tests reicht die normativ (EN 60335-2-40) beschriebene Mindestlösung in Form eines Entlüftungsmoduls in dem jeweiligen Fluidstrang nicht aus, um das Problem bei einer Kältemittelleckage in jedem Fehlerfall zu beherrschen. Die Norm geht immer davon aus, dass das Kältemittel gasförmig in den Heizkreis übergeht und dass es sich im Entlüftungsgehäuse mit entsprechend hohen Volumenanteilen dort sammelt und abgeschieden werden kann. Vorversuche haben jedoch gezeigt, dass insbesondere bei sehr kleinen Leckageraten steigende Anteile an Kältemittel in Lösung gehen können und für die Entlüftungsfunktion in den klassischen Entlüftern nicht zur Verfügung stehen. Dieser Anteil verteilt sich in der Heizungsanlage, bis Strömungs-, Druck- und Temperaturbedingungen geeignet sind, dass sich das R290 lokal sammelt. Zu vermuten ist nun, dass ein hydraulisch ungünstig angebundener Heizkörper möglicherweise Ziel der gelösten Kältemittelanteile sein kann. Dieser Mechanismus ist allerdings recht wenig erfasst, geschweige denn systematisch analysiert worden. Andere Hersteller ziehen sich derzeit auf die Norm zurück und nehmen das Risiko in Kauf oder verwenden doppelwandige Wärmeübertrager, auf die weiter unten eingegangen wird.

Das Risiko für den Endanwender besteht nun darin, dass sich in einem, für den Wärmepumpenbetrieb ausgelegten, dreilagigen Heizkörpertyp (Bauhöhe 600 mm/ Breite 1200 mm) mit einem nominalen Wasserinhalt von 12 Litern, bei einer angenommenen Gasdichte von 2,01 g/ dm³ (@ 1bar Überdruck), nahezu 24 Gramm Kältemittel-/ Luftgemisch ansammeln können (zum Vergleich: Füllgewicht Einwegfeuerzeug ~4 Gramm).
Gerade in diesem Szenario muss natürlich auch damit gerechnet werden, dass auch der normale Nutzer und nicht nur das geschulte Fachpersonal versucht, den damit verbundenen Missstand („Heizkörper wird nicht warm“) durch Entlüften zu beheben.
Das bislang wenig beachtete, theoretische Risiko einer „internen Undichtheit des Verflüssigers bzw. des Verdampfers“ erhält aus Risikomanagementsicht unter Berücksichtigung der angenommenen Ausfallzahlen eine Handlungsrelevanz.
Im Vergleich zur Verdampferseite ist besonders verflüssigerseitig das Leckagerisiko sorgfältig zu betrachten, da zum einen die Drucklage im Kältekreis kritischer ist (~28 bar bei 75°C gegenüber ~6 bar bei 7°C) und zum anderen das Kältemittel vom Kältekreis in den Heizwasserkreislauf übertritt.
Bei den Plattenwärmeübertragern besteht im Anlagenbau (insbesondere in der chemischen Prozesstechnik) diese Problematik schon seit längerer Zeit, sodass im Bereich der Plattenwärmeübertrager technische Lösungen zur Vermeidung von Fluidübertritten von einer zur anderen Fluidseite bereits vorhanden sind. So genannte Doppelwand-Plattenwärmeübertragersysteme sind dort bereits im Einsatz. Diese haben allerdings für den haustechnischen Großserieneinsatz einige Nachteile wie zum Beispiel eine Verdopplung des Bauraumes und damit auch der Kosten sowie eine reduzierte Wärmeübertragereffizienz.
Vereinzelte Lieferanten arbeiten an der Entwicklung von zusätzlichen Schutzschichten in Form einer zweiten Platte. Ziel ist es, die Anfälligkeit für Leckagen zu verringern und Leckagen früher zu identifizieren. Dies

führt jedoch zu einer höheren Grädigkeit, was im Umkehrschluss zu höheren thermischen Widerständen führt und dies wiederum zu einer Reduzierung der thermischen Effizienz.
Eine Statistik dieses Szenarios wird bisher nicht geführt, da sich die Brisanz erst aus der Verwendung von R290 im Kältekreis ergibt.

3. Ablauf des Vorhabens

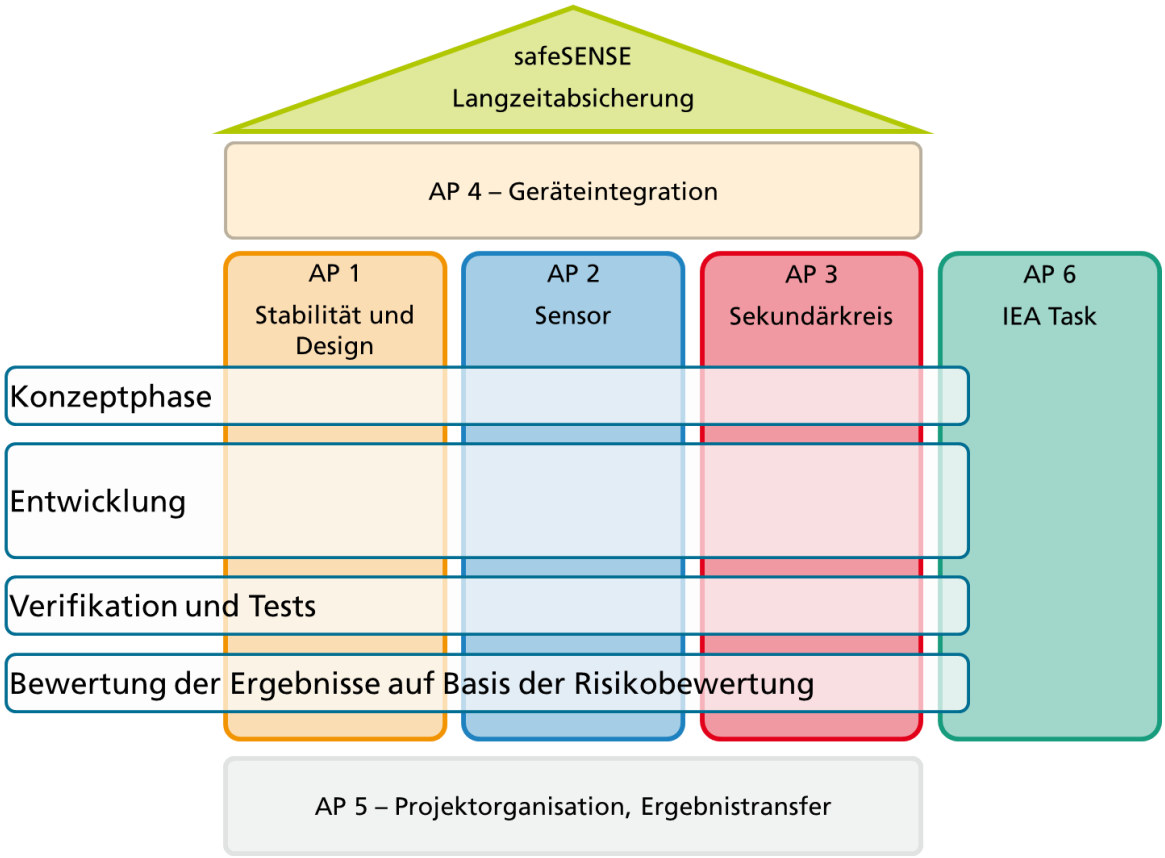


Abbildung 7: Arbeitsstrukturplan

4. Projektergebnisse

Nachfolgend sind die Ergebnisse, welche während der Durchführung des Verbundvorhabens erreicht wurden, in Stichpunkten aufgeführt:

4.1 ISE

- Projektkoordination
- Mitarbeit bei Definition von Randbedingungen und Lastenheften
- Durchführung von Degradationstests auf Modul- und Materialebene
- Simulation und Bewertung der Belastung der Aktivkohle
- Ableitung von Designparametern für ein sorptives Sicherheitselement
- Vermessung Propan-Adsorption
- Aufbau und Durchführung von Tests
- Aufbau und Betrieb eines Teststandes zur Messung von Leckage in den Sekundärkreislauf

4.2 IPM

- Mitarbeit bei Definition von Randbedingungen und Lastenheften
- Entwicklung und Herstellung optimierter Sensorlayouts
- Tests an Sensoren
- Prüfung der Querempfindlichkeit

4.3 VAILLANT

- Randbedingungen für Aktivkohle: Lastenhefte und Designanforderungen aus System- und Aufstellungsanforderungen
- 2 Aktivkohlen ausgewählt
- Lebensdauerteststand (AcCoS) erweitert und optimiert
- Lebensdauerrisiken für 2 Aktivkohlen getestet und bewertet
- Teststand in Prüffeld Hochdorf ertüchtigt und für Vermessung unterschiedlicher Moduldesigns und Anforderungen erweitert
- Aktivkohle-Bettdesigns erarbeitet, bewertet, aufgebaut und getestet
- Beladungssensor: Innovative Technologie evaluiert und bewertet und mit Stand der Technik verglichen
- Vermeidungsstrategie R290 im Heizkreis und Gesamtsystem definiert und Anforderungskatalog erstellt, Konzept für Vermeidungsstrategie bewertet, finales Konzept für Vermeidungsstrategie ausgewählt und bewertet
- Integrationsfähigkeit Aktivkohlekonzept ins Gesamtsystem bewertet

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Durch den Zusammenschluss der Projektpartner und des Fraunhofer ISE wird ein hochqualifiziertes Konsortium gebildet. Durch die verschiedenen Kernkompetenzen der einzelnen Partner steht ein breites sowie detailliertes Fachwissen zur Verfügung. Synergien können auf diese Weise sehr gut gebildet werden.

Die Firma **Vaillant** hat eine mehr als 150-jährige Erfahrung im Umgang mit brennbaren Gasen und der dazugehörigen Normen- und Sicherheitsrichtlinien. Die langjährige Marktpräsenz als Hersteller von Heizgeräten, insbesondere auch als Hersteller von Wärmepumpen, impliziert ein breites Wissen über die Marktteilnehmer und deren Anforderungen. Für die aktuelle Entwicklung existiert bereits ein solides Vorwissen aus dem laufenden Projekt safeHP, aber auch aus Projekten, die in der Vergangenheit bearbeitet wurden wie beispielsweise das Projekt MOSKWA (Entwicklung eines Mehrquellen-Wärmepumpen-Heizungssystems). Mit der Vorstellung einer außenaufgestellten R290 Wärmepumpe im Rahmen der ISH 2019 hat sich Vaillant zudem zur Verwendung von natürlichen Kältemitteln klar positioniert und breites Wissen zum Umgang mit R290 erarbeitet.

Das **Fraunhofer ISE** verfügt ebenfalls über langjährige Erfahrung insbesondere in der Material- und Komponentenentwicklung für Sorptionssysteme, aber auch in der Entwicklung und Charakterisierung von Komponenten für Kompressionssysteme, insbesondere auch für Verwendung mit natürlichen Kältemitteln. Dies zeigt sich in der hervorragenden Ausstattung in Form von Laborinfrastruktur und Prüfmöglichkeiten, aber auch in einem tiefen Expertenwissen um die Prozesse während der Adsorption und während des Betriebs von Kompressionssystemen.

Fraunhofer IPM untersucht und entwickelt seit über 20 Jahren neue Technologien und Systeme für die Sensorik. Die Abteilung Gas- und Prozesstechnologie (GP) hat durch die Entwicklung und Erforschung von Gassensoren unter anwendungsorientieren Aspekten eine große Kompetenz erworben, um mit höchster Selektivität und Genauigkeit Gaskonzentrationen zu bestimmen. Die Entwicklung von thermischen Sensoren, welche, wie zum Beispiel Pellistoren, durch aktive Sensorschichten ein messbares thermisches Signal generieren, ist einer der Forschungsschwerpunkte der letzten Jahre. Voruntersuchungen mit verschiedenen sorptionsfähigen Schichten und das Auslesen deren Beladung waren sehr erfolgversprechend. Für die Herstellung eines miniaturisierten Beladungssensors verfügt Fraunhofer IPM mit ca. 400 m² Reinraum über die notwendige Infrastruktur für die technologische Entwicklung. Für die

Charakterisierung der zu verwendenden Komponenten sowie für den Anwendungstest stehen zwei Gasmischlabor, die auch für toxische und brennbare Gase zugelassen sind, zur Verfügung. Weiterhin sind thermische Untersuchungen zur Charakterisierung möglich. Auf dem Gebiet der Gassensorik wurden schon zahlreiche Industrieprojekte durchgeführt; dabei überwog der Anteil von Projekten mit kleinen und mittelständischen Unternehmen.

Teil II: Eingehende Darstellung der Ergebnisse

1. Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse

Das Vorhaben safeSENSE gliederte sich in fünf übergeordnete Arbeitspakete (AP1 – AP5) und ein zusätzliches Arbeitspaket, das die Mitarbeit in einer IEA-Task beinhaltete (AP6). Die einzelnen Arbeitspakete wurden jeweils – sofern sinnvoll – in Teilarbeitspakete kleinerer Größe aufgeteilt. In der Regel wurden die Arbeitspakete mit einer Konzeptphase eingeleitet, in denen spezifische Grundlagen und Konzepte für die anschließende Problembearbeitung erarbeitet wurden. Die Anlage und der Umfang dieser Konzeptphase ergaben sich aus den Erfahrungen im Projekt safeHP. Hier haben sich Instrumente wie beispielsweise Problemlösungsprozesse als sehr wirkungsvoll und in der Rückschau sehr effizient erwiesen, insbesondere, da die bearbeiteten Problemstellungen bisher überwiegend auch in der wissenschaftlichen Literatur nicht bearbeitet wurden und daher vor allem auch Statistiken, die den besonderen Anforderungen von R290 als Kältemittel Rechnung tragen, nicht vorhanden waren. Diese Instrumente erfordern allerdings das Zusammenkommen verschiedener Personengruppen und Kompetenzen, wodurch sie einen großen Personalaufwand zur Folge haben. Ebenfalls allen Arbeitspaketen gemein und den Erfahrungen im Vorgängerprojekt safeHP geschuldet, wurde ein Unterarbeitspaket „Bewertung der Ergebnisse" integriert, das die Zusammenführung großer Mengen an Ergebnissen zu einem größeren Ganzen beinhaltete und eine umfassende Bewertung dieses Bildes ermöglichen sollte.

1.1 AP 1 Evaluierung des Sorptionsbettes – Untersuchung von Stabilität und Design

Die Aktivitäten innerhalb des Projektes safeSENSE schließen sich direkt an die Ergebnisse des Vorläufers safeHP (FKZ: 03ET1353A/B) an. Arbeitsergebnis des Projektes safeHP war die technische Machbarkeit eines auf Adsorption basierenden Sicherheitskonzeptes, welches in der Lage ist, bedingt durch Leckage des Kältekreises, austretendes brennbares Kältemittel aufzunehmen und ein Ausströmen in den Aufstellungsraum zu unterbinden.
Aufstellsituationen von Wärmepumpen unterscheiden sich in einer denkbar großen Bandbreite, wodurch sich auch für die Sicherheitseinrichtung entsprechend große Unterschiede hinsichtlich der Belastung mit Fremdstoffen über die Produktlebensdauer hinweg ergeben. Aufgrund der Neuheit der Problemstellung waren hierzu wenige Untersuchungen zu Beginn des Projektes verfügbar. Das gleiche gilt für Materialien, die innerhalb der Wärmepumpe verbaut sind, wie beispielsweise Dicht- und Dämmmaterialien. Zunächst sollten daher in der Konzeptphase Randbedingungen und Lastenhefte definiert werden. Anschließend sollten präferierte Adsorbentien auf ihre Degradation in Beispielexperimenten untersucht werden. Simulationen der Belastung und von Zyklen auf Modul bzw. Systemebene sollten die Basis für eine Abschätzung der Gebrauchsdauer eines Adsorbens legen. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden Designparameter abgeleitet und verschiedene Erprobungsmuster hergestellt. Im weiteren Verlauf erfolgte die Planung und Realisierung einer Testeinrichtung, die eine Evaluierung dieser Muster auf Material- und Modulebene ermöglichen sollte. Im Zentrum stand die Entwicklung geeigneter Schutzmaßnahmen zur Stabilisierung des Sorptionsmaterials und des Moduls über die Spanne des Produktlebenszyklus, bzw. zur Evaluierung von Risiko minimierten Gebrauchsdauern für das Sicherheitskonzept.

Das Arbeitspaket (AP1) gliederte sich in **vier** Teile:
(1) Definitionsphase
In der Definitionsphase wurde Input für die folgenden Arbeitspakete erarbeitet. Um eine solide Grundlage für Materialalterungstests ableiten zu können bedarf es einer genauen Vorstellung davon, wo die Wärmepumpen beim Kunden aufgestellt sind. In Abhängigkeit vom Aufstellraum ergeben sich unterschiedliche Profile für Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Konzentrationen verschiedener Fremd- und Schadstoffe in der Raumluft bzw. innerhalb des Gehäuses des Kältekreises. Im Rahmen der Definitionsphase wurde die große Bandbreite an Belastungsszenarien geclustert und typische Aufstellräume definiert und charakterisiert, welche durch Umfragedaten (DACH) gestützt worden sind.
Für die Definition relevanter Belastungen für das Sicherheitskonzept aus der Raumluft mussten entsprechende Datenquellen gefunden werden.
Durch die AGÖF konnte eine sehr große Datenbasis erschlossen werden. Für eine Vielzahl typischer Gebäudeteile, überwiegend Wohn- und öffentliche Gebäude stehen Daten zur Verfügung. Diese Datenbasis musste entsprechend geclustert werden, um VOC-Konzentrationen von typischen Aufstellungsräumen zu generieren oder abzuleiten.

(2) Simulation und Evaluierung der Pendelströmung als Grundlage des Belastungsszenarios
Aufgrund von Schwankungen der Außentemperatur und des Umgebungsdrucks kommt es in Verbindung mit den Temperaturwechseln des Kältekreises zu einer regelmäßigen Verschiebung von Luft über das offene Adsorbens. Um dieses „Atmen" des Kältekreisgehäuses quantifizieren zu können, wurden Druck- und Temperaturverläufe des Systems in einer geeigneten Simulationsumgebungen abgebildet. Die dazu notwendigen Temperaturverläufe, bedingt durch die Belastungen des Wärmepumpensystems, wurden durch Feldtestdaten vergleichbarer Leistungsklassen von Wärmepumpensystemen generiert. Diese Lastprofile fanden dann Eingang in eine Simulation, deren Ergebnis das verschobene Volumen innerhalb eines Zyklus der Pendelströmung darstellt.

(3) Ableitung des Belastungsprofils
Die untersuchte Pendelströmung ist die Grundlage für eine mögliche Degradation des Sorptionsmaterials über den Lebenszyklus des Wärmepumpensystems.
Aus den so definierten Räumen wurden Randbedingungen für einen beschleunigten Degradationstest über ein Produktlebenszyklusäquivalent abgeleitet. Die Auswirkungen von isolierten Kontaminanten aber auch kompletten Mischungen auf die Stabilität der Aktivkohlen sollten untersucht werden, um relevante Schadstoffe zu identifizieren und zu klassifizieren.
Die unter (1) bestimmten VOC- Belastungsdosen wurden in Substanzklassen zusammengefasst. Eine mögliche Degradation des Sorptionsmaterials durch die ermittelten Substanzklassen wurde unter Kontakt des Sorptionsmaterial mit der flüssigen Phase der jeweiligen Leitsubstanz einer Klasse untersucht.
Die gewonnenen Ergebnisse wurden mit den Auswertungen aus drei AGÖF-Studien korreliert und zu einem Belastungscocktail (95%-Perzentile) zusammengefasst.

(4) Konzept des beschleunigten Degradationstestes und Aufbau
Das unter (2) untersuchte Pendelströmungsverhalten des Sorptionsbettes und die unter (3) ermittelten VOC-Belastungsprofile wurden in einem beschleunigten Degradationstest zusammengefasst. Für diesen Alterungstest wurde ein Konzept ausgearbeitet, das eine wesentlich verkürzte Testung des Materials gegenüber der realen Lebensdauererwartung eines Wärmepumpensystem erlaubt. Zur Charakterisierung des zu testenden Sorptionsmaterials und des momentanen status-quo des Teststandes wurde ein fünfteiliges Messkonzept aufgestellt:

- Charakterisierung des Sorptionsmaterials durch periodisches Untersuchen von „verlorenen Proben"
- Kontinuierliches Monitoring der Anlage hinsichtlich verfahrenstechnischer Messgrößen
- Periodisches, substanzaufgelöstes Monitoring der injizierten Leitsubstanzen
- Substanzaufgelöste Kontrolle der injizierten Dosis (große Perioden) durch ein zertifiziertes Labor
- Funktionaler Test des gealterten Materials auf Material- und Modulebene

Ergebnisse Definitionsphase

Um die Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen in potenziellen Wärmepumpeninstallationsräumen genauer zu beurteilen, wurden im Rahmen einer Vaillant internen kleinen Projektstudie 35 Raumluftdatensätze an unterschiedlichen Örtlichkeiten, Gebäudeklassen und Jahreszeiten aufgezeichnet. Zu diesem Zweck wurden Gebäude ausgewählt, bei denen die folgenden Parameter variieren:

- Baujahr und Gebäudeklasse
- Platzierung des Wärmepumpen-Innengeräts (Keller, Untergeschoss, Dachboden, Garage usw.)
- Art der Raumnutzung (Waschküche, Abstellraum, Badezimmer, Wohnzimmer usw.)
- Jahreszeit für die Messung (Winter, Frühling, Sommer, Herbst)

Die Ergebnisse aller Messungen sind in Abbildung 8 dargestellt.

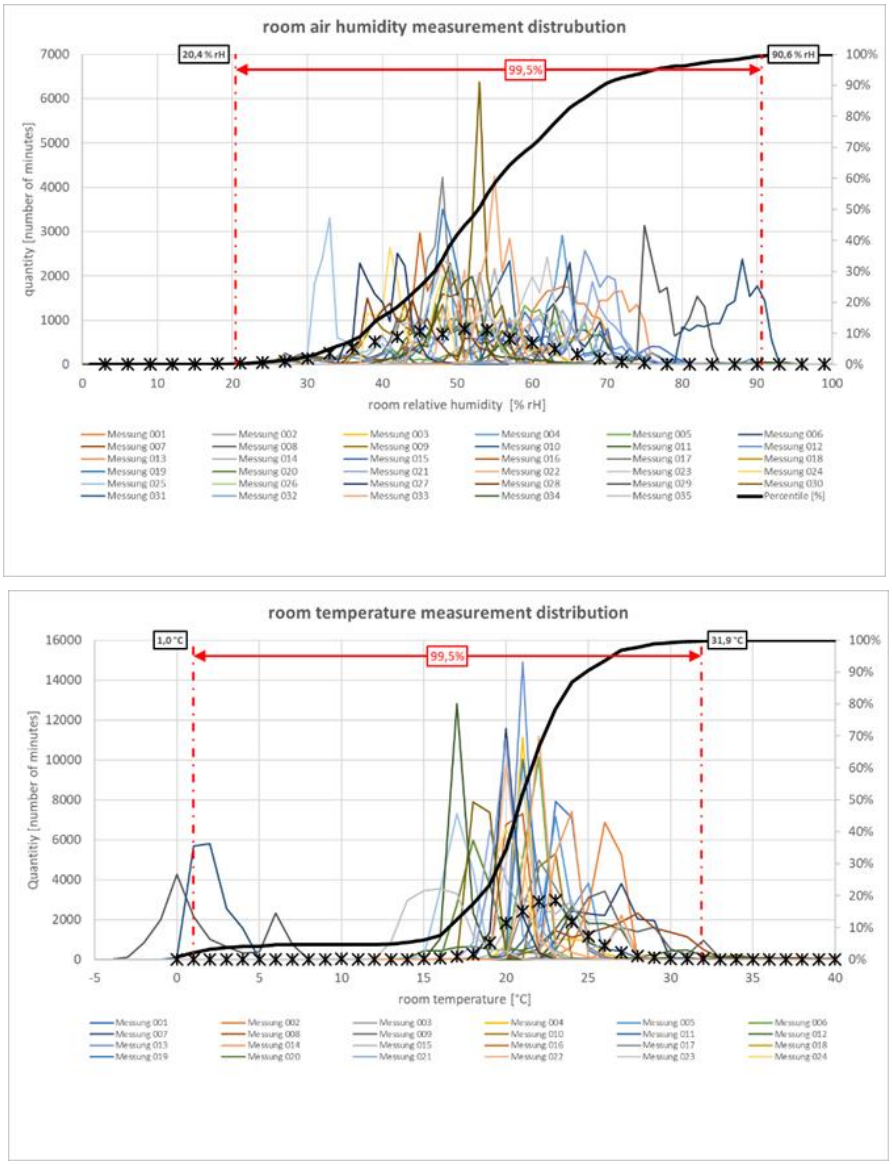


Abbildung 8: Messdaten Temperatur und Feuchte (Raumluftdaten) Vaillant

Das erste Diagramm (**Abbildung 8** oben) zeigt, dass die relative Luftfeuchtigkeit bei allen Messungen hauptsächlich zwischen 35 und 70 % liegt. Die einzigen Ausnahmen sind die Messungen, die im Winter außerhalb der isolierenden Gebäudehülle stattfanden. Bei diesen Messungen ist die relative Luftfeuchtigkeit geringfügig höher. Die zweite Grafik (**Abbildung 8** unten) zeigt die gemessene Temperaturverteilung. Es zeigt sich, dass Temperaturen weit über 30°C innerhalb der gedämmten Gebäudehülle eher selten vorkommen und nicht lange anhalten, auch nicht bei einer Installation im Dachgeschoss.
Insgesamt lässt sich feststellen, dass unabhängig vom jeweils gemessenen Innenraum ein Schwerpunkt der Häufigkeit der relativen Feuchte bei 50% bis 60% und bei der Temperatur zwischen 18°C bis 23°C liegt. Die Messdaten von Garage und separaten Schuppen unterscheiden sich, wie erwartet, durch eine geringe Verschiebung im Bereich der Außentemperatur und -feuchte.

Simulationsergebnisse „natürliche Raumluft-Wechselraten in Wohngebäuden“

Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP wurde von der Vaillant GmbH beauftragt, im Rahmen einer Parameter-Simulations-Studie zu untersuchen, welche baulichen Rahmenbedingungen bei der Aufstellung von Wärmepumpen mit Referenzgas (R290; Propangas) als Kältemittel eingehalten werden müssen, damit

im Fall einer vorgegebenen, geringen Leckage im Kältekreis keine unzulässigen Propangaskonzentrationen im Gebäude entstehen. Nach Erfahrung bzw. Angabe der Vaillant GmbH kann für die definierte Leckagerate von einer vollständigen Durchmischung des ausgetretenen Gases mit der Raumluft ausgegangen werden. Um beurteilen zu können, welche Gaskonzentrationen in den unterschiedlichen Bereichen des Gebäudes erwartet werden können, wird das Gebäude in drei Luftvolumina unterteilt. Dies sind der Aufstellraum der Wärmepumpe im Kellergeschoss, der restliche Keller und das gesamte bewohnte, oberirdische Gebäude. Im Rahmen dieser Studie werden unterschiedliche Raumgrößen und Belüftungssituationen untersucht. Ein Leckage-Ereignis wird zu verschiedenen kritischen Zeitpunkten mit geringer Windgeschwindigkeit angesetzt. Anhand der Ausbreitung des Kältemittels in den drei Zonen des Simulationsmodells wird untersucht, ob und wenn ja unter welchen Aufstellsituationen unzulässige Referenzgas-Konzentrationen auftreten können. Hierzu wird in der Software zur instationären, thermisch-energetischen Gebäudesimulation TRNSYS in der Version 18 ein entsprechendes 3-Zonen-Modell erstellt. Die aus der Windanströmung des Gebäudes, dem thermischen Auftrieb und den Dichteunterschieden zwischen den Zonen resultierenden Luftströme im Gebäude werden berechnet und die entsprechenden Konzentrationen mit Hilfe eines Druckknotennetzwerks über das TRNflow-Plugin von TRNSYS berechnet.

Im Rahmen der hier beschriebenen Studie findet, seitens des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP, keine Einordnung oder Bewertung der rechnerisch ermittelten Konzentrationen oder Luftwechselraten hinsichtlich einer Gefährdungsbewertung, Risikoabschätzung oder Grenzwertbeurteilung statt. Als Grundlage dieser Studie wurden konservative Annahmen festgelegt und die Ergebnisse überprüft. Jedes Einzelergebnis ist einer physikalischen Plausibilitätsprüfung unterzogen worden. Die Größe des der Simulation zugrundeliegenden Parameterraums wurde durch konservative Annahmen abgesteckt, die möglichst kritische Fälle abbilden sollen.

Tabelle 1: Variantenmatrix

Parameter	Basisfall	Variation1
Größe Aufstellraum bzw. proz. Anteil am Kellergeschoss	8 %, 4 m² (8,8 m³)	50 %, 25 m² (55 m³)
Kellerfenster im Aufstellraum Gesamtanzahl Kellerfenster	nein 1	ja 2 + Aufstellraum
Dichtheit Türe Aufstellraum	Brandschutztüre	Überströmöffnungen Türspalt
Dichtheit gesamte Bauausführung n_{50}-Wert	1,5 h^{-1} Anforderung Neubau nach GEG [1]	0,3 h^{-1} ½ Anforderung Passivhaus [2]

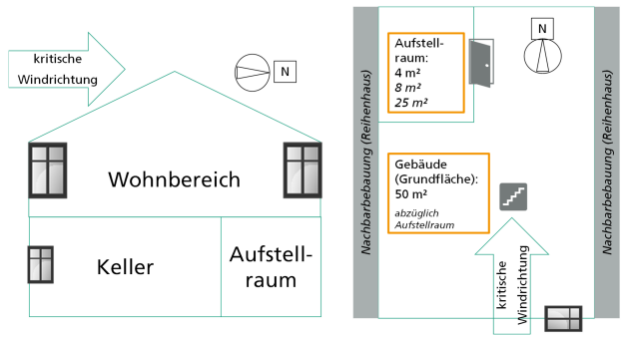


Abbildung 9: Darstellung der generischen Geometrie des Reihenhauses

3 unterschiedliche Aufstellraumgrößen (4,8 und 25 m²), jeweils ohne/ mit Fenster und jeweils mit unterschiedlichen Tür-Konstellationen (Normtür bzw. Brandschutztür - 10°-Spalt offen bzw. geschlossen) wurden zur Berechnung konfiguriert.

Festlegung Luftdichtheit des Gebäudes

Die Luftdichtheit eines realen Gebäudes wird durch einen Druckdifferenztest (»Blower-Door«-Test) ermittelt. Dieser Test bestimmt, wie oft das Gebäude-Luftvolumen, bei einer Druckdifferenz von 50 Pa zwischen Innen und Außen, pro Stunde ausgetauscht wird. Dies wird durch den »**n50**«-Wert mit der Einheit h-1 bzw. 1/h beschrieben.

Für diese Studie werden zwei unterschiedliche Kategorien der Luftdichtheit verwendet. Für eine »**normal dichte**« Gebäudehülle wird ein n50-Wert von 1,5 h-1 angesetzt, welches dem gesetzlich vorgeschriebenen Höchstwert für Neubauten mit mechanischer Lüftungsanlage entspricht. Da allerdings die Berechnung allerdings für eine möglichst »extra dichte« Gebäudehülle berechnet werden sollte, wurde zudem eine möglichst dichte Bauausführung mit entsprechenden In- und Exfiltrationskenndaten gewählt wurden. Als dichte Gebäudehüllenstruktur ist der Anforderungswert aus der Passivhausprojektierung von 0,6 h-1 herangezogen worden, welche wiederum als „worstcase"-Betrachtung noch einmal auf 0,3 h-1 halbiert wurde. Ziel unserer „worst case"- Definition ist es, mindestens >98% des Gebäudebestandes mit dieser Simulation abzudecken.

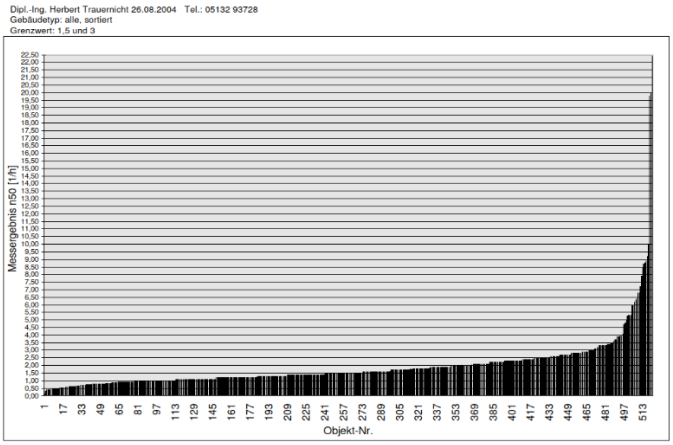


Abbildung 10: Häufigkeitsverteilung Ergebnisse von Druckdifferenzmessungen im Zeitraum von 1998 – 2004 (n = 513, hauptsächlich Wohngebäude). Quelle: https://www.luftdicht.de/statistik.htm [8].

Luftdichtheit innerhalb des Gebäudes und im Keller

Für die Berechnung der Luftströme innerhalb des Gebäudes benötigt das TRNflow-Modell neben den Luftvolumina der einzelnen Zonen und den externen Windbedingungen vor allem die Druckverlust-Beiwerte für die einzelnen Luftpfade bzw. Luftdurchlässe zwischen den drei Zonen des Gebäudes und durch die Gebäudehülle. Dies sind vor allem Fenster und Türen; aber auch die Wände selbst sind nicht vollständig luftdicht. Letztere sind vor allem für die in selteneren Fällen fensterlosen Aufstellraum relevant. Diese fensterlose Aufstellraumkonstellation wurde entsprechend auch als dichtest anzunehmende „worst case"-Aufstellraum-Situation innerhalb der extra-dichten Gebäudehülle berücksichtigt.

Raumlufttemperaturen und interne Wärmequellen

Gebäudeintern findet der thermische Auftrieb Berücksichtigung, da die Lufttemperaturunterschiede in den einzelnen Zonen des Gebäudes einen Einfluss auf die sich einstellenden Luftströme haben. Die bewohnten, oberirdischen Räume werden nach DIN V 18599-10 [13] auf einen Temperaturkorridor zwischen 20 °C und 26 °C temperiert (interne Wärmequellen von Nutzern und Geräten werden mit 1,875 W/m² (45 Wh/m²d) bei 100 m² Fläche angesetzt). Weder Kellerräume noch der berücksichtigte Aufstellraum werden thermisch konditioniert. Im Keller werden keine internen Wärmequellen angesetzt, im Aufstellraum werden für die Speicherverluste eines Trinkwarmwasserspeichers kontinuierlich 50 W angesetzt. Zudem werden für die Wärmepumpe weitere 50 W berücksichtigt während der simulierten Wärmepumpenlaufzeit.

Klimadaten

Als Wetterdatensatz, der den Simulationen zu Grund liegt, wurden die letzten 15 Testreferenzjahre (Stand 2011) des Deutschen Wetterdienstes herangezogen. Die niedrigsten Windgeschwindigkeiten weist zwar die

Region 15 (Garmisch-Partenkirchen) auf. Aufgrund ihrer Größe wurde stattdessen die ebenfalls sehr windstille Region 7 gewählt, die flächenmäßig den deutlich größeren Bereich der nördlichen und westlichen Mittelgebirge um Kassel abdeckt. Die Windrichtung wurde, basierend auf einer Sensitivitätsanalyse am Gebäudemodell der vier Kardinal-Windrichtungen, auf Süden festgesetzt, da sich bei Südwind im Simulationsmodell die höchsten Referenzgas-Konzentrationen ergaben.

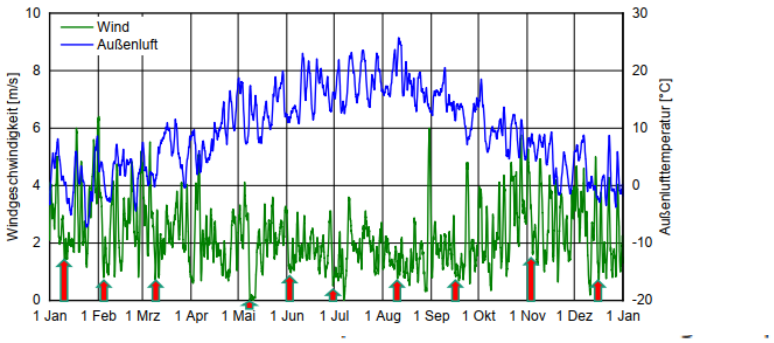


Abbildung 11: Jahresverlauf der Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit (rote Linie) inkl. der 10 Havariezeitpunkte (Pfeile) und Außenlufttemperaturen (blaue Linie).

Der Havariefall wurde kalendarisch verteilt an 10 sehr windarmen Zeitpunkten festgelegt
Die Zustandssimulation geschieht zu den Zeiten mit möglichst geringen Windgeschwindigkeiten, um das möglichst kritischste Szenario zu bekommen (dichteste Gebäudehülle plus dichtester Aufstellraum plus windstillste Witterungsbedingungen auf Basis realer Wetterdaten).

Luftwechsel im Modell

Die folgende Abbildung xx zeigt beispielhaft die mittleren, jährlichen Luftströmungen im Gebäude für das Beispiel des Anwendungsfalls »dicht_AGR04m2_offen_mitFen«. Man kann erkennen, dass die Hauptströmungsrichtung im Gebäude durch eine Infiltration in den Keller, eine Durchströmung der Türe zwischen Keller und Wohnbereich und einen Austritt aus den oberirdischen Geschossen geprägt ist.

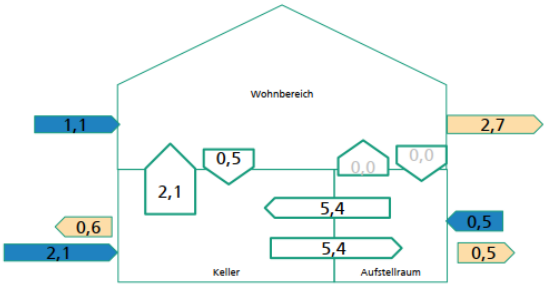


Abbildung 12: Exemplarische schematische Darstellung der Luftströme in m³/h sowohl durch In- und Exfiltration als auch innerhalb der Zonen des Gebäudes. Die Infiltration von außen wird durch blaue Pfeile symbolisiert, Exfiltration nach außen durch beige, interzonale Luftwechsel durch grün umrandete.

Zusammenfassung

In dieser Studie wurde die Auftretenswahrscheinlichkeit bestimmter natürlicher Luftwechsel und die daraus resultierenden Referenzgaskonzentrationen in Abhängigkeit verschiedener klimatischer und vor allem

baulicher Situationen untersucht. Als kritische Faktoren wurden ein Aufstellraum ohne Fenster, eine luftdichte Aufstellraumtür aber auch die Aufstellraumgröße identifiziert. Im kritischsten baulichen Fall, einem fensterlosen Aufstellraum mit 4 m² Grundfläche und einer geschlossenen Brandschutztür, werden in den Simulationsrechnungen maximale Referenzgaskonzentrationen von 1,4 V-% (entspricht 0,57* LFL) erreicht. In keinem der unter-suchten Fälle konnten im restlichen Kellerbereich Konzentrationen über 0,17 V-% (0,08* LFL) und im oberirdischen Wohnbereich über 0,09 V-% (0,042* LFL) festgestellt werden.
Die Grundvoraussetzungen für diese Betrachtungen sind als Kombination verschiedener Worst-Case-Szenarien anzusehen:

- Die Gebäudedichtheit entspricht der Hälfte des Zulässigen des Passiv-Haus-Standards: $n_{50} = 0{,}3h^{-1}$
- Das Gebäude befindet sich klimatisch in einer windarmen Zone von Deutschland
- Die Leckage findet in der windschwächsten Periode über das klimatisch simulierte Jahr statt

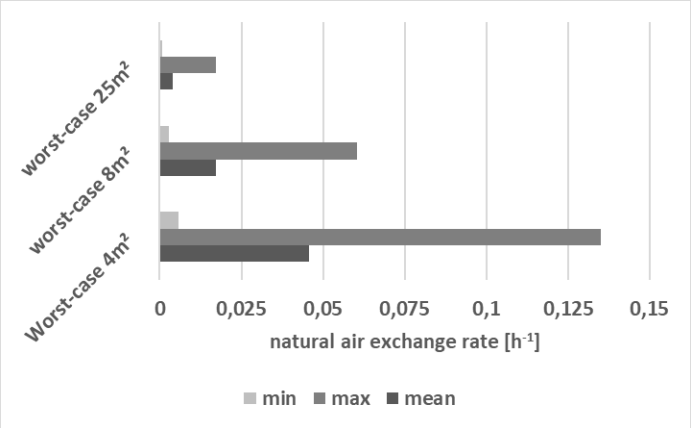


Abbildung 13: Simulierte Luftwechselraten versus Installationsraumgröße bei den betrachteten Worst-Case-Szenarien.

Im Rahmen der hier beschriebenen Studie findet, seitens des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP, keine Einordnung oder Bewertung der rechnerisch ermittelten Konzentrationen oder Luftwechselraten hinsichtlich einer Gefährdungsbewertung, Risikoabschätzung oder Grenzwertbeurteilung statt. Als Grundlage dieser Studie wurden konservative Annahmen festgelegt und die Ergebnisse überprüft. Jedes Einzelergebnis ist einer physikalischen Plausibilitätsprüfung unterzogen worden.

Belastung des sorptionsbasierten Sicherheitskonzeptes durch VOC-Immissionen aus dem Installationsraum

Atmungsvolumen

Das sorptive Sicherheitskonzept besteht aus einem doppelseitig geöffneten Bett, gefüllt mit einer Schüttung aus dem Sorptionsmaterial. Eine Öffnung dieses Sorptionsbettes weist zum Inneren des Kältekreisgehäuses, die andere Öffnung stellt die Verbindung zum Installationsraum dar. Das Sicherheitskonzept wirkt wie ein Filter, der das im Leckagefall ausströmende Kältemittel sorptiv zurückhält. Dieses Konzept ist bis zu einem Proof of Concept innerhalb des Vorläuferprojektes „safeHP“ entwickelt worden.
Aufgrund von zeitlichen Temperaturänderungen im Inneren des Kältekreisgehäuses entstehen thermisch bedingte Dichteänderungen der Luft im Inneren des Gehäuses, die wiederum Pendelströmungen durch das Sorptionsbett induzieren. Durch diese Pendelströmungen kommt es zu einem Kontakt möglicher VOC beladener Luft aus dem Installationsraum mit dem Sorptionsbett. Durch die mögliche Beladung des Sorptionsmaterials mit VOC kann die Funktion des Sicherheitskonzeptes über die Lebensdauer beeinflusst werden. Dieser Zusammenhang ist untersucht und bewertet worden.

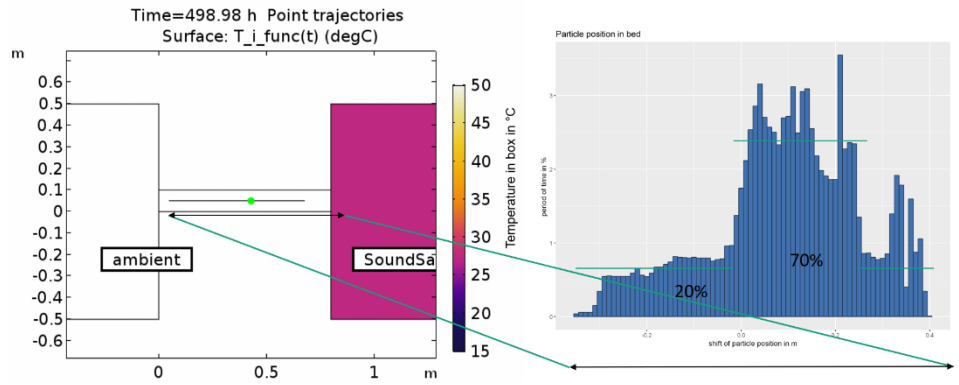


Abbildung 14: Simulation der thermisch induzierten Pendelströmung zwischen Kältekreisgehäuse und Aufstellungsraum.

Die Temperatur innerhalb des Kältekreisgehäuses wurde mithilfe eines Matlab/Simulink-Modells der Vaillant GmbH für ein Jahr simuliert. Basis des Modells sind Temperaturmessungen aus einer Vaillant Flexotherm-Wärmepumpe Stand 2018/2019 mit Warmwasserbereitung (Warmwasserspeicher bei 60 °C mit 500 L Volumen) und einer Fußbodenheizung mit Auslegungspunkt 35 °C. Das zur Herleitung des Atmungsvolumens relevante freie Volumen innerhalb des Kältekreisgehäuses wurde damals mit 100 Litern ermittelt, beträgt nach aktuellen Design-Erkenntnissen aber nur etwa 70 Liter, so dass tatsächlich mit einer geringeren Pendelströmung zu rechnen ist.
Aus dem Vergleich von Druck innerhalb und außerhalb des Kältekreisgehäuses geht hervor, dass der Druckverlust bei dem zu erwartenden Atmungsvolumenstrom über dem Bett nur sehr gering ist, es sich bei dem betrachteten System der Überströmung des Aktivkohlebettes um ein quasi offenes System handelt.
Hieraus lässt sich ableiten, dass ein Partikel, das sich innerhalb des Sorptionsbettes befindet, überwiegend auch dort verbleibt, der Eintrag vom Aufstellraum in das Sorptionsbett also auch in der Regel nicht die gesamte Schüttung penetriert. Zu berücksichtigen ist dabei, dass hier nur die Konvektion beschrieben wird, Effekte aufgrund von Adsorption oder Diffusion allerdings nicht.

Über ein Jahr gerechnet kumuliert sich das Volumen, das vom Installationsraum in das Kältekreisgehäuse eingetragen wird, auf rund 12.200 Liter. Über eine Gebrauchsdauer der Wärmepumpe von 15 Jahren ergibt sich damit ein aufsummierter Lufteintrag von rund 183 m³ aus dem Installationsraum durch das Sorptionsbett.
Diese Werte wurden im Rahmen einer vom Fraunhofer ISE durchgeführten Druckverlustsimulation ermittelt und sind entsprechend Grundlage zur Bewertung der Durchführung des Zyklenstabiltätstests.

Im Vorfeld der Testentwicklung wurden im Auftrag von Vaillant verschiedene Literaturrecherchen in Zusammenarbeit mit externen Partnern durchgeführt (siehe Darstellung in Abbildung 15).

Diese gliedern sich zum einen durch eine von der Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute AGÖF e.V., durchgeführten Analyse ihrer Datenbanken zu Konzentrationen von flüchtigen Organika (VOCs, volatile organic compounds) in Gebäuden, und zum anderen eine durch das Institut für Energie- und Umwelttechnik IUTA e.V., durchgeführte Literaturstudie zur möglichen Beeinflussung des Sorptionsverhaltens von Aktivkohle durch VOCs.

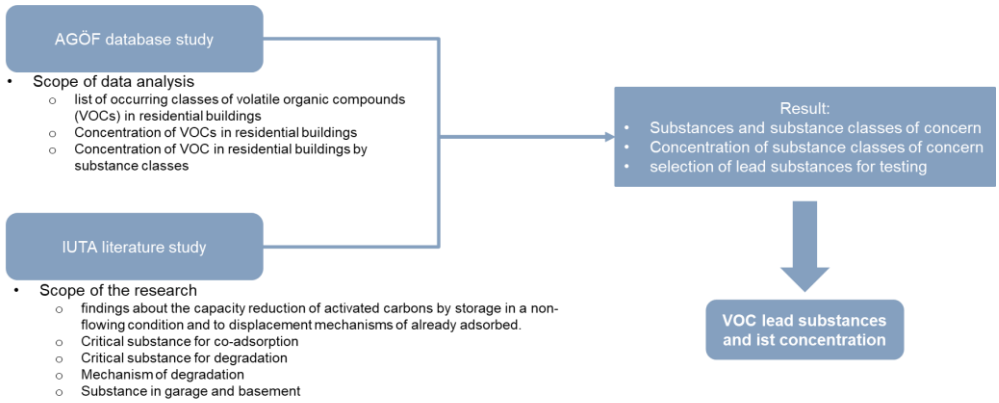


Abbildung 15: Darstellung der Beiträge der externen Partner AGÖF und IUTA.

Literaturrecherche IUTA
Mithilfe von Suchwerkzeugen (Scopus, Chemical Abstracts und Web of Science) wurde bestehender Stand des Wissens durchsucht, mit folgenden Zielergebnissen:

- Ergebnisse zur Reduktion der Adsorptionskapazität von Aktivkohle durch Lagerung
- Kritische Substanzen für Co-Adsorption
- Kritische Substanzen für Degradation
- Mögliche Degradationsmechanismen
- Daten zu Luftbestandteilen in Kellern und Garagen

Insgesamt wurden aus über 30.000 Artikeln 188 als »von Interesse« eingestuft und detailliert evaluiert.

Neben einem durchweg beschriebenen deutlichen Einfluss von Luftfeuchtigkeit auf die Ko-Adsorption wurden die in Abbildung 16 dargestellten Ergebnisse gefunden. Eine eingehendere Beschreibung und die vollständigen Quellenangaben finden sich im detaillierten Bericht durch das IUTA, der für Vaillant erstellt wurde.

Recherchen AGÖF
Für die Analyse der VOC-Belastungen in Räumen durch die AGÖF wurden 7645 Datensätze mit 1.005.855 Messpunkten ermittelt und in einem Zeitraum von 2002 bis 2018 ausgewertet. Die Daten wurden danach gemäß den Aufstellbedingungen einer R290-Wärmepumpe in Innenräumen geclustert. Aus jeder der Substanzklassen, die in bedeutender Konzentration gemessen wurden (siehe Darstellung in Abbildung 16), wurde dann je eine Leitsubstanz ausgewählt. Die Konzentration der Leitsubstanzen wurde so gewählt, dass sie der Summe der 95%-Perzentilen der einzelnen Substanzen aus den jeweiligen Substanzklassen entsprechen. Damit ist sichergestellt, dass 95 % aller gemessenen Konzentrationen einer Substanzklasse unterhalb der für den Test gewählten Konzentration liegen.

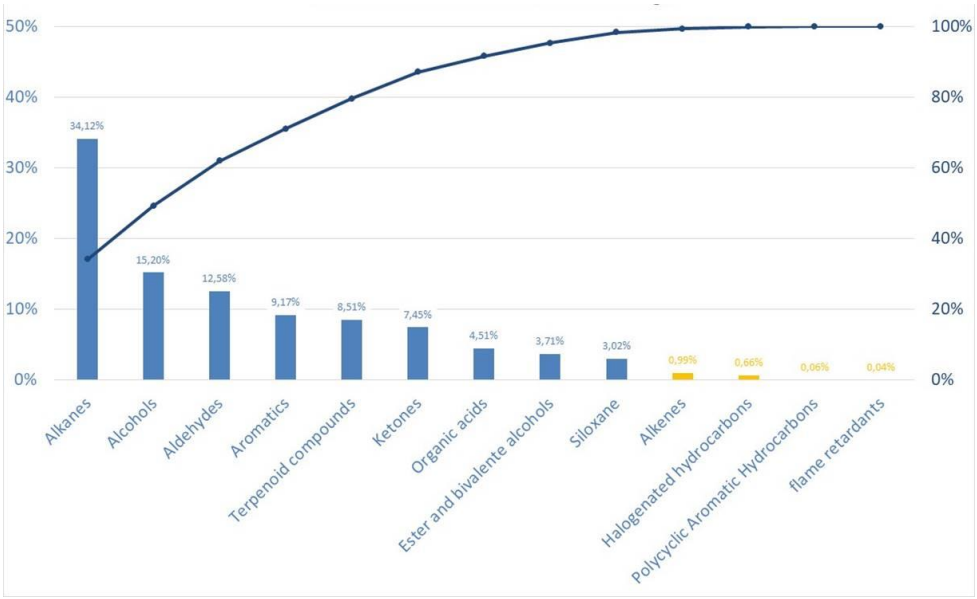


Abbildung 16: Übersicht über Substanzklassen, die im Rahmen der AGÖF-Datenbank aufgeführt werden. Übersicht über die gewählten Leitsubstanzen der Stoffklassen.

Tabelle 2: VOCs in öffentlichen Gebäuden – Substanzklassen und daraus abgeleitete Leitsubstanzen anhand der Literaturrecherche des IUTA und der AGÖF Studien

Substanzklasse	**Ausgewählte Leitsubstanz**
Alkane	n-Hexan
Aromaten	Toluol
Einwertige Alkohole	2-Propanol
Mehrwertige Alkohole	Ethylenglykol
Terpene	Limonen
Aldehyde	Hexanal
Ketone	Aceton
Organische Säuren	Essigsäure
Siloxane	Decamethylcyclopentasiloxan (Siloxan D5)

Je nach Substanzklasse wurden entsprechende Leitsubstanzen ausgewählt. Die Auswahl wurde durch die Daten von IUTA und AGÖF gestützt und mit Experten aus beiden Institutionen diskutiert und abgeglichen.

Versuche zur Aktivkohlestabilität
Die statischen Versuche (aus 3.Q 2018 bis 2.Q 2019) haben ergeben, dass die Aktivkohle die Modellsubstanzen gut adsorbieren kann. Entgegen den Befürchtungen zeigten die Proben kein Degradationsverhalten, die Adsorptionseigenschaften konnten durch Ausheizen wiederhergestellt werden.

DoE (Design of Experiment)
Auf Basis der Vorversuche wurde ein Workshop zur Erarbeitung eines DoE zusammen mit Dr. Bernd Gimpel (quality engineers GmbH) durchgeführt. Als Ergebnis hat sich eine 2 x 2-Matrix ergeben, in der für zwei

unterschiedliche Aktivkohletypen (Typ A und Typ B) jeweils zwei modulierte Luftfeuchten (60 und 80 % rH) getestet werden sollen. Bezüglich der weiteren identifizierten Einflussgrößen Temperatur, Zusammensetzung und Art der Teststoffe werden für die Stabilitätstests der Aktivkohle jeweils Worst Case-Szenarien angenommen, da bspw. eine Variation der Temperatur jeweils über 15 Jahre mit Blick auf die benötigten Versuchszeiten nicht umsetzbar erschien.
Ausgangspunkt ist zunächst die Alterung der Aktivkohle. Hierfür werden realitätsnahe Adsorptionsbetten zyklisch mit konditionierter (Temperatur, Feuchtigkeit, VOC-Gehalt) Luft belastet, um das Atmen des Kältekreises zu simulieren.

Methodik Charakterisierung der Aktivkohle
Getestet wurden zwei Aktivkohlen, die sich im bisherigen Projektverlauf als vorteilhaft herausgestellt haben. Die Eigenschaften der getesteten Aktivkohlen wurden anhand verlorener Proben bestimmt. Dazu wurde die innere Oberfläche des Sorptionsmaterials (Porenvolumen und Radienverteilung) und die Aufnahmekapazität der gealterten Aktivkohlen im Test über äquivalente Testzeiträume und entlang des Sorptionsbettes bestimmt.

Prüfaufbau
Eine Konstruktionsskizze des Prüfaufbaus für die zyklische Alterung der Aktivkohlen ist in Abbildung 17 dargestellt.
Der Aufbau bestand im Wesentlichen aus einem zentralen Mischbehälter, an den vier Prüflinge (DuT, device under test) angeflanscht werden konnten. Im zentralen Mischbehälter wurde konditionierte Zuluft aus einer Luftstrecke mit einem Luftstrom gemischt, der mit den Prüfsubstanzen beaufschlagt wurde. Die Prüfsubstanzen wurden mittels µL-Pumpen eindosiert und in separaten Verdampfern verdampft. Über eine Begleitheizung und Isolierung konnte eine Kondensation an den Wänden vermieden werden. Die zyklische Beaufschlagung wurde mithilfe von Kolben erreicht, die pneumatisch am Ausgang der DuTs geschaltet, periodisch verfahren und so kontinuierlich Luft aus dem Mischbehälter über das Adsorptionsbett zogen und wieder zurückdrückten (beschleunigte Simulation der Pendelströmung).

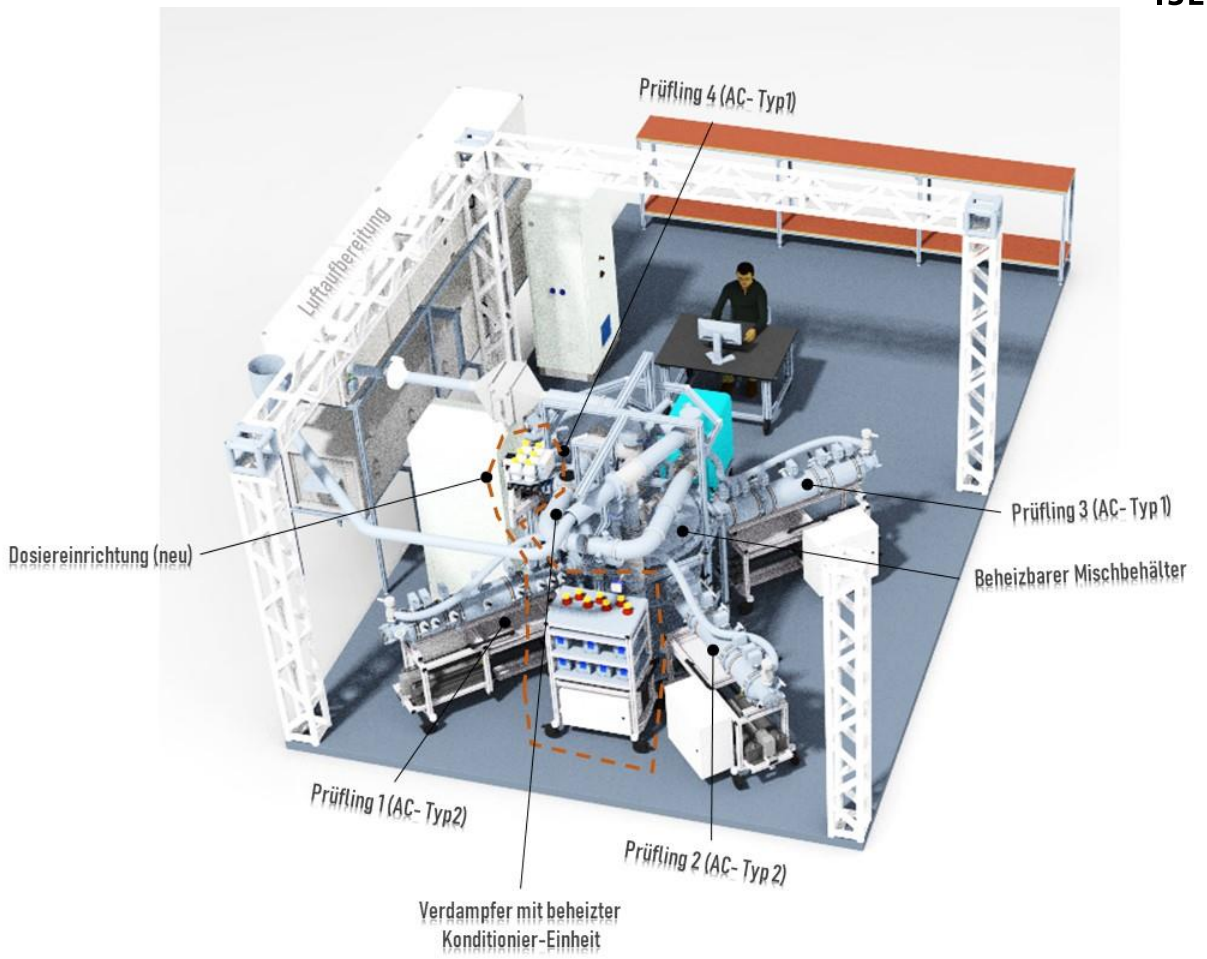


Abbildung 17: Skizze des Prüfstands AcCoS (Revisionsstand September 2020) zur systematischen Alterung von Aktivkohlebetten in anwendungsnaher Umgebung.

Tabelle 3: Spezifikationen und Kennzahlen des Prüfstandes AcCoS

Baugruppe	**Beschreibung**
Abmessungen (L x B x H)	5 m x 5,7 m x 3,5 m
Luftstrecke	3 Partikelfilterstufen (Ziel: Reinraumqualität) 1 Aktivkohlefilter (VOC-Abtrennung) Heizregister Befeuchtereinheit zur geregelten Einstellung der Luftfeuchte
Konditionierungseinheit	Ringleitung mit pneumatischen Ventilen Volumen ~ 70 L µL-Dosierpumpen Verdampfung sequenziell in 7 Verdampfertiegeln zur rückstandsfreien Verdampfung Vormischung der Testsubstanzen
Heizbares Zentralgefäß	Volumen: ca. 700 L Eingebaute Lüfter für ideale Durchmischung
Prüflinge (DUT)	Aktivkohlevolumen: ca. 44 Liter

Aktivkohlemasse (nominell): 18 kg
Sensorik (Eigenentwicklung während des Projektes):
8 Sensorknoten pro Sorptionsbett, 4 Sorptionsbetten

- µ-Controller-Board (Teensy 3.6)
- 7 ext. Temperatursensoren
- Kommunikation des Sensorknoten via Ethernet
- Integrierte Sensorelemente pro Sensorknoten

im Sorptionsbett:

- 3 Gassensoren (1VOC-/ 2CxHy-Sensoren)
- 1 Drucksensor (abs.)
- 1 abgesetzter Temperatursensor im Sorptionsbett

Abbildung 18: AcCoS Teststand — Zentraler Mischbehälter mit zwei angesetzten DUTs (Sorptionsbetten) und FAIMS Massenspektrometer zur insitu-Kontrolle der konditionierten VOC beladenen Testluft (links); viertes DUT (Sorptionsbett) mit Verdampfereinheit und beheizter Ringleitung (rechts).

Verdampfer

Aufgrund der unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften der Leitsubstanzen wurde eine Verdampfungseinrichtung mit sieben Verdampfertiegeln realisiert. In die Verdampfertiegel konnten Mischungen aus den Leitsubstanzen eindosiert und anschließend mit einem für den einzelnen Verdampfertiegel individuellen Temperaturprogramm verdampft werden. Das Eindosieren erwies sich im Verlauf der Erprobungsphase und innerhalb der ersten Betriebsmonate als nicht ausreichend stabil genug. In einem Revisionsschritt des Teststandes wurde die ursprüngliche Eindosierungseinheit komplett überarbeitet. Die Mikrodosierpumpeneinheit wurde dabei um eine sequenzielle Referenzvolumeneinheit erweitert. Die Mikrodosierpumpeneinheit wurde zum definierten Befüllen eines Referenzvolumens benutzt. Das Referenzvolumen wurde dann per Inertgas-Spülung in den Tiegel des Verdampfers eindosiert. Die sequenzielle Referenzvolumeneinheit musste innerhalb des Projektes selbst entwickelt werden, da keine Lösung auf dem Markt zur Verfügung stand. Dabei wurden die Mechanik / Hydraulik der sequenziellen Referenzvolumeneinheit, sowie die Ansteuerungselektronik entwickelt und in das Softwarekonzept des Teststandes integriert.

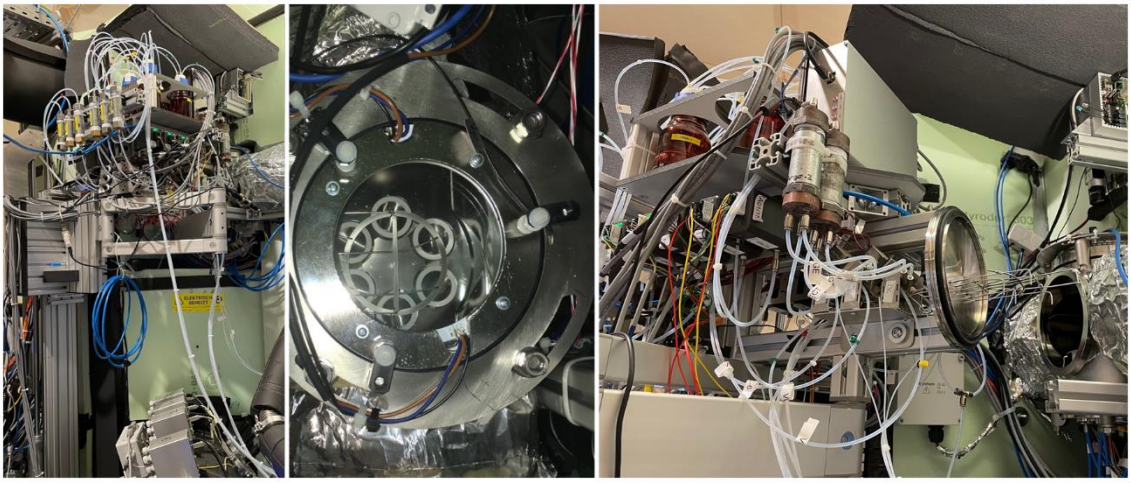


Abbildung 19 — von links: an die Ringleitung angesetzter Verdampfer mit in der Revisionsphase entwickelter Dosiereinrichtung, Verdampfereinheit mit 5 Verdampfertiegeln, Dosiereinheit mit Injektorkapillaren – abgedockt von der Ringleitung.

Die Anzahl der Verdampfertiegel in der Verdampfereinheit wurde auf sechs festgelegt. Dadurch mussten die Leitsubstanzen als Gemische vorgelegt werden. Aufgrund der unterschiedlichen Dampfdrücke der Leitsubstanzen kam es zu einer Verschiebung der Mischungsverhältnisse in den Leitsubstanz-Gemischbehältern durch Verdampfung. Diese Verschiebung beeinflusste die injizierte Dosis der Leitsubstanzen für die konditionierte Pendelluftströmung. Die Vorlagenbehälter der Leitsubstanzmischungen sind deshalb mit einer Kühlung auf -15°C temperiert worden, um die Dampfdrücke wesentlich zu reduzieren und die Mischungsverhältnisse der Leitsubstanzen zu stabilisieren.

Abbildung 20 — von links: Vorlagenkühlung der Leitsubstanzbehälter mit Niveausensorik, Dosierpumpen und Vorlagenkühlung.

Die durchgeführten Maßnahmen führten zu einem wesentlich robusteren 24/7 Betrieb als eine reine Mikrodosierpumpeneinheit. Dies erlaubte einen stabilen Test über die gesamte Testzeitspanne von 20 Monaten.

Mischbehälter und Luftstrecke

Die Konditionierung der Pendelluft wurde durch zwei Systeme ermöglicht. Eine marktübliche Luftstrecke erlaubt die Filterung und Befeuchtung der Pendelluft (vgl. Abbildung 21).

Abbildung 21 — von links: Konditionierungs-Luftstrecke, thermisch isolierte Luftstrecke zur Vermeidung von Kondensation.

Die Verdampfung der Leitsubstanzen erfolgt in einer Ringleitung. Nach vollständiger Verdampfung wird das Volumen der Ringleitung mit den Leitsubstanzen in der Gasphase mittels der vorkonditionierten Luft aus der Luftstrecke in den Mischbehälter überführt. Innerhalb des Mischbehälters wurde eine „Zwirbelströmung“ realisiert, die die hoch angereicherte Luft aus der Ringleitung auf die geforderte Konzentration verdünnt.

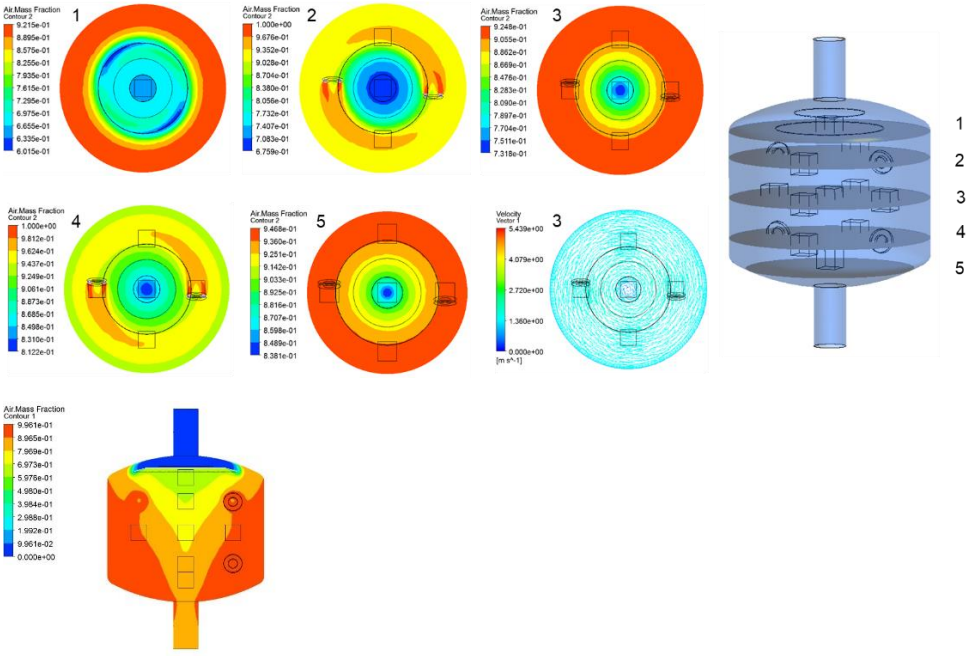


Abbildung 22: Simulation (CFD) der Wirbelströmung im Mischbehälter zur Verdünnung und Homogenisierung der mit VOC beladenen Testluft für die Sorptionsbetten.

Abbildung 23— von links: Innenansicht des Mischbehälters, eingesetzter Mischbehälter mit vier probeweise angesetzten Sorptionsbetten (DUTs), Mischbehälter mit Ringleitung.

DUT - Sorptionsbett

Ein Schnitt der Konstruktionszeichnung für die Prüflinge (DUT) ist in Abbildung 24 dargestellt. Jeder DUT bestand aus drei Segmenten, in die jeweils 2 bzw. 3 Behälter mit Aktivkohle eingesetzt waren.

In charakteristischen Abständen entlang der Strömungsrichtungen der Sorptionsbetten (DUT) wurden Flansche vorgesehen, die mit jeweils einer Probenlanze mit mehreren verlorenen Aktivkohleproben bestückt waren. Dieses Konzept ermöglichte entlang des Sorptionsbettes nach entsprechender Zeit die sorptiven Eigenschaften der Aktivkohle zu analysieren. An gleicher Position entlang des Sorptionsbettes befanden sich Sensorknoten zur Bestimmung von Druck, Temperatur und VOC-Konzentration.

Zusätzlich wurden am Eingang der Sorptionsbetten und innerhalb des zentralen Mischbehälters sorptive Teströhrchen (Referenzproben) eingesetzt. Die Teströhrchen stellen eine „sorptive Falle“ für die Leitsubstanzen dar und ermöglichen die Integration der Leitsubstanzkonzentrationen über die Zeit. Die Auswertung der Leitsubstanzkonzentrationen / -dosen sind durch ein akkreditiertes Labor mittels Gaschromatograph mit nachgeschaltetem Massenspektrometer vorgenommen worden. Diese Ergebnisse wurden auch zur Validierung der FAIMS-Messungen und VOC-Sensoren genutzt.

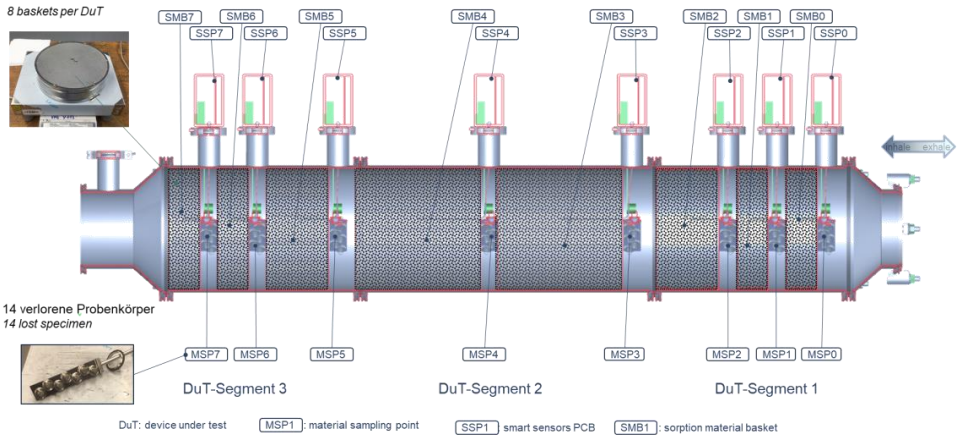


Abbildung 24: Querschnittszeichnung eines Prüflings (DUT). DUT = Device under test, SMB = sorption material basket, SSP = Smart sensor PCB, MSP = material sampling port.

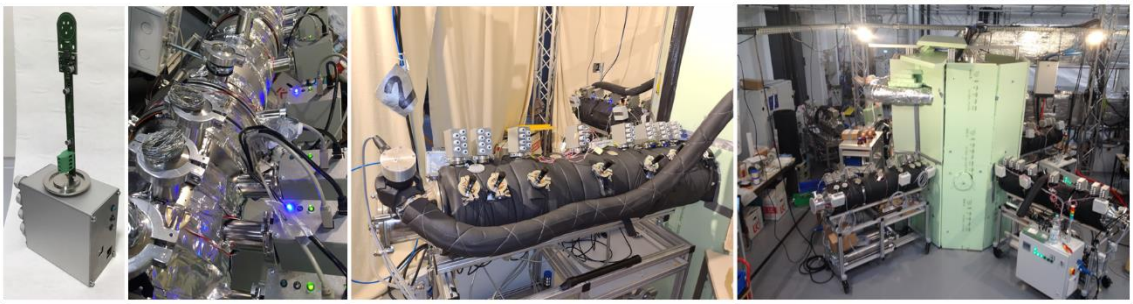


Abbildung 25— von links: Einzelner Sensorknoten, unisoliertes Sorptionsbett (DUT), thermisch isoliertes Sorptionsbett (DUT), gesamter Teststand AcCoS mit allen vier Sorptionsbetten (DUT).

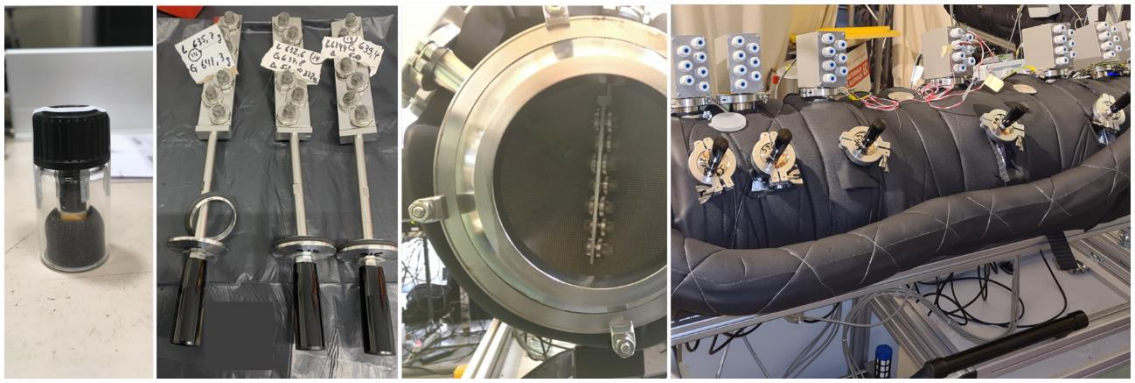


Abbildung 26 — von links: Referenzprobe, Probenlanzen mit verlorenen Probenvolumina, eingesetzte Probenlanze am Sorptionbetteingang, Flansche entlang des Sorptionsbettes mit eingesetzten Probenlanzen.

Das Sensorkonzept sah insgesamt ca. 50 Mess-Knotenpunkte (Sensorknoten) vor, wobei jeder Knoten mit fünf bis elf Sensoren besetzt werden konnte. Die sich daraus ergebenden ca. 500 Messkanäle waren in einer LabView-Oberfläche zusammengefasst. Eine Version dieses Dashboards ist in der folgenden Abbildung 27 dargestellt.

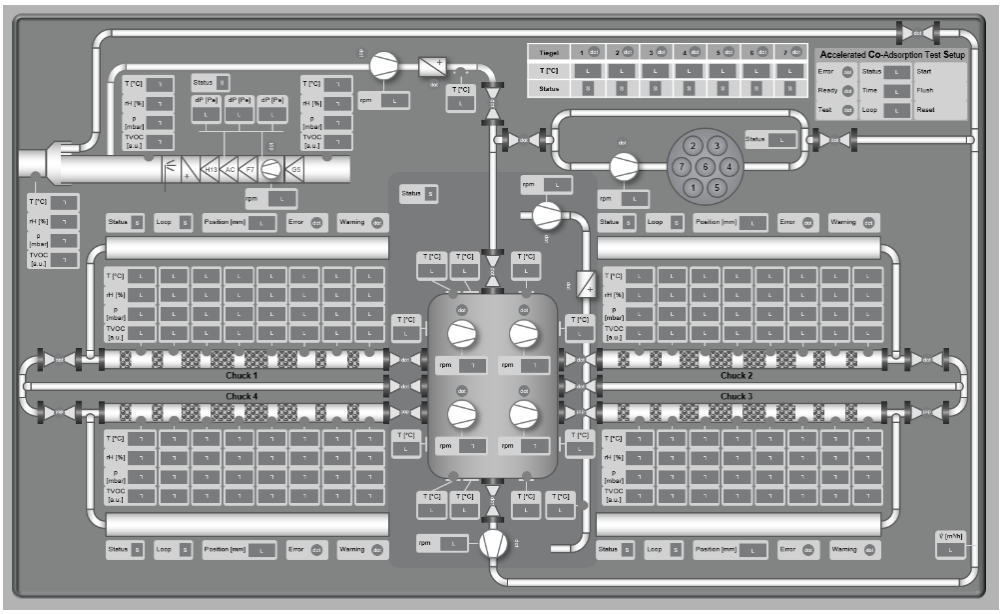


Abbildung 27: Dashboard des Teststandes zur Darstellung des aktuellen Zustands (Temperatur, Feuchte, Druck, VOC-Konzentration, Ventilstatus etc.) für Verdampfer, Ringleitung, Mischbehälter, Luftkonditionierungsstrecke und der vier Sorptionsbetten

Analytik

Die entnommenen Proben wurden am Fraunhofer ISE hinsichtlich ihrer Porosität und Adsorptionscharakteristik für R290 untersucht. Hierfür kamen Standardgeräte der Firma Quantachrome zum Einsatz. Die Proben wurden in einer Ausheizstation Masterprep bei 200 °C für 4 h unter Vakuum präpariert.

Für die Bestimmung der inneren Oberfläche nach Brunauer Emmet und Teller (BET) nach der DIN ISO 9227 wurde das Quadrasorb evo-MP der Fa. Quantachrome verwendet.

Das QUADRASORB evo-MP ist ein kompakter Vollautomat mit vier voneinander unabhängigen Messstationen zur Bestimmung der BET-Oberfläche, des Porenvolumens und der Porengrößenverteilungen für Meso & Mikroporöse Materialien bei 77 Kelvin.

Vor der Messung an der Probe von Vaillant wurde das Messgerät mittels Standard Referenz Material (SRM) der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) auf Messgenauigkeit überprüft. Hierfür wurde das SRM BAM-P109 (Activated Nanoporous Carbon) verwendet. Laut SRM-Zertifikat (siehe auch https://www.webshop.bam.de/show_blob_data.php?filename=pdf%2Fcertificates%2Fbam_p109e.pdf) hat das Material BAM-P109 eine Oberfläche von 1396 m^2/g ± 24 m^2/g.

Referenzierung

BET Zusammenfassung für den SRM BAM-P109 an der ersten, dritten und vierten Station gemessen:

1. Messung: gemessene innere Oberfläche (BET) = 1418 m^2/g
2. Messung: gemessene innere Oberfläche (BET) = 1405 m^2/g
3. Messung: gemessene innere Oberfläche (BET) = 1412 m^2/g

Der gemessen Wert liegt sehr gut in der Vorgabe der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM). Für die Bestimmung der inneren Oberfläche (BET) muss von einem Fehler von ± 2% ausgegangen werden. Die R290-Messungen wurden an der VStar der Fa. Quantachrome durchgeführt. Hierbei handelt es sich um ein 4 Stationen Sorptionsanalysator. Das Gerät verfügt über vier 1000 mbar Drucksensoren sowie über vier 10 mbar Drucksensoren an jeder Messstation. Des Weiteren ist für das Hochvakuum eine Turbomolekularpumpe verbaut. Die verbauten Thermostate regeln die Temperatur mit einer Genauigkeit von ±0,01 °C.

Ergebnisse

Die statischen Versuche (aus 3.Q 2018 bis 2.Q 2019) haben ergeben, dass die Aktivkohle die Modellsubstanzen gut adsorbieren kann. Entgegen den Befürchtungen zeigten die Proben kein Degradationsverhalten, die Adsorptionseigenschaften konnten durch Ausheizen wiederhergestellt werden. Auf Basis von Zyklierungsversuchen auf Materialebene konnte keine nennenswerte Beeinträchtigung durch die untersuchten VOCs festgestellt werden.

Wechselwirkung des Sorptionsmaterial mit den injizierten VOC-Leitsubstanzen über die Sorptionsbettlänge

Untersuchungen über die Lauflänge des Sorptionsbettes in den Zyklentests haben ergeben, dass über 15, 20 und 30 Jahre simulierter Alterung lediglich ein kleiner Teil der Bettlänge (unter 10%) mit VOCs beladen wird. Aus experimentell bestimmten Adsorptionsgleichgewichten von VOCs an den untersuchten Aktivkohlen wurde ersichtlich, dass die eingetragene Gesamtmenge an VOCs die Adsorptionskapazität für R290 nicht nennenswert beeinträchtigt. Ferner wirkt diese beladene Schicht einem weiteren Eintrag von VOCs aufgrund des kleinen Konzentrationsgradienten hemmend entgegen und sollte dementsprechend als Schutzschicht wirken, sodass eine Beeinträchtigung der Sicherheitsfunktion aus diesen Untersuchungen nicht absehbar ist. Im Detail wurden Proben des Sorptionsmaterials nach Beendigung der simulierten Alterung im ersten Segment des Sorptionsbettes entlang der axialen Strömungsrichtung entnommen und mittels Desorptionswaage und nachgeschaltetem Massenspektrometer untersucht (vgl. Abbildung unten).

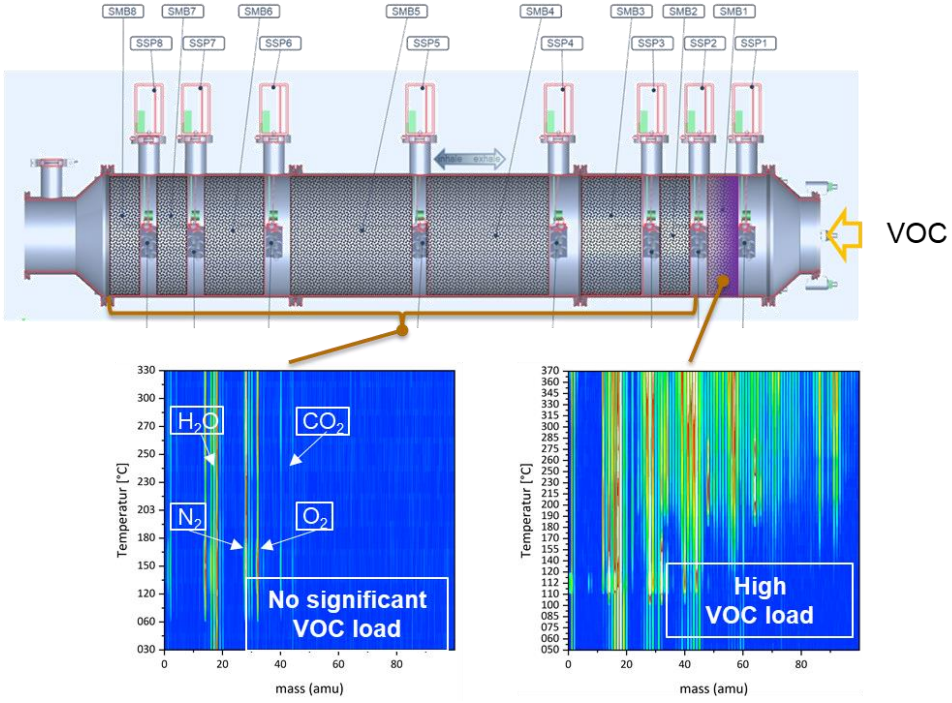


Abbildung 28: Vergleich der Massenspektrogramme über die Ausheizung einer Probe aus der ersten Randschicht (rechts) und tiefer aus dem Sorptionsbett (links). Innerhalb des Sorptionsbettes zeigen sich nur Bestandteile der Luft, in der Randschicht konnte eine signifikante Anreicherung mit VOCs festgestellt werden.

BET und Kältemittel-Uptake Ergebnisse des beschleunigte Alterungstestes (Zyklierungstest)

Nach bereits beschriebenem Untersuchungsschema wurde die zeitliche mögliche Degradation beider getesteter Aktivkohlen aus den DUTs untersucht. Dazu wurde die innere Oberfläche (BET) und die Beladungskapazität mit R290 aus den verlorenen Proben in den verschiedenen Segmenten entlang der axialen Richtung der Sorptionsbetten in zeitlichen Abstufungen bestimmt. Die bereits dargestellten Ergebnisse aus den Desorptionsmessungen im vorherigen Abschnitt ließen sich bestätigen, dass keine signifikante Reduktion der sorptiven Eigenschaften des Materials festzustellen war (Abbildung 29). In einem

weiteren Schritt wurde das Material anschließend aus den Sorptionsbetten entnommen und einem funktionalen Test in einer Testmodulgeometrie unterzogen. Auch diese Tests konnten positiv abgeschlossen werden.

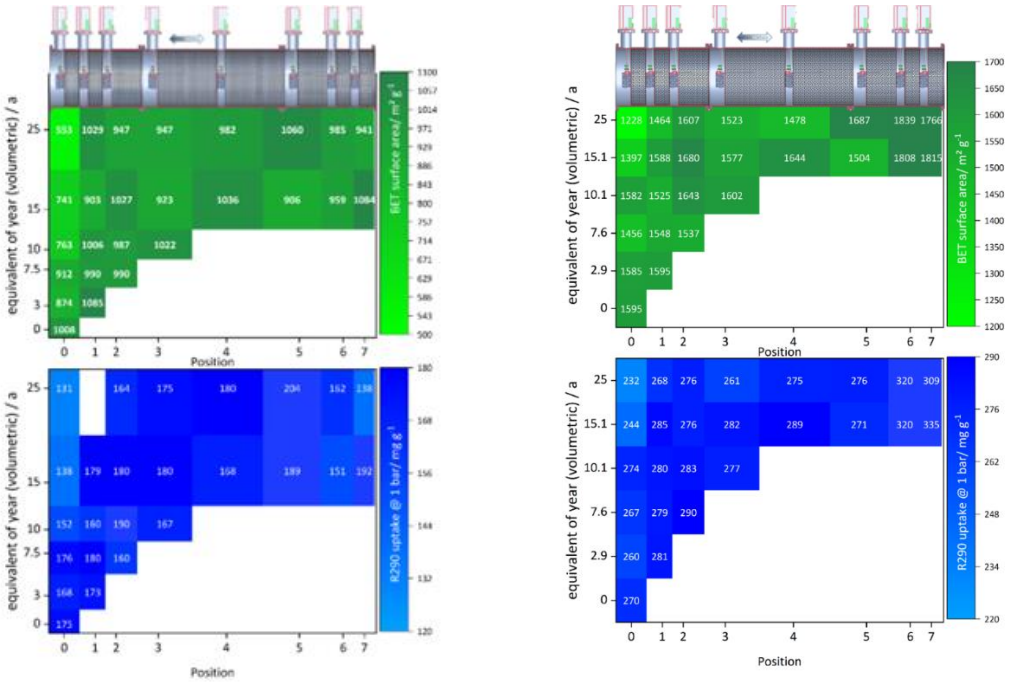


Abbildung 29: Vergleich sorptive Eigenschaften beider getesteter Sorptionsmaterialien (links Material A, rechts Material B). Grün zeigt die BET über die equivalente Testzeit und über die axiale Position im Sorptionsbett, blau die Beladungskapazität mit R290.

Der Prüfstandsaufbau AcCoS war aufgebaut im Fraunhofer ISE Prüffeld Auerstraße und beanspruchte etwa 140m² Laborfläche inklusive der dazugehörigen Verkehrsflächen. Der Laborflächenmangel im Technikum des Fraunhofer ISE an der Auerstraße und die spezielle Nutzbarkeit des Prüfaufbaus AcCoS führte zu der Entscheidung aller Entwicklungspartner, den Prüfaufbau nach Nutzungsende im Rahmen des Projektes safeSENSE zurückzubauen und fachgerecht zu entsorgen. Dies wurde Vertretern des Fördergeldgeber anlässlich einer Vorort-Begehung kommuniziert. Der Prüfstand wurde bis Ende Q2/2023 außer Betrieb genommen und fachgerecht entsorgt. In diesem Zuge wurden auch die bereits zu Anfang des Projektes noch genutzten Prüfstände aus dem Verbundvorhaben safeHP (Förderkennzeichen: FKZ 03ET1353B) mit entsorgt mit Ausnahme des Ausström-Teststandes im Prüffeld Hochdorf. Dieser wird in F&E-Aktivitäten weitergenutzt.

1.2 AP 2 Entwicklung eines Beladungssensors

Entwicklung eines zuverlässigen, in Serie fertigbaren Beladungssensors, mit dessen Hilfe der Beladungszustand des Adsorbens in einem sorptiven Sicherheitselement überwacht werden soll.
Umsetzung von Funktionsprinzipien in Sensorlayouts, Funktionalisierung der Sensoren, Umsetzung verschiedener Ansätze zur Sensorintegration, Verifikation und Tests auf dem Modulmaßstab.

Das Arbeitspaket gliederte sich in 5 Teile:
(1) Konzeptphase
In der Konzeptphase sollte das geplante Sensorkonzept mit Blick auf die Anwendung evaluiert und anhand von Standard-Methodik wie einem TRIZ- Workshop bewertet werden. Ziel war es zudem, für das Sensorkonzept ein Lastenheft zu erarbeiten, anhand dessen die unterschiedlichen Ansätze bewertet werden. Um das Potential für die Anwendung abschätzen zu können wurde eine Marktrecherche zur möglichen Skalierbarkeit des gewählten Konzeptes durchgeführt. Hierdurch sollte insbesondere auch eine Entwicklung an realisierbaren Kosten und Möglichkeiten vorbei vermieden werden.

(2) Sensorentwicklung
Hauptschwerpunkt des AP 2 lag auf der Entwicklung eines Sensors, mit dem der aktuelle Beladungszustand des Adsorbens detektiert werden kann. Hierfür wurden Sensoroutlets entwickelt, die mit einer sorptiven Schicht beaufschlagt werden können, die bevorzugt die gleichen sorptiven Eigenschaften wie die Aktivkohle aufweist, gut thermisch leitfähig ist und sehr gut haftet.

(3) Sensorintegration
Das Ziel dieses Unterarbeitspaketes lag darin, das favorisierte Sensorkonzept bestehend aus Sensor, Funktionalisierung und Elektronik in das Sorptionsbett zu integrieren.

(4) Verifikation und Test
Das finale Sensorkonzept sollte in verschiedenen Testeinrichtungen charakterisiert werden. Geplant waren in diesem Unter-AP auch die Integration in den Teststand aus AP 1 und eine Zyklierung über die komplette Lebensdauer. Ziel war es, auch die mechanische Stabilität der Schicht sicherzustellen.

(5) Bewertung der Ergebnisse
Die Ergebnisse aus den Unter-Arbeitspaketen wurden aufbereitet und mit externen Sicherheitsexperten / Institutionen diskutiert. Auf dieser Basis wurden im weiteren Verlauf eine Risikobewertung und eine Bewertung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten vorgenommen.

Ziele des Arbeitspaketes
Entwicklung eines zuverlässigen, in Serie fertigbaren Beladungssensors, mit dessen Hilfe der Beladungszustand des Adsorbens in einem sorptiven Sicherheitselement überwacht werden soll.

TRIZ-Workshop zur Sensor-Konzeptionierung

Zielsetzung
In der Konzeptionierung des in AP 2 beschriebenen Sensors sollen verschiedene technische Lösungswege betrachtet und bewertet werden.
Zusätzlich zu dem in Zwischenbericht 2 vorgeschlagenen Sensor auf Basis des 3-Omega Prinzips, welcher am Fraunhofer IPM entwickelt wird, sollen weitere am Markt verfügbare Sensoriken betrachtet werden.
Neben der grundsätzlichen Auswahl des geeigneten Sensorkonzeptes sind weiter verschiedene Integrationsmöglichkeiten in den vorgesehenen Anwendungsfall der Zustandsüberwachung des Aktivkohlebettes zu benennen und zu bewerten.

Vorgehen
Zur lösungsoffenen und strukturierten Generierung neue Ideen und Konzepte wurde ein 2-tägiger Workshop organisiert. Zur Anwendung kam dabei die TRIZ-Methodik (sinngemäße Bedeutung: „Theorie des erfinderischen Problemlösens“).
Für die Sicherstellung einer professionellen Anwendung der Methodik wurde ein externer Moderator beauftragt, welcher den Workshop moderiert und dokumentiert hat.
Teilgenommen haben Mitarbeiter aller am AP2 beteiligten Institutionen, Fraunhofer ISE, Fraunhofer IPM sowie der Firma Vaillant.
Dabei wurde in einem ersten Schritt die technische Problemstellung der Zustandsüberwachung erläutert und beschrieben. Im Anschluss ist die Methodik vorgestellt und anhand einiger Beispiele erläutert worden.
Wesentlicher Bestandteil sind hierbei die vierzig Prinzipien nach Genrich S. Altschuller. Diese beschreiben generische Lösungsansätze zur Gestaltung technischer Systeme und basieren auf der Auswertung einer großen Anzahl angemeldeter Patente. Dabei können zur Erfüllung einer Funktion verschiedene Wirkprinzipien berücksichtigt werden, welche zu durchaus innovativen technischen Lösungen führen und etablierte Konzepte ablösen.
Im Workshop wurden nach der Einführung zwei Gruppen gebildet, worin dann unter Anwendung der 40 Prinzipien Ideen generiert und beschrieben wurden.
Hauptaugenmerkt des zweiten Tages lag in der Bewertung und Strukturierung der Ideen. Hierzu wurden die verschiedenen Ideen und deren Derivate zunächst hinsichtlich der Attraktivität und des Risikos bzw. Aufwandes bewertet. In einem zweiten Schritt sind die attraktivsten Ideen unter Anwendung eines morphologischen Kastens zu konkreten Konzepten zusammengefasst worden.

Die generierten Konzepte wurden im Anschluss mit Augenmerk auf konkrete Vergleichsmerkmale final bewertet.

Ergebnis und weitere Schritte

Die Zusammenführung der Ergebnisse hat zu insgesamt 6 Konzepten geführt, welche im weiteren Verlauf weiter gegenübergestellt werden können.

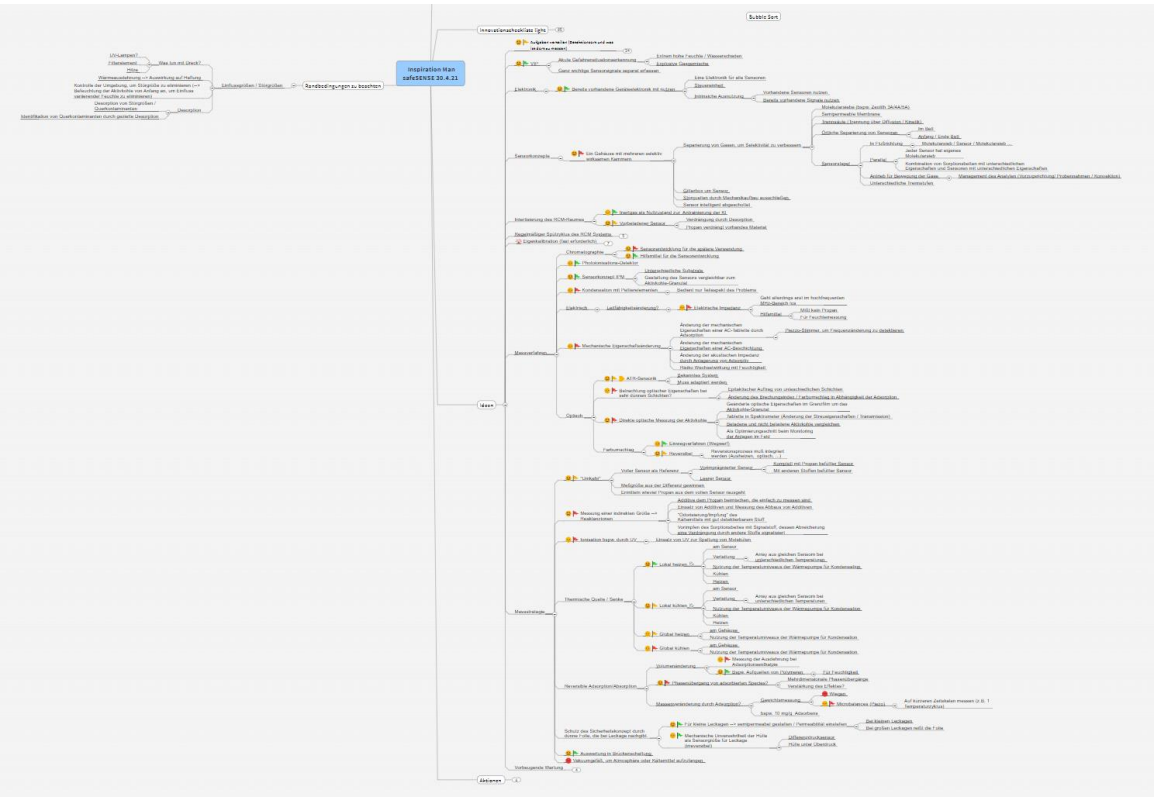


Abbildung 30: Sammlung und Vorbewertung der Idee.

	What	Relative Importance / Crit. [1…10]	How					
	Correlation in matrix: *9 - strong / 3 - medium / 1- weak* *Tip: use comments !!!*		K1 [3]	K2 [4]	K3 [4]	K4 [5]	K5 [9]	K6 [10]
Attraktivität	Wiederholgenauigkeit	10	9	9	3	3	3	3
	Sensitivität	8	3	9	9	9	9	9
	Langzeitstabilität	7	9	9	3	3	3	3
	Selektivität	5	3	9	9	9	9	9
	Schnelligkeit	3	1	9	3	9	3	9
Risk / Effort	Keine Lieferanten für Serienherstellung	10	3	3	3	3	3	3
	Bauvolumen zu groß	9	1	3	1	3	1	3
	Wartungsanfälligkeit	7	1	1	3	3	3	3
	Kompatibilitätprobleme zu HMU	5	3	1	3	1	3	1
	Aufwand im Betrieb	5	3	9	1	1	3	9
	Patentverletzung	4	1	1	1	1	3	3
	Aufwand zur Normerfüllung	2	1	1	1	1	1	1
Cost	Elektronik	10	1	3	1	3	1	3
	IPM Sensor	7	1	1	3	3	9	9
	Lokales Heizen	5	3	3	3	3		
	Umkehr	5			3	3	3	3
	Indirekte Messung (Additiv)	5					9	9
	VIP	4	1	1				
	Folie	1	1	1				
	Betriebskosten / Wartung	10	1	1	1	1	3	3
	Attractivity		195	297	177	195	177	195
	Attractivity [1 … 10]		7	10	6	7	6	7
	Risk / Effort		82	120	86	94	104	142
	Risk / Effort [1 … 10]		6	8	6	7	7	10
	Costs		47	67	71	91	163	183
	Costs [1…10]		3	4	4	5	9	10

Abbildung 31: Bewertung Konzepte.

Technisch attraktiv hat sich vor allem das Konzept K2 gezeigt. Dieses Konzept beinhaltet die Sensortechnologie des IPM, wobei Problematiken der ungewollten Beladung des Sensors mit z.B. Wasser oder VOCs aus dem Aufstellraum durch eine Heizfunktion (Prinzip: lokales Heizen) und das Problem des Signaldrift durch einen gekapselten Referenzsensor gelöst werden können.
Im weiteren Projektverlauf sollen diese Konzepte nun weiter untersucht und detailliert werden. Durch eine Konkretisierung der Anwendungsfälle (Use-Cases) soll feiner detailliert werden und die abgeleiteten Teilfunktionen differenzierte und konkreter spezifiziert werden (Festlegung von Einsatzgrenzen/ Beschreibung der Randbedingungen ➔ Entwurf einer Sensorspezifikation).

Sensor-Entwicklung

Zunächst wurden durch Experimente alle Parameter des Beladungssensors erfasst und optimiert. Hierzu zählte unter anderem die Auswahl eines geeigneten Sensorsubstartes, einer geeigneten Isolationschicht und die Optimierung der Sensorstrukturen.
Ein Sensor auf Basis der 3-Omega-Methode misst die Summe der thermischen Eigenschaften seiner Umgebung. Diese setzen sich zusammen aus dem verwendeten Substrat, einer evtl. vorliegenden Isolation der Messstruktur und, im Fall des Sorptionssensors, der Beschichtung zum Beispiel mit Aktivkohle. Bevor daher das Sensorlayout optimiert werden kann, muss erst getestet werden, welche Kombination aus Substrat und Isolation die größte Sensitivität in einer Gasförmigen Testatmosphäre erzeugt. Hierzu wurden auf Substraten aus Glas, Polyetherimid (PEI), Polyimid (PI) und den LTCC Ceramiken Heratape® CT702 und CT708 Sensorstrukturen aus Gold gefertigt. Diese wurden dann entweder mit einer ca. 5µm dicken SU8- oder einer 1,5µm dicken PI-Schicht isoliert. Aus jeder Materialkombination liegen für die Arbeiten jeweils mindesten ein Wafer bereit.
Als Basis Sensorlayout für die Tests wurde das Layout 2L3A gewählt (Abbildung 32). Neben der 3-Omega-Messstruktur besitzt dieses Layout auch noch einen Interdigitalkondensator (IDK), der zur Messung des elektrischen Widerstandes der Aktivkohle verwendet werden kann. Dieser besitzt keine Isolation, um einen Kontakt zum untersuchenden Material herstellen zu können.

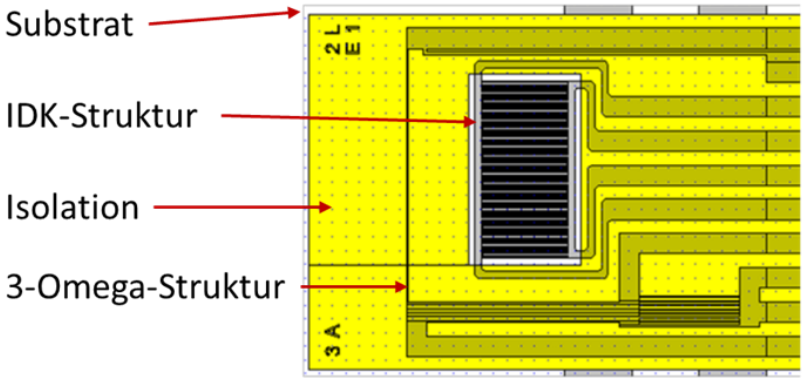
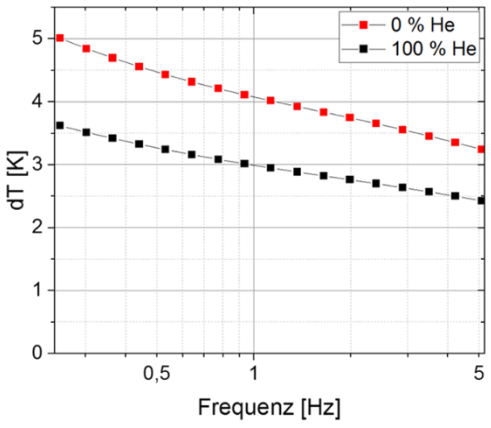


Abbildung 32: Die ersten 10mm der 3-Omega-Sensorstruktur 2L3A. Der gesamte Sensor ist ein Streifen mit ca. 50mm Länge. Neben der 3-Omega-Struktur befindet sich auf dem Sensor auch ein nicht-isolierter IDK. So kann zusätzlich die Leitfähigkeit der Aktivkohle bestimmt werden.

Durchzuführende Versuchsreihen

Am Fraunhofer ISE wurden für die erste Experimentreihe diverse Sensoren des Fraunhofer IPM mit Aktivkohle, dem MOF[1] UTSA und dem Zeolith ZIF8 beschichtet. UTSA8 ist hydrophil wogegen ZIF8 hydrophob ist, auf beiden Stoffen wie auch der Aktivkohle kann Propan adsorbieren. Neben den beschichteten Sensoren werden auch unbeschichtete Sensoren und Sensoren ohne Isolation in den im folgenden beschriebenen Versuchsreihen charakterisiert.

Die geplanten Versuchsreihen sollen nun folgendermaßen durchgeführt werden. Die Sensoren werden zu Beginn in einer Trägergasatmosphäre aus reiner Luft charakterisiert, danach wird in 25 vol.% Schritten das Trägergas durch ein Messgas substituiert. Für die ersten Versuche werden hierzu Helium und Argon als Messgas verwendet. Beide Gase adsorbieren nicht auf den untersuchten Beschichtungen, Argon hat aber thermisch sehr ähnliche Eigenschaften wie Propan. Der nächste Versuch besteht aus der Messung des Verhaltens unter gesättigter Luftfeuchte, hierzu wird trockene Luft und Luft mit ca. 90% rel. Feuchte (@ 22°C) abwechselnd auf den Sensor geleitet. Der dritte Schritt ist die gezielte Beaufschlagung mit Propan. Hier dient aus Sicherheitsgründen Stickstoff als Trägergas welches dann wieder in 25 vol.% Schritten durch Propan ersetzt wird. Propan ist thermisch Argon sehr ähnlich wird aber in den untersuchten Schichten adsorbiert, wodurch sich eine Veränderung des Signals ergeben sollte.



$$rel.\ Signalhub = \frac{\blacksquare - \blacksquare}{\blacksquare}$$

$$\overline{m} = \frac{\sum rel.Signalhub}{17}$$

Abbildung 33: Zur Bestimmung des Signalhubes bei der Beaufschlagung mit einem Messgas wurde im Bereich von 0.3 bis 5 Hz die Abweichung von der Luft-Kurve (hier 0%-He in rot) für verschiedene Substrat und Isolationskonfigu-rationen ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 31 zu sehen.

Für die unbeschichteten Sensoren wurde eine erste Performanceabschätzung erstellt. Hierzu wurde für die Beaufschlagung mit Argon und Helium jeweils der relative Signalhub der 3-Omegaamplitude im

[1] Englische Abkürzung für “metal-organic frameworks”

Messfrequenzbereich von 0.3 bis 5 Hz bestimmt (siehe Abbildung 33). Je nach Substrat-Isolation-Kombination fällt dieser Signalhub anders aus (siehe Abbildung 34).
Die Sensoren aus Polyimid und Polyetherimid zeigen tendenziell größere Signalhübe als die aus Keramik und Glas. Einen großen Einfluss hat auch die Isolation, ohne Isolation ist der Signalhub am stärksten. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden für die ersten Beschichtungen vorwiegend Sensoren aus Polyimid und Polyetherimid mit Isolation aus SU8 gewählt.

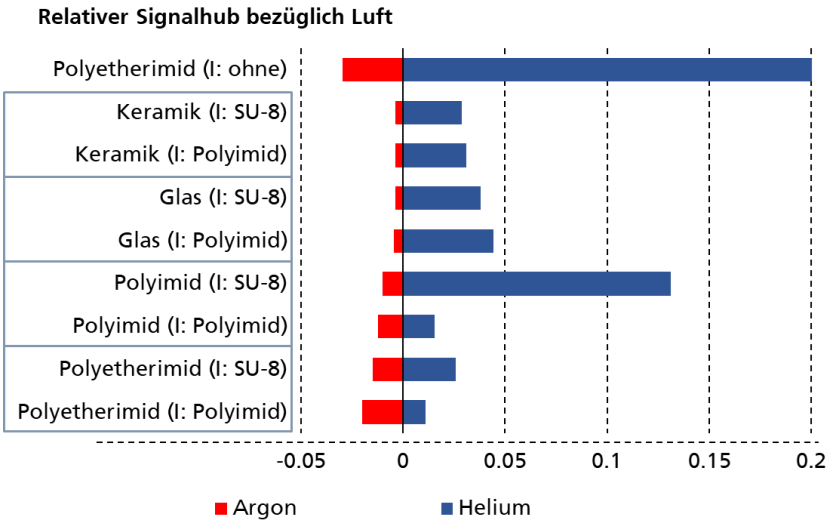


Abbildung 34: Vergleich der verschiedenen relativen Signalhübe bei der Beaufschlagung mit Helium bzw. Argon. Die Sensoren aus Polyimid und Polyetherimid zeigen tendenziell größere Signalhübe als die aus Keramik und Glas. Einen großen Einfluss hat auch die Isolation, ohne Isolation ist der Signalhub am stärksten.

Teststandkonzept zur Evaluierung der Sensorik

Der Fokus in diesem Testaufbau lag insbesondere auf dem systematischen Vergleich des Verhaltens bei der Beaufschlagung der Sensorik mit Propan und mit Argon, sowie der Untersuchung des Verhaltens unter wechselnden Luftfeuchtebedingungen, welche unter möglichst real simulierten Bedingungen getestet wurden. Das entwickelte Sensorprinzip zur Beladungsmessung wurde auch gegen vergleichbare Sensorkonzepte basierend auf marktverfügbaren Sensoren verglichen.
Dazu wurden die zu untersuchenden Sensoren bzw. Sensorkonzepte auf ein PCB (Sensorlanze) integriert, welches in das Sorptionsbett eingebracht werden konnte. So konnten alle Vergleichskonzepte in einem definierten Positionsbereich im Sorptionsbett eingebracht und untersucht werden. Das Konzept dieser Sensorlanze sah eine Modularisierung vor, welche es auch zu späterem Zeitpunkt ermöglichte, neue bzw. optimierte Konzepte einbinden und testen zu können. An dieser Stelle konnte auch der durch das IPM entwickelte Beladungssensor in das Sorptionsbett eingebracht werden.

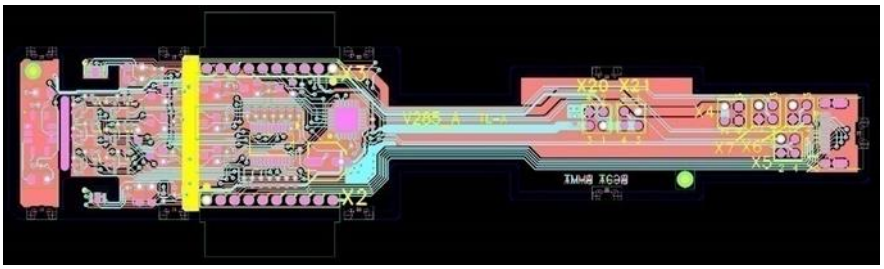


Abbildung 35: Abbildung des Sensorlanzen- Layouts. Das PCB trägt sowohl den durch das IPM entwickelten Beladungssensor, sowie marktverfügbare Sensoren. Die Konzepte lassen sich so an gleicher Position im Sorptionsbett evaluieren.

Zur Evaluierung der Sensoren wurde ein angepasstes Test-Sorptionsbett aufgebaut, in dem die zu evaluierenden Sensoren / Sensorkonzepte eingebracht werden konnten. Dabei konnte das Verhalten der Sensoren und des Sorptionsbettes an bis zu sechs verschiedenen Positionen entlang der Lauflänge des Bettes untersucht werden.

Aufbau des Test-Sorptionsbetts mit eingesetzten Sensorlanzen

Die Positionen der eingesetzten Sensorlanzen waren äquidistant über die Lauflänge des Sorptionsbettes verteilt. Die Sensorlanze im Bett sollte dabei eine möglichst geringe Beeinflussung/ Beeinträchtigung der Bettströmung verursachen. Dazu wurde der Messkopf der Sensorlanze mit einem Edelstahl-Drahtkäfig umbaut, welcher mit Sorptionsmaterial gefüllt war.

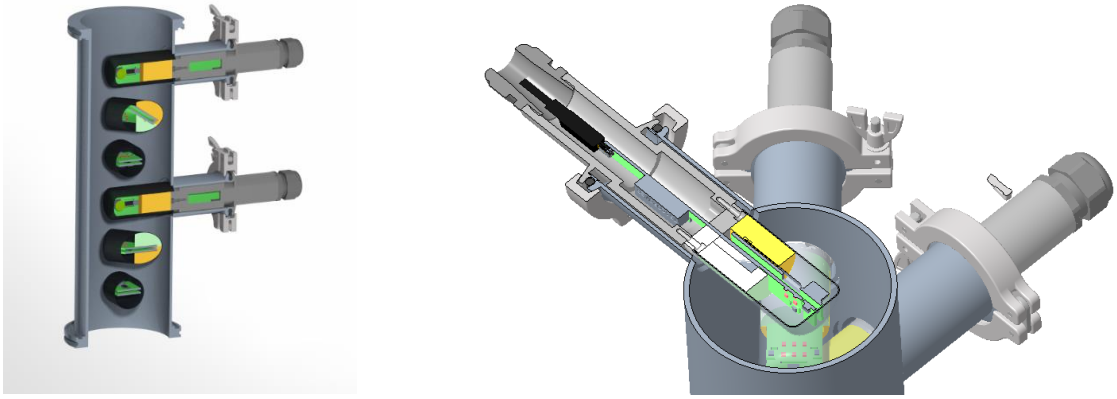


Abbildung 36: Einbringung der Sensorlanzen in das Sorptionsbett

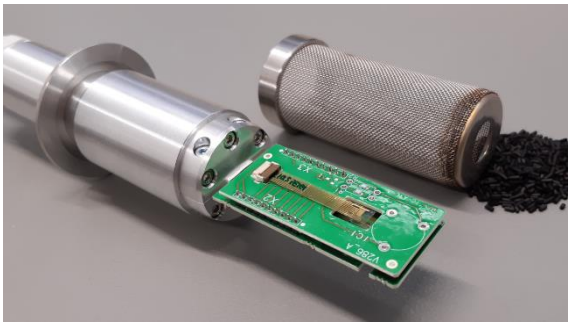


Abbildung 37: Sensorlanze mit integrierten Beladungssensor (grünes PCB) und Lanzenkäfig mit gewaschener Aktivkohle, um Belastung mit Kleinpartikeln an allen Sensoren zu vermeiden

Um die unterschiedlichen stofflichen Bedingungen zu simulieren, die den Parameterraum aller möglicher Bedingungen beschreiben, denen die Sensoren ausgesetzt sind, war ein ebenfalls modulares Teststandkonzept entwickelt worden. Folgende Eckpunkte dieses Parameterraums waren dadurch darstellbar:

- VOC-Konzentrationen, welche im Alterungstest des Sorptionsmaterials Anwendung fanden
- Injektion von VOC-Leitsubstanzen in hohen Konzentrationen $c_{VOC\text{-}Alterungstest} > c_{inject} > c_{MAK}$
- Relative Feuchtebeladung ($10\% < rH_{inject} < 80\%$)
- Temperatur des durchströmenden Gases (Luft, mit VOC-Leitsubstanzen angereichert): 40°C
- Sorptionsbetttemperatur stabilisiert auf 40°C
- Injektion von R290 ($0\% < c_{inject} < 100\%$)
- Injektion von CH_4, CO_2 ($0\% < c_{inject} < 100\%$)

Abbildung 38: Modulare Teststände zur Ankopplung an den Alterungs-teststand AcCoS, sowie zum Stand Alone-Betrieb unter einer Abzugskabine (links: vertikal orientiertes Sorptionsbett, oben, rechts: vertikal orientiertes Sorptionsbett unten

Das modulare Konzept sah zudem eine Ankopplungsmöglichkeit an den AcCoS-Prüfstand zur Versorgung mit konditionierter Luft aus dem Alterungstest vor. Das Sorptionsbett konnte daher auf die gleiche Art und Weise, wie bei der Alterung des Aktivkohlematerials durchströmt werden.

Anbindung der Sensorteststände an den Prüfstand AcCoS zur systematischen Alterung

Die Anbindung erfolgte hier an ein senkrecht orientiertes Sorptionsbett. Durch diese Konfiguration ließen sich zwei Teststände an einen Abgang des Prüfstands AcCoS zur systematischen Alterung ankoppeln.

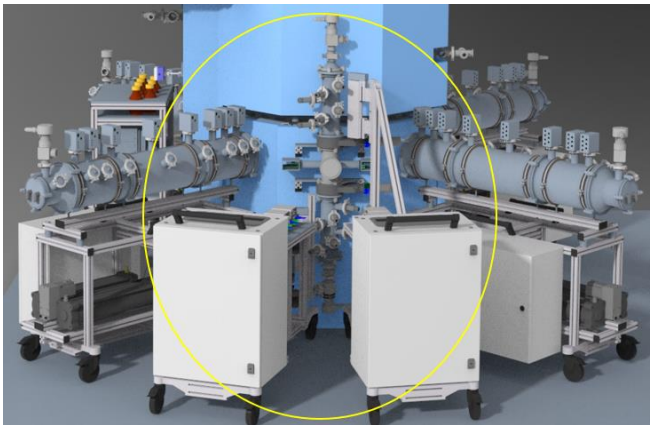


Abbildung 39: Prüfstand AcCoS zur systematischen Alterung mit angesetzten „Sensor-Chucks“

Zudem erlaubte der kompakte modulare Aufbau des so genannten „Sensor-Chucks“ den Prüfstand in eine entsprechend sichere Umgebung (Labor mit entsprechender Abzugskabine) zu überführen und dort Untersuchungen mit brennbaren Gasen durchzuführen.

Abbildung 40: Realisierte „Sensor Chucks“ in Betrieb

1.3 AP 3 Absicherung Sekundärkreis

Ziel des Arbeitspaketes war die Absicherung des Sekundärkreises gegen Leckage von R290 entlang der Punkte: Erkennen, Vermeiden, Abstellen.

Aufgrund von Leckagen über die Wärmeübertrager in einem Kältekreis (Verdampfer und/oder Verflüssiger) besteht statistisch die Möglichkeit, dass das Kältemittel R290 im Primärkreislauf (quellenseitig) oder im Sekundärkreislauf (heizkreisseitig) in Lösung geht und sich dort akkumuliert. In AP 3 sollten daher Konzepte entwickelt werden, mit deren Hilfe der Sekundärkreis abgesichert werden kann. Bislang erforderte der Austritt keinerlei Aufmerksamkeit, weil die bisherigen Kältemittel in Bezug auf ihr Risikopotenzial per Definition als Sicherheitskältemittel eingestuft waren.

Ziele des Arbeitspaketes
Absicherung des Sekundärkreises gegen Leckage von R290 zur Vermeidung von Propanaustritten und entsprechende Gefährdung über das Sekundärnetz beispielsweise über Heizkörper ins Gebäude (vgl. Abbildung 41)

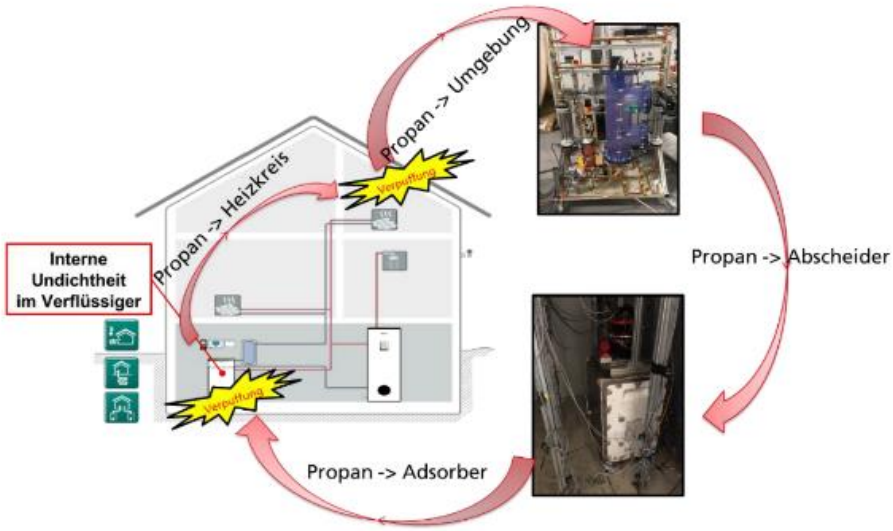


Abbildung 41: Mögliche Gefährdung durch Propanfreisetzung über den Sekundärkreise (oben) im Vergleich zur Freisetzung im Kältekreisgehäuse abgesichert über Sorptionsbett (unten)

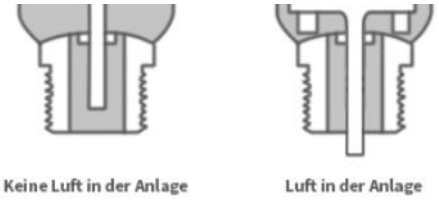
Ergebnisse Sekundärkreisteststand

Am Fraunhofer ISE wurde ein Teststand „Sekundärseite“ geplant und aufgebaut. Am Teststand „Sekundärseite“ wurden Messungen zur Abscheidung von Propan aus dem Sekundärkreis über einen Blasenabscheider durchgeführt. In folgender Abbildung 42 ist der Teststand im Abzug dargestellt; hier konnte ein begehbarer Abzug des Fraunhofer ISE genutzt werden, um den sicherheitstechnischen und anlagenspezifischen Anforderungen gerecht zu werden.

Abbildung 42: Teststand zur Vermessung von Propanleckagen im Sekundärkreis einer Wärmepumpe.

Der Sekundärkreislauf besteht aus einer Wasserpumpe, dem Wasserkreis, einer Abscheidevorrichtung und verschiedenen Sensoren. Betrachtet man den Wasserkreis der Reihe nach, so fördert die Pumpe das Wasser über zwei Temperatursensoren, einen Drucksensor und einem Volumenstromsensor zum Plattenwärmeübertrager. Hier wird das Wasser mittels eines Thermostaten auf die gewünschte Temperatur gebracht. Anschließend strömt das Wasser über das Membranausdehnungsgefäß (MAG) zu einem weiteren Temperatur- und Drucksensor. Nun strömt das Wasser durch ein Schauglas zum Abscheider und wieder durch in Schauglas zurück zur Pumpe. Die beiden Schaugläser vor und nach der Abscheidevorrichtung dienen zur Sichtkontrolle des Abscheiders. In der Theorie sollte nach dem Abscheider, wenn dieser das gesamte Propan abgeschieden hat, keine Bläschen im Wasser zu sehen sein. Der Teststand wird über ein Ventil vor der Pumpe mit Wasser befüllt.
Um zu gewährleisten, dass sich möglichst keine Luft mehr im Sekundärkreislauf befindet, kann der Teststand an mehreren Stellen entlüftet werden.
Die Einspeisung des Propans erfolgt zwischen Plattenwärmeübertrager und dem MAG. Das für die Messung benötigte Propan befindet sich in einer Propanflasche, welche mittels Druck- und Temperatursensor überwacht wird. Von dort gelangt das Propan zu einem Massenstromregler (MFC), welcher die gewünschte Menge Propan in den Sekundärkreislauf weiterleitet. Neben der kleinen, in den Teststand integrierten Gasflasche besteht die Möglichkeit, vor den beiden Sensoren eine weitere Gasflasche in Reihe zu schalten, um längere Versuche, bzw. höhere Massenströme zu fahren.
Nach dem das Propan in das Wasser geleitet wurde, kann es über einen Gasabscheider in den hier blau dargestellten Behälter (*Durchbruchsanalysator*) geströmt und bilanziert werden.
Der Gasabscheider ist in eine Abscheidevorrichtung mit einem zusätzlichen Manometer bis 4 bar und einem Sicherheitsventil bei 6 bar, zuvor 3 bar, integriert.

Abbildung 43: Abscheidevorrichtung mit Manometer, Gasabscheider und Sicherheitsventil



folgt: Eine Kugel, bzw. ein Schwimmkörper, welche in einer Auftriebskraft nach oben gedrückt und verschließt mit einer ı. die Ventilöffnung. Gelangt Luft, oder in diesem Fall Gasblasen Druck des Wassers dafür, dass sich die Kugel senkt und die Luft, ald die Gasblasen entwichen sind, wird die Kugel durch das ırückgedrückt und verschließt die Ventilöffnung wieder, siehe

Abbildung 44. Das in der Abscheidevorrichtung verbaute Manometer dient der Überwachung des Drucks und das Sicherheitsventil sorgt dafür, dass bei einer Überschreitung von 6 bar, Druck im Wasserkreis abgebaut wird und nicht über die 6 bar steigt.
Um die Auswirkungen einer Propanleckage in den Heizkreis untersuchen zu können, wurden unterschiedliche Messungen bei veränderbaren Parametern durchgeführt. Es wurde untersucht, wie sich das Propan bei unterschiedlichen Leckagemassenströme Propan, unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten des Wassers und unterschiedlichen Temperaturen im Heizkreis verhält. Außerdem wurde der Gasabscheider evaluiert, um zu untersuchen, unter welchen Bedienungen das meiste Propan abgeschieden werden kann.

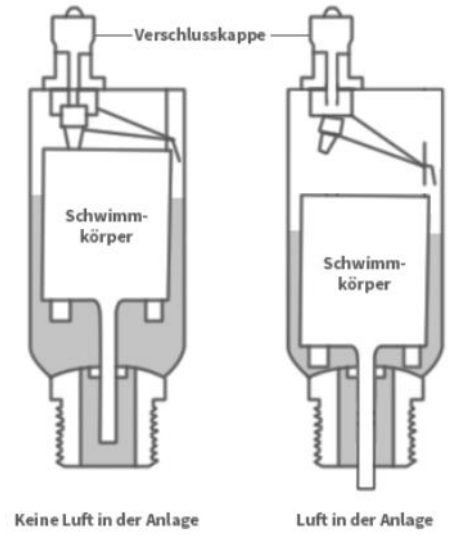


Abbildung 44: Aufbau und Funktionsweise eines Schnellentlüfters.

Die Auswertungen der Messungen zeigen, dass lediglich der Leckagemassenstrom an Propan einen Einfluss auf die Menge des abgeschiedenen Propans und die dafür benötigte Zeit hat. Je größer die Propanleckage ist, umso mehr Propan wird dementsprechend in kürzerer Zeit abgeschieden. Durch die Variation des Volumenstrom des Wassers verändert sich der Druck im Heizkreis und steigt bei zunehmendem Volumenstrom an. Ab einem bestimmten Druck kann nun auch Propan über ein eingebautes Sicherheitsventil und nicht nur über den Gasabscheider entweichen. Die Temperatur des Heizkreises hat keinen Einfluss auf die Messungen. Des Weiteren zeigen die Messungen, dass der Gasabscheider einen Großteil des Propans abscheidet. Die Messungen zeigen außerdem, dass durch eine niedrigere Strömungsgeschwindigkeit des Wassers mehr Propan über den Gasabscheider abgeschieden werden kann.

Bewertung der Ergebnisse

Die Ergebnisse aus den Unter-Arbeitspaketen wurden aufbereitet und mit externen Sicherheitsexperten / Institutionen diskutiert. Auf dieser Basis wurden im weiteren Verlauf eine Risikobewertung und eine Bewertung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten vorgenommen.
Die Ergebnisse bestätigen insbesondere die Vermutung, dass bei großen Leckagemassenströmen im Schnellentlüfter nur eine unvollständige Abscheidung gewährleistet wird, so dass in diesen Fällen ohne weitere Maßnahmen Propan in das jeweilige Sekundärnetz propagieren kann. Es erscheint insbesondere sinnvoll, Vorrichtungen vorzusehen, die bei hohen Gasanteilen oder Überdrücken, die Verbindung zum restlichen Sekundärnetz schließen, so dass eine möglichst vollständige Gasabfuhr über das Überdruckventil erfolgen kann. So wird auch der Kontakt mit großen Mengen Kreislaufwasser vermieden, in denen sich Propan lösen könnte.

1.4 AP 4 Systemintegration

AP 4.1 Inhaltliche Änderungen

Es wurde vom ursprünglichen Plan, im Rahmen des Förderprojektes safeSENSE einen Systemprüfstand zu entwickeln und aufzubauen, Abstand genommen, da im Rahmen der Produktentwicklung aroTHERM in Ende 2021/ Beginn 2022 parallel und unabhängig zum Förderprojekt safeSENSE Entwicklung und Aufbau eines eigenen Systemprüfstands zur Evaluation von undichten Kältekreisen in Wärmepumpen mit brennbaren Kältemittel erfolgte.

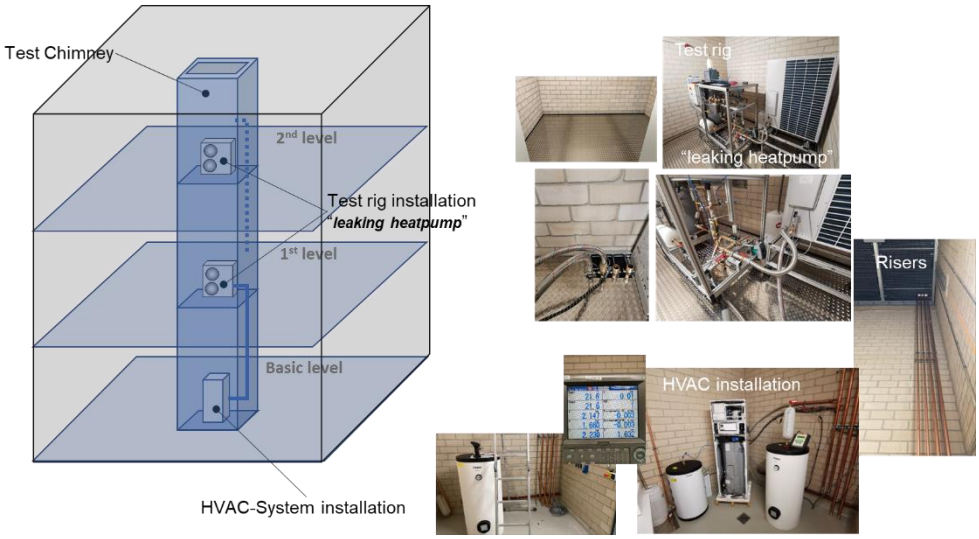


Abbildung 45: Vaillant Group Systemprüfstand für Wärmepumpen mit „undichten Kältekreisen".

So entfielen die entsprechende Arbeitsinhalte innerhalb des AP 4 „Systemintegration".
Im Rahmen des Projekttreffens am 23.11.2022 in Freiburg formulierte das Projektteam den Vorschlag, die safeSENSE- Projektlaufzeit um ein Jahr kostenneutral (von 31.12.2022 auf 31.12.2023) zu verlängern, um aufgrund der sehr guten Ergebnisse aus AP 1 umfangreichere und detailliertere Arbeiten zur Evaluierung und Modifikation des Sorptionselementes, insbesondere tiefgreifendere Erkenntnisse im Bereich des Einflusses der Bettgestaltung/ -geometrie auf das Sorptionsverhalten zu erhalten.

AP 4.2 Modulentwicklung/ -testdurchführung

Ziel der Modulentwicklung/ -testdurchführung war der erfolgreiche Worst-Case Leckagetest der Module mit auf simulierter Produktlebensdauer vorgealtertem Sorptionsmaterial.
Die im Alterungsprüfstand AcCoS auf 30 Jahresäquivalente gealterten Aktivkohlen wurden einem „Worst-Case" Versuch auf Modulebene unterzogen. Dafür wurden die Aktivkohlen vom Typ 1 und Typ 2 in ein identisches definiertes Versuchsmustergehäuse gefüllt und im Prüfstand in Hochdorf (aus safeHP Förderkennzeichen: 03ET1353A/B) getestet. Das Versuchsmuster-Gehäuse (L-Type – senkrecht) unterschied sich leicht zu dem Aufbau aus den vorherigen Versuchen (I-Type).

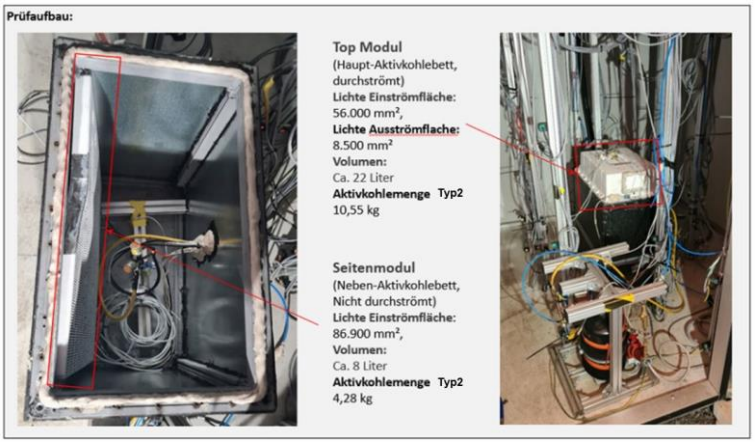


Abbildung 46: Eingebaute Prüflinge (weiße Gehäuse, links: Nebenbett, rechts: Hauptbett) in der Prüfumgebung/ im Prüfraum in Hochdorf.

Im Gegensatz zu den vorherigen Designs war das Sorptionsbett zweigeteilt, in ein Hauptbett (etwa 70% der Aktivkohlemenge) und ein Nebenbett (etwa 30% der Aktivkohlemenge). Das Hauptbett war zur

Aufnahme des Kältemittels während einer großen Leckage konzipiert und das Nebenbett diente dem Konzentrationsabbau innerhalb des Gehäuses nach einer großen Leckage.
Dieser Referenzdesignstand zur Evaluierung des gealterten Sorptionsmaterials wurde ebenfalls mit einer Kältemittelmenge von 1kg mittels eines simulierten Rohrabrisses getestet. Im Nachgang nach diesem Ausströmtest wurde über einen Zeitraum von ca. 4 Wochen das Desorptionsverhalten untersucht.
Bei dieser Testdurchführung spielt die Testkammerdichtheit eine entscheidende Rolle. Hier ist sicherzustellen, dass Einflüsse auf die Konzentrationsmessungen im Testraum quantifizierbar sind. Daher wurde im Vorfeld eines jeden Versuches die Kammerdichtheit bestimmt. Hierbei wird jeweils eine definierte Menge Propan (200g) in die Kammer eingebracht und der Konzentrationsentwicklung über ein definiertes Zeitfenster von mindestens 24 Stunden bis 48 Stunden mit kalibrieren Kältemittelsensoren gemessen. Die maximal zulässige Luftwechselrate im Testraum sollte dabei immer unterhalb von 0,05 h^{-1} liegen. In der nachfolgenden Grafik ist der Verlauf der letzten Messungen der Luftwechselrate bis zu den 30 Jahresäquivalenten dargestellt. Vor dem Start der Messungen mit der 30 Jahresäquivalent gealterten Aktivkohle, Typ 2, lag die Luftwechselrate unterhalb von 0,003 h^{-1} und nach dem Test der gealterten Aktivkohle, Typ 1, unterhalb von 0,004 h^{-1}. Damit lagen die Messwerte mit einer Dezimale weit unterhalb des geforderten Wertes von 0,05^{h-1}.

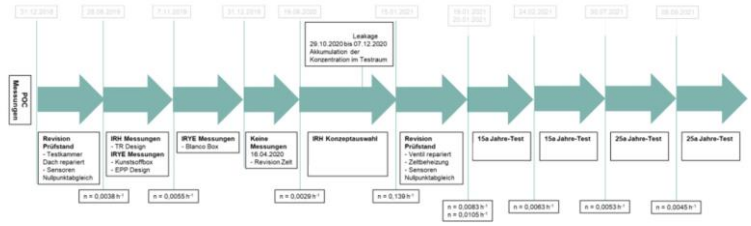


Abbildung 47: Historischer Verlauf der Luftwechselrate der Prüfkammer.

Innerhalb des Projektverlaufes wurden beide Aktivkohlevarianten vom Typ 1 und Typ 2 erfolgreich getestet. Innerhalb der im Vorgängerprojekt safeHP entwickelten Testkammer sind auf zwei radial angeordneten Rechteckbahnen insgesamt 12 (8 auf der Innenbahn 4 auf der Außenbahn) lotrechte Messlanzen montiert und positioniert. Auf den Messlanzen werden insgesamt 76 Gas-Konzentrationssensoren, welche ebenfalls in dem vorherigen Projekt auf ihre Messgenauigkeit und ihr dynamisches Ansprechverhalten charakterisiert wurden, eingesetzt, um die Konzentrationsverteilung im Testraum bei den Testdurchführungen zuverlässig erfassen und dokumentieren zu können. Die folgende Abbildung zeigt die Bezeichnung und Anordnung der Messlanzen und -ebenen (Layer).

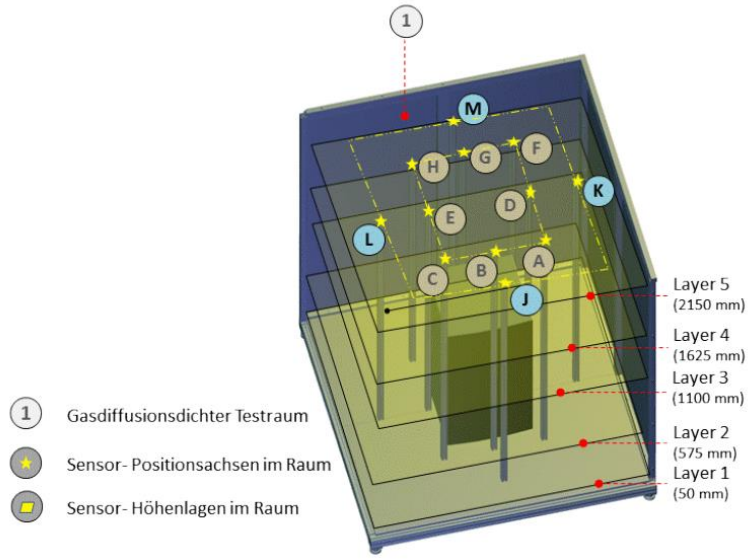


Abbildung 48: Ausströmkammer mit Verteilung der Gassensoren im Raum

Durch die Vielzahl an Gas-Sensoren, die in der Testkammer verteilt sind, war eine genaue räumliche Auflösung einer (simulierten) Leckage möglich. Zusätzlich zu den festverbauten Sensoren an den Messlanzen befinden sich zusätzliche frei positionierbare Sensoren innerhalb und außerhalb des Prüflings. Diese sind mit dem Buchstaben Z gekennzeichnet.
Bei dem Prüfaufbau kommen drei verschiedene Messbereiche bei der Gaskonzentrationsmessung zum Einsatz, in den Ebenen der Messlanzen (Layer) sind jeweils 0 bis 2 Vol.-%, als auch 0 bis 100 Vol.-% Sensoren verbaut, um insbesondere den Messbereich bis zur unteren Zünd-/ Explosionsgrenze (0 bis 1,7 Vol.-% UEG) feiner auflösen zu können. Bei den frei positionierbaren Sensoren (Z) kommen 0 bis 10 Vol.-%, 0 bis 2 Vol.-%, sowie 0-100 Vol.-% Sensoren zum Einsatz.
In der folgenden Tabelle sind die Merkmale der 4 durchgeführten Versuche für die 30 Jahres Messungen dargestellt.

Tabelle 4: Übersicht der im Prüfstand in Hochdorf durchgeführten Versuche

Nr.	Versuch	Aktivkohle	Leckage	Prüfling	Prüfdauer	Propanmenge	Status
218	Referenzmessung mit unbelasteter Kohle	Typ 2	Rupture leak	Gehäuse Typ B	23 Tage	1kg	durchgeführt
221	30a gealterte Aktivkohle	Typ 2	Rupture leak	Gehäuse Typ B	27 Tage	1kg	durchgeführt
215	Referenzmessung mit unbelasteter Kohle	Typ 1	Rupture leak	Gehäuse Typ B	22 Tage	1kg	durchgeführt
227	30a gealterte Aktivkohle	Typ 1	Rupture leak	Gehäuse Typ B	22 Tage	1kg	durchgeführt

Die Aktivkohlen, welche eine gezielte Konditionierung bzw. Belastung von 30 Jahresäquivalenten durchschritten haben, wurden segmentweise demontiert und in Probenbehältern gelagert. Anschließend wurden diese Probenbehälter zum Prüffeld nach Hochdorf transportiert, wo diese zielgerichtet in die vorhandene Prüfumgebung implementiert wurden. Bei der „Befüllung“ des Prüfkörpers wurde darauf geachtet, dass die segmentierten Proben an die entsprechende Position innerhalb des Prüfkörpers eingebracht wurden. In der Abbildung ist das ursprüngliche Design (Sample A) aus den Versuchen der 15 & 25 Jahresäquivalent gealterten Aktivkohle dargestellt. Das Verfahren ist jedoch für das neue Design (Sample B identisch. Zusätzlich wurde jedoch noch das Nebenbett (Seiten-Modul) mit gealterter Aktivkohle befüllt.

Abbildung 49: Gezieltes Befüllen der Prüflinge mit Aktivkohle

In Abbildung 50 und Abbildung 51 ist auf der rechten Seite der Konzentrationsverlauf innerhalb der Testkammer über den gesamten Testzeitraum der 30 Jahresäquivalent vorgealterte Aktivkohle Typ 1 zu sehen.
Auf der linken Seite ist der Konzentrationsverlauf innerhalb des Prototyp Gehäuses aufgetragen. Hier sieht man sehr gut den positiven Einfluss des Nebenbettes, der dazu führt, dass die Konzentration schnell in den Bereich zwischen UFL (upper flammability level) und LFL (lower flammability level) sinkt. Langfristig bleibt

die Konzentration unterhalb von LFL und steigt auch nicht wieder z.B. aufgrund von

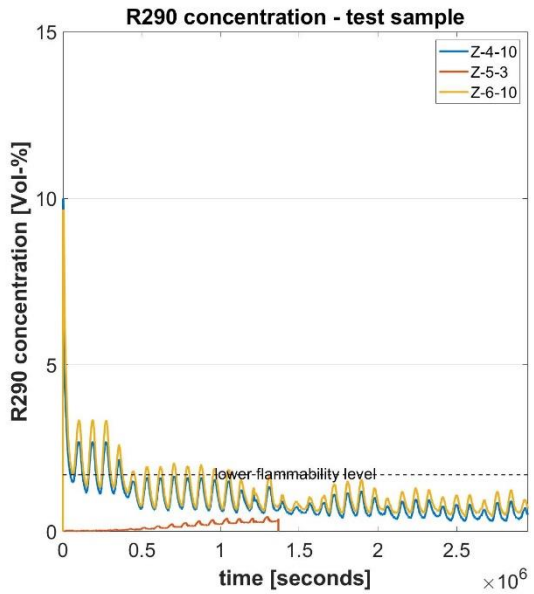


Abbildung 50: Gemittelte Propankonzentration verschiedener Höhen (Layer 1 bis Layer 8) im Modellraum über der Zeit. Verwendete Aktivkohle: **Typ 1**, 30 Jahresäquivalent konditioniert

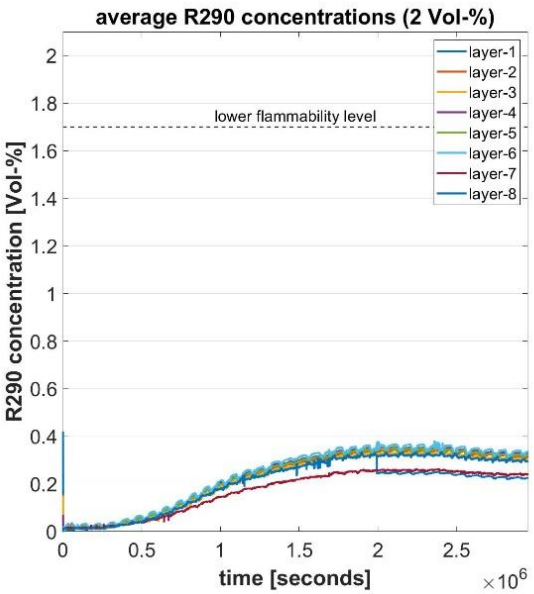
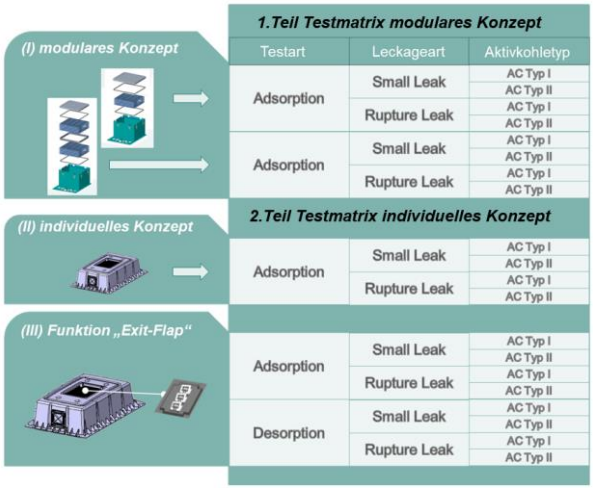


Abbildung 51: Gemittelte Propankonzentration verschiedener Höhen (Layer 1 bis Layer 8) im Modellraum über der Zeit. Verwendete Aktivkohle: **Typ 1**, 30 Jahresäquivalent konditioniert

Temperaturschwankungen. Die vorhanden Temperaturmodulationen, verursacht durch den Tag- und Nachtzyklus, bewirken durch De- und Adsorption Konzentrationsschwankungen innerhalb des Sorptionsbettes und sind in dem zeitlichen Konzentrationsverlauf (Abbildung 50 & Abbildung 51) ersichtlich. Die markierte LFL–Grenze liegt in den Diagrammen der folgenden Abbildung bei 1,7 Vol-%.

Aus der Abbildung 51 ist deutlich ersichtlich, dass es im Modellraum nach einer simulierten Leckage (Totalabriss - Das bedeutet, dass die komplette Füllmenge des Kältekreises innerhalb weniger Minuten (< 4 Minuten) austritt.) zu einer Anreicherung der Propankonzentration führt, jedoch bleibt die maximal gemessene Propankonzentration während der kompletten Messdauer unterhalb von 25% LFL.
(25% LFL entspricht 0,43 Vol.-% bezogen auf LFL von 1,7 Vol.-% bzw. 0,53 Vol.-% bezogen auf LFL von 2,1 Vol.-%)
Dieser Effekt (Anreicherung der Propanmoleküle im Modellraum) beruht auf dem thermodynamischen Ausgleich des Aktivkohlebettes mit dem Kältekreisgehäuse und dem Modellraum, sprich, das System strebt einen thermodynamisches Gleichgewichtszustand an. So desorbiert das Propan von der Aktivkohle in den Modellraum. In der Praxis ist mit einer weiteren Anreicherung über die gezeigten Werte hinaus eher nicht zu rechnen, weil die im Testraum gemessenen Luftwechselrate um etwa Faktor 10 bis 20 unterhalb der normalen im Raum vorkommenden Luftwechselraten liegt.

Empirische Validierung der Abhängigkeit zwischen Modulgeometrie und Sorptionsmaterial



1.Teil Testmatrix modulares Konzept		
Testart	Leckageart	Aktivkohletyp
Adsorption	Small Leak	AC Typ I
		AC Typ II
	Rupture Leak	AC Typ I
		AC Typ II
Adsorption	Small Leak	AC Typ I
		AC Typ II
	Rupture Leak	AC Typ I
		AC Typ II
2.Teil Testmatrix individuelles Konzept		
Adsorption	Small Leak	AC Typ I
		AC Typ II
	Rupture Leak	AC Typ I
		AC Typ II
Adsorption	Small Leak	AC Typ I
		AC Typ II
	Rupture Leak	AC Typ I
		AC Typ II
Desorption	Small Leak	AC Typ I
		AC Typ II
	Rupture Leak	AC Typ I
		AC Typ II

Abbildung 52: Testmatrix Modulkonzepte

Ziel innerhalb der Verlängerungsphase des Projektes war es, die Wechselwirkung der Sorptionsbettgeometrie, deren Einfluss auf die Modulgestaltung und damit die Ableitung auf eine mögliche Handlungsempfehlung zur konstruktiven Wärmepumpengestaltung zu untersuchen.

Die im 1. Teil durchgeführte funktionale Überprüfung des modular erweiterbaren Konzeptes mit einer segmentierten Sorptionsbettgestaltung (Multiple Bed Design) siehe Abbildung 52 brachte leider nicht den gewünschten Erfolg. Die Musteraufbauten zeigten unabhängig von der Art des gewählten Typs des Sorptionsmaterials, homogene Beladungen des Sorptionsmaterials. Allerdings ergaben sich bedingt durch die gewählte komplexe Bettgestaltung signifikante konstruktionsbedingte Undichtheiten und indikative Randgängigkeiten innerhalb des Sorptionsbettes, wodurch noch während der Leckage-Testphase es im Test zu einem Kältemittel-Durchtritt vom Kältekreisgehäuseinneren hin zum Aufstellraum kam. Trotz der Umsetzung einiger konstruktiver, abstellender Maßnahmen veränderte sich dieser Durchtrittseffekt auf Modulebene nicht signifikant, sodass in dieser Projektphase das modulare Sorptionsmodulkonzept im weiteren Projektverlauf nachrangig weiterverfolgt wurde.

Im 2. Teil lag der Fokus in der funktionalen Überprüfung der individuell auf die Leistungsgröße der Wärmepumpe ausgelegten Sorptionsbettgestaltung (Single Bed Design). Durch die robuste Art der Bettgestaltung und der Adaption an das Kältekreisgehäuse konnten unabhängig von Kältemittel-Ausströmbedingungen Kältemittel-Durchtritte vom Kältekreisgehäuse hin zum Aufstellraum vermieden werden. Die Überprüfung des Desorptionsverhaltens über eine mehrwöchige Monitoringphase in der Testumgebung war unter den definierten Grenztestbedingungen ebenfalls erfolgreich.
Die Testdurchführung, mit der in der Druckentlastungsöffnung des Moduls installierten „Exit-Flap“ zeigte erwartungsgemäß keinen Einfluss auf das Adsortionsverhalten. Ein signifikant günstigeres Desorptionsverhalten konnte allerdings auch nicht festgestellt werden, sodass sich bei dieser technischen Maßnahme die Sinnfrage stellt.

Zusammenfassung Konzeptbewertung

Im Nachgang wurden auf Basis der Testergebnisse insgesamt 8 Modul-Setups definiert und bewertet:

Das Ziel dieser Bewertung war es, das favorisierte Test-Setup zu definieren, mit welchem die letzten Worst-Case-Versuchstests nach Anpassung der Testumgebung durchgeführt werden sollen.
Die Modul-Setups definierten sich generisch aus den folgenden 3 Gestaltungsmerkmalen:

1. Homogene Schüttung versus geteilte Schüttung innerhalb des Moduls
   (Klärung der Fragestellung, ob das Sicherheitskonzept einem „kritischen Desorptionsrisiko" unterliegt (hoher Desorptionsmassenstrom))

2. „In das niederdruckdichte Kältekreisgehäuse integriertes Sorptionsmodul" versus eines „Von außen an das niederdruckdichte Kältekreisgehäuse adaptierte Sorptionsmodul"
   (Klärung der Fragestellung, ob ein konzeptionelles „Dichtigkeitsrisiko" besteht oder nicht)

3. Stehende versus liegende Ausführung des Sorptionsmoduls mit/ ohne zusätzliches passives Bett
   (Klärung der Fragestellung, ob das Sicherheitskonzept einem „grundsätzlichen Funktionsrisiko" unterliegt)

Zu den diskutierten Fragestellungen wurde ein entsprechender Testplan erstellt und die einzelnen Aspekte abgetestet. Es konnten entsprechende Ableitungen für eine Design-Rule der Integration des Sorptionsmodules abgeleitet werden.

AP 4.3 Test von Sensorik im Sorptionsbett

Aus Abbildung 53 ist ersichtlich, dass Propan durch eine Leckage im Verflüssiger an einen Gasabscheider gelangt und hier abgeschieden werden kann. Anschließend können zwei Betrachtungsweise erfolgen, dass eine ist die gezielte Gasabscheidung im Kältekreisgehäuse, wo die Umgebung durch das Sorptionsbett geschützt ist oder bei einem im Heizungssystem befindlichen Abscheider, welcher nicht Teil des Kältekreisgehäuses ist. Bei beiden Fällen spielt der zu erwartende Massenstrom durch den Gasabscheider eine zentrale Rolle, da dies zum einen ein Eingangsparameter für das Sorptionsbett darstellt und zum anderen sich hieraus eine Propanverteilung in einem Raum ableiten lässt. Durch den Teststand „Sekundärkreis" kann der Gasabscheider und eine Möglichkeit der Detektion von Propan in Wasser (IPM-Sensor) gut evaluiert werden und der Massenstrom ermittelt werden. Für den Fall, dass sich sehr kleine Propanmassenströmen einstellen und ein Abschalten der Maschine verspätet einsetzten wird, kann die geplante In-Situ-Messung der IPM-Sensoren Abhilfe schaffen. So kann das System mit der Evaluierung der Leckageprozesse im Heizkreis, der Gasabscheider und der In-Situ Messungen gesamtheitlich betrachtet werden. Ergänzend konnten die Ergebnisse der simulatorischen Untersuchung der Luftwechselrate in Innenräumen herangezogen werden, um ein mögliches Gefährdungspotential zu bewerten.

One pager Usecases for Status-Sensor Active Carbon
Monitoring RCM-casing / Refrigerant circuit

Structure

Main Use Case	(Load-) condition / status of active carbon			
Sub Use Case	**Detection R290**	**Water-load**		Co-Adsorbents
		intrinsic	extrinsic	intrinsic extrinsic
Tertiary Use Case	Push Message (Error via Display / App): 1. Refrigerant leakage detected 2. Interrupt operation 3. Trigger customer service 4. Trigger relay on HMU (e.g. for optional exhaust fan from installation room to outside) 5. Trigger data transfer to VG (data collection)			

Description

During operation it may happen that the refrigerant circuit get leaky and R290 enters the RCM casing.
Thereby the R290 can differ from quite low concentration (e.g. small leaks) to higher concentrations (e.g. rupture leak).

Also in case of R290 entering into CHW or brine circuit, it may enter the RCM casing via the de-airing devices, as those are installed within the RCM casing.

Metrics:
- R290
- R.H.

Picture

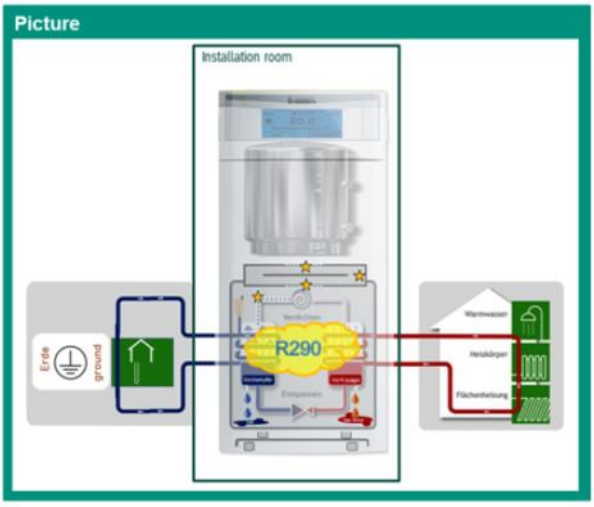


Abbildung 53: Systembetrachtung; Use-Case: Interne Undichtigkeit am Verflüssiger und / oder Verdampfer mit Feuchte- und Propanaustritt in das Kältekreisgehäuse.

Evaluierung des System- Sicherheitsmoduls mit integrierter Sorptionsbett-Überwachung

Wie im vorangegangenen Abschnitt bereits angedeutet, war im Rahmen des Arbeitspaketes 4 zudem geplant, im Prüffeld Hochdorf das System „Sicherheitsmodul mit integrierter Bettüberwachung“ auf seine Funktionalität im Systemumfeld hin zu untersuchen (vgl. Abbildung 41).
Daher wurde im Projekt safeSENSE das Testkonzept einer integrierten Sensorlösung auf Basis des aktuellen Sicherheitsmodul-Designs entwickelt.
Seitens Vaillant wurde zum Testzeitpunkt entschieden, den Testfall auf einen Use-Case auszurichten mit einer möglichst breiten Abdeckung an Auftrittswahrscheinlichkeit im Feld.
Ziel dieses Test-Setups war es, die Feuchte- und Kältemittelbeladung an definierten Referenzstellen im Kältekreisgehäuse bzw. innerhalb des Sorptionsbettes sicher zu erfassen.
Dazu fand die im Projektverlauf mehrfach vorgestellte eigenentwickelte Sensorlanze mit dem adaptierten IPM-Beladungssensor und ausgewählten marktverfügbaren Chip-basierten Sensoren Verwendung.

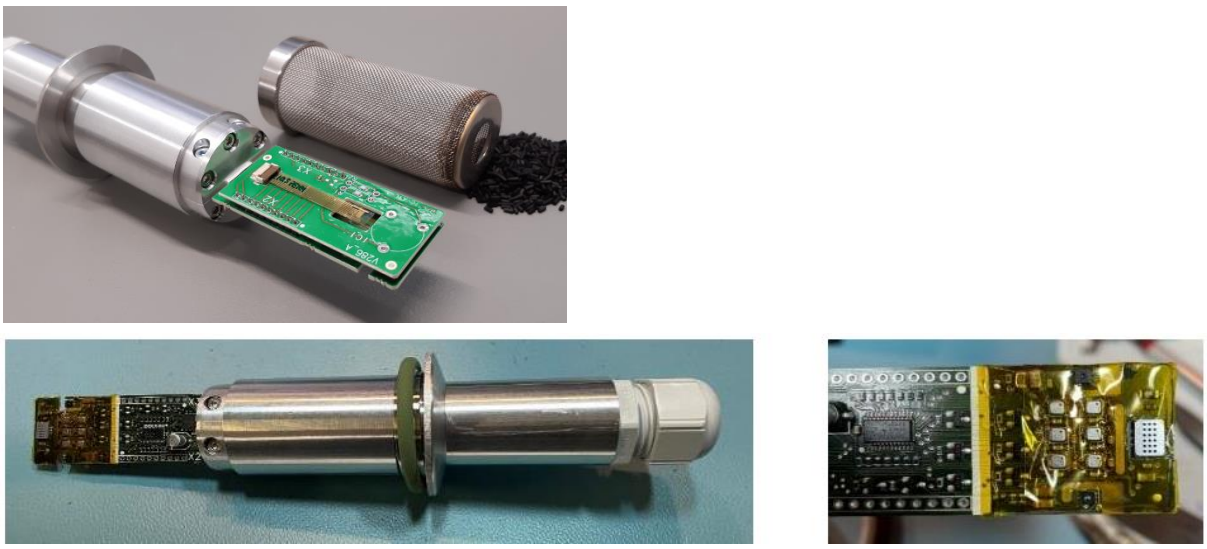


Abbildung 54: Sensorlanze zur Evaluierung des FHG IPM Sensors und der marktverfügbaren Sensoren (T, r.H., R290) im Systemmodulkontext

Es wurde das Verhalten des Beladungssensors in einer realen Sorptionsbettumgebung unter thermischen Worst-Case-Ausström-Bedingungen (→ max. Adsorptionsenthalpie bei Rupture Leak- Ausströmung) untersucht. Die elektrische Anbindung der eingebauten Sensorik erfolgte, wie bereits bei den vorangegangenen Evaluierungen des Messsystems mittels der vom IPM zur Verfügung gestellten Messelektronik.
Ein weiteres Testziel dieser Systemtests war es, die Messempfindlichkeit des Sensorlanzen-Konzepts bei statistisch wahrscheinlicheren kleinen Leckraten (→ Small/ Fugitive Leak-Bedingungen) im realen Testumfeld zu erfassen.

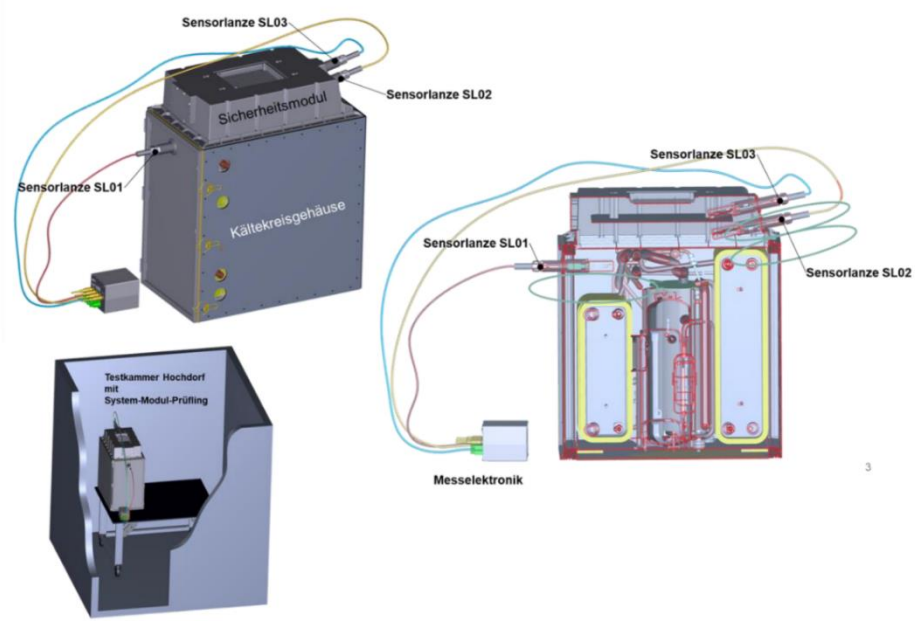


Abbildung 55: Realisiertes Test- SetUp im Systemmodul- Kontext in der Modul-Testumgebung Hochdorf (schematische Darstellung)

Insgesamt waren in dem Prüflingskonzept 3 Sensorlanzen im Einsatz, eine Lanze innerhalb des Kältekreisgehäuses und zwei Lanzen an ausgewählten Punkten innerhalb des Sorptionsbetts, um In-Situ-Messwerte über die Sorptionskinetik zu erhalten ((1) Kältekreisgehäuse (SL01); (2) im Sorptionsbett (SL02) (Höhe Betteintritt); (3) im Sorptionsbett (SL03) (Höhe Bettaustritt).

AP 4.4 Evaluierung auf Modulebene unter Berücksichtigung von Systemeinflüssen

Das Hauptaugenmerk der letzten Testphase im Rahmen des Projektes safeSENSE lag darin, die unter Abschnitt 4.2 beschriebenen Teste unter erweiterten Worst Case- Bedingungen durchzuführen.

Erweiterung der Testeinrichtung Hochdorf
Dazu war es wegen der erweiterten systemischen Umfeldanforderungen an das Sorptionsmodul erforderlich geworden, das in die Jahre gekommene Prüffeld Hochdorf (welches im Rahmen des Vorläuferprojektes zur Bewertung von Sicherheitskonzepten safeHP entwickelt und realisiert wurde) um die folgenden Maßnahmen zu erweitern:

- die Installation einer Temperierung der Testraumumgebung und zusätzlich die Temperaturregulierung des Zeltinnenraums
  (→ Vermeidung jahreszeitbedingter Temperatureinflüsse auf die Prüfeinrichtung)
- die Installation einer Kältekreisgehäuse-Temperierung zur Innentemperaturregulierung des Kältekreisgehäuses

(➔ zur Klärung des Einflusses der wechselnden Betriebsbedingungen auf das „Desorptionsverhalten“ des Sicherheitskonzeptes)

Hintergrund dieser Maßnahmen war die Fragestellung nach dem Adsorptions- und insbesondere dem bislang wenig im Fokus stehenden Desorptions-Verhalten des sorptiven Sicherheitssystems bei möglichst realen wechselnden Aufstellraum- bzw. wechselnden Betriebsbedingungen im Kältekreisgehäuse/ im Aufstellraum.

Abbildung 56: Erweiterte Testumgebung in Hochdorf

Witterungsbedingt wurden auch infrastrukturelle Maßnahmen erforderlich, welche zu einer nachhaltigen Verbesserung der Betriebsstabilität und -zuverlässigkeit des Prüffeldes Hochdorf während Schlechtwetterperioden führten, insbesondere bei der Durchführung von Langzeit-Desorptionstest bei niedrigen Leckageraten.
Folgende primäre Maßnahmen wurden am Prüfstandsaufbau durchgeführt:

- Entwicklung, Aufbau und Test einer neuartigen Dosiereinrichtung
  (➔ automatische Langzeit-Leckagesimulation für statistisch relevante Fehlerfälle)
- Aufbau eines größeren witterungsbeständigen, teilgedämmten Wetterschutzzeltes mit Temperierung zur klimatisch stabilen Durchführung von Langzeittests
  (➔ Vermeidung jahreszeitbedingter Temperatureinflüsse auf die Prüfeinrichtung)

Installation einer Gaswarnanlage und einer galvanisch getrennten Licht- und Versorgungsanlage zum sichereren Betrieb von Langzeittests
(➔ Erhöhung der Betriebssicherheit des Prüfstands (Abbildung 56))

Die modernisierte Ausströmtesteinrichtung konnte zur Durchführung der Langzeit-Desorptiontests aus AP4 genutzt werden. Die Tests konnten damit unabhängig von den äußeren klimatischen Bedingungen, rein auf das physikalische Verhalten des Testobjektes bezogen, durchgeführt werden.

1.5 AP 5 Projektkoordination

Das Projekt wurde vom Fraunhofer ISE koordiniert. In regelmäßigen JourFixe wurde darauf geachtet, die Projektinhalte zielgerichtet abzustimmen. Da viel experimentelle gemeinsame Arbeit in Freiburg am Fraunhofer ISE stattfand, war die Fa. Vaillant sehr häufig vor Ort, was ein abgestimmtes und an die Erreichung der Projektziele angepasstes Vorgehen sehr erleichterte.

Es fanden halbjährliche Gesamtprojekttreffen unter Einbezug des Projektträger Jülich statt, in denen auch notwendige Änderungen an der ursprünglichen Planung sowie Risiken und Chancen bezüglich der Erreichung der Projektziele und der späteren Verwertung der Ergebnisse transparent und zielgerichtet diskutiert wurden.

1.6 AP 6 IEA-HPP Annex 54, Heat pump systems with low-GWP refrigerants

Dieser Annex zielte darauf ab, die Anwendung von Kältemitteln mit niedrigem Treibhauspotenzial zu fördern, um den Ausstieg aus HFKW mit hohem Treibhauspotenzial zu beschleunigen, indem Konstruktionsrichtlinien für optimierte Wärmepumpenkomponenten und -systeme für Kältemittel mit

niedrigem Treibhauspotenzial entwickelt wurden, indem die verfügbaren Kältemittel mit niedrigem Treibhauspotenzial, ihre Eigenschaften und geltenden Normen, die Sicherheit und Entflammbarkeit von Kältemitteln sowie die sichere Verwendung von entflammbaren Kältemitteln überprüft wurden; Optimierung von Wärmepumpenkomponenten und -systemen für Kältemittel mit niedrigem Treibhauspotenzial; Analyse der LCCP-Auswirkungen der derzeitigen und der optimierten Konstruktion mit Kältemitteln mit niedrigem Treibhauspotenzial; Studie der Marktchancen für Wärmepumpen mit Kältemitteln mit niedrigem Treibhauspotenzial und der Verfügbarkeit von Kältemitteln mit niedrigem Treibhauspotenzial bis 2030. Zielanwendungen sind Klimaanlagen und Wärmepumpensysteme für Wohn- und Gewerbegebäude.

Im Jahr 2016 haben 197 Länder in Kigali, Ruanda, eine Änderung des Montrealer Protokolls zum schrittweisen Abbau von HFKW angenommen. Im Rahmen der Änderung verpflichteten sich die Länder, die Produktion und den Verbrauch von FKW in den nächsten 30 Jahren um mehr als 80 Prozent zu reduzieren. Ziel ist es, bis 2050 mehr als 80 Milliarden Tonnen CO2-Äquivalente zu vermeiden und die Erwärmung bis 2100 um bis zu 0,5 °C zu begrenzen. Das in Kühl- und Klimaanlagen verwendete Kältemittel ist für etwa 2% der weltweiten Treibhausgasemissionen verantwortlich. Im Jahr 2000 waren stationäre Klimaanlagen für 37% der weltweiten Kältemittel-Emissionen und 21% der CO2-Äquivalent-Emissionen von Kältemitteln verantwortlich. Es wird jedoch mit einem Marktwachstum von mehr als 80% für Klimaanlagen gerechnet, insbesondere in den Entwicklungsländern aufgrund ihres Wirtschaftswachstums und des Klimawandels.

Künftige Wärmepumpensysteme werden Kältemittel mit niedrigem Treibhauspotenzial und energieeffiziente Technologien verwenden, um die neuesten internationalen Vorschriften zu erfüllen und die Umweltauswirkungen insgesamt zu verringern. Als Kältemittel mit niedrigem Treibhauspotenzial kommen R-32, R-32-Gemische und natürliche Kältemittel (HC und CO2) in Frage, deren Treibhauspotenzialwerte unter 700 liegen werden. Da die in Frage kommenden Kältemittel ein breites Spektrum an thermophysikalischen Eigenschaften und thermodynamischen Merkmalen aufweisen, die sich von den derzeitigen Kältemitteln unterscheiden, sind maßgeschneiderte und optimierte Komponenten und Systemauslegungen für neue Kältemittel mit niedrigem Treibhauspotenzial sehr wichtig. Der Annex erforschte diese neuen Möglichkeit und wird dazu beitragen, die optimierten kältemittelarmen Klimaanlagen und Wärmepumpen zu erweitern, ihre technologischen Bereitschaftsgrade (TRL) durch die Entwicklung von Konstruktionsrichtlinien für kältemittelarme Technologien zu verbessern, den Abbau von Marktbarrieren zu unterstützen und die internationale Zusammenarbeit zu fördern. Daher steht der Annex im Einklang mit der Vision und dem Auftrag der IEA, indem er auf die Auslegung und Anwendung sauberer, kohlenstoffarmer Energiesysteme abzielt. Dieser Annex wird die IEA dabei unterstützen, ihre strategischen Ziele zu erreichen, indem neue, alternative oder natürliche Kältemittel mit niedrigerem GWP für Wärmepumpen gefördert werden.

Inhalte und Ziele des Arbeitspaketes am Fraunhofer ISE

- Mitarbeit in IEA HPT Annex 54
- Teilnahme an Annex-Meetings sowie Mitarbeit an Task Reports
- Darstellung der Ergebnisse auf internationalen Konferenzen

Review von State-of-the-art-Technologien mit Fokus auf natürliche Kältemittel

Die Umstellung von HFKW-Kältemitteln auf höhere Anteile von Kältemitteln mit niedrigem Treibhausgasausstoß ist ein aktuelles Thema im Wärmepumpenmarkt. Mit der bereits absehbaren Einführung einer neuen F-Gas-Verordnung im Jahr 2024 wird sich dieser Übergang in allen Wärmepumpengeräteklassen stark beschleunigen. Aufgrund des Charakters dieser neuen Verordnung für Wohnanwendungen begann der Anteil von Kältemitteln mit niedrigem Treibhausgasverbrauch, aber insbesondere in Deutschland von halogenfreien Kältemitteln, sichtbar zu werden, was insbesondere Luft/Wasser-Wärmepumpen in den Markt drängte. Auf dem Markt der förderfähigen Wärmepumpen hat dieser mit R290 befüllte Wärmepumpentyp einen Anteil von etwa 30%. Aufgrund des hohen Anteils von Luft/Wasser-Wärmepumpen in Deutschland führte dies zu einem Gesamtanteil von R290 als Kältemittel von etwa 20% (Abbildung *57*). Im Vergleich dazu hat R32 einen Anteil von ca. 30%, was vor allem bei Split-Wärmepumpen der Fall ist. In den letzten Jahren ist der R32-Anteil gestiegen, was zu einer absoluten Dominanz von R32 in diesem Gerätetyp und der seit einigen Jahren verbesserten Förderfähigkeit von Luftwärmepumpen führt (siehe Abbildung *57*). Heute ist es wichtig zu verstehen, dass dieser Markt der förderfähigen Wärmepumpen hauptsächlich auf Einfamilienhäuser ausgerichtet ist. Daher ist eine weitere Entwicklung des Anteils der Kältemittel zu erwarten.

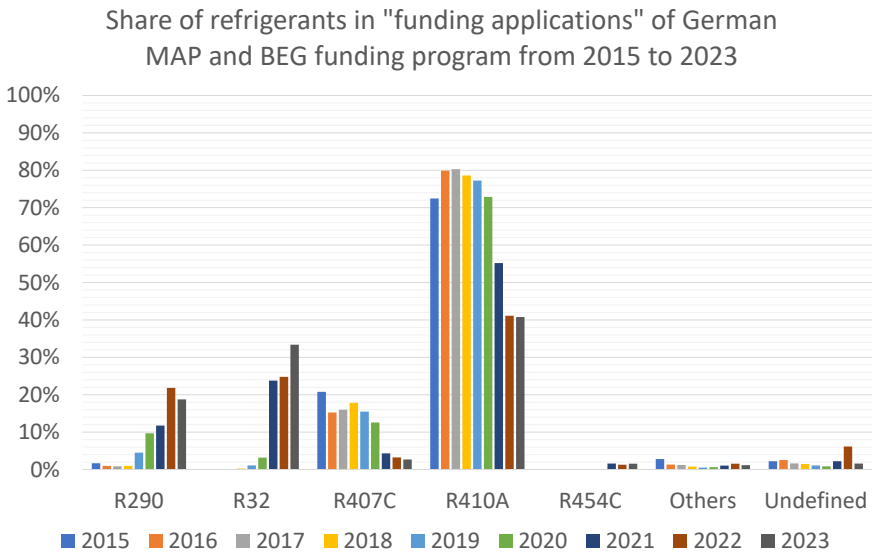


Abbildung 57: Kältemittel, die zwischen 2016 und 2023 in geförderten Wärmepumpenanwendungen eingesetzt werden.

Auch wenn der globale und nationale Rechtsrahmen die Grundlage für diese Veränderungen in den kommenden Jahren bildete, gab es immer noch große Hindernisse, die einen früheren Wandel verhinderten. Diese Hindernisse waren unter anderem die Hauptgründe dafür, dass der Übergang nicht früher begonnen hat:

- ein Mangel an verfügbaren Komponenten
- Sicherheitsfragen,
- die Notwendigkeit, nationale Vorschriften wie die Bauvorschriften anzupassen,
- die dringende Notwendigkeit, Installateure zu schulen,
- die Erhöhung des Fachwissens der F&E-Ingenieure der Wärmepumpenhersteller und
- vor allem ein verbesserter wirtschaftlicher Anreiz, eine Wärmepumpe gegenüber alternativen Heizsystemen zu bevorzugen.

Es ist anzumerken, dass der Übergang immer noch hauptsächlich für Einfamilienhäuser erfolgt, die in Deutschland einen Anteil von weniger als 50 % an den Heizungsanlagen ausmachen, wenn man Mehrfamilienhäuser und fernbeheizte Gebäude mit einbezieht. Bei den in Innenräumen installierten Heizungsanlagen hat der Übergang zu Wärmepumpen mit Kältemitteln mit niedrigem Treibhausgasausstoß noch nicht begonnen und ist Teil der laufenden Forschung und Entwicklung (mit Ausnahme von Warmwasser-Wärmepumpen, in denen hauptsächlich R290 und teilweise R1234ze(E) verwendet wird). Die Märkte für Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern sind noch klein und es fehlt im Allgemeinen ein Übergang von mit fossilen Brennstoffen betriebenen Heizsystemen zu Wärmepumpen. Da das Spektrum der verfügbaren Komponenten und die Geschwindigkeit, mit der neue Komponenten eingeführt werden, drastisch zugenommen hat, kann davon ausgegangen werden, dass in den meisten Häusern in den nächsten Jahren ein direkter Übergang zu Wärmepumpen mit Kältemitteln mit niedrigem Treibhauspotenzial stattfinden wird.

Fallstudien und Designrichtlinien zur Optimierung von Komponenten und Systemen

Während der Laufzeit des Annexes wurden für Deutschland mehrere FuE-Aktivitäten gemeldet. Im Bereich der Wärmepumpen für Wohngebäude ist das Projekt LC150 zu nennen, das 2020 angelaufen ist. Als Ergebnis von mehr als zwei Jahrzehnten europäischer Forschung zur Füllungsreduzierung unterstützt dieses Projekt die europäische Wärmepumpenindustrie dabei, die Technologielücke zu schließen, die für die Verwendung von Wärmepumpen mit brennbarem Kältemittel wie R290 für Innenraumanwendungen noch besteht.
Dabei sind vor allem zwei Entwicklungen für eine umfassende Füllungsreduzierung bei akzeptabler Leistung wichtig. Zum einen die Fortschritte bei der neuen Generation von Verdichter-Plattformen mit geringerem Ölaustritt, reduzierten inneren freien Volumina in Ölsümpfen und damit einer verbesserten Gesamtölfüllung

sowie kältemittelspezifischen Verbesserungen des Verdichtungsmechanismus. Zum anderen die Fortschritte bei einer verbesserten Zweiphasenverteilung für den Gesamtmassenstrombereich, die in einer Wärmepumpe mit drehzahlgeregelten Verdichtern sowie volumenreduzierten Anschlusskonstruktionen auftreten können. Beide Maßnahmen der Komponentenhersteller führten zu ca. 34 geprüften Kombinationen von innovativen Wärmetauschern, Verdichtern (mehrere Typen), neuartigen Expansionsventilen zur optimalen Füllungserkennung, der Prüfung von Normbedingungen nach EN 14825 und SCOPs nach einem vereinbarten Prüfverfahren.
Als Ergebnis wurden Dampfkompressionskreisläufe - in ihrer Bauweise eng verwandt mit Erdwärmepumpen - mit einer optimalen Ladung zwischen 124g und 164g ermittelt. Bei einer typischen Auslegungsbedingung für eine niedrigere Vorlauftemperatur lag der SCOP-Bereich dieser Systeme zwischen 4,5 und 4,8 mit einer Heizleistung zwischen 8,1 kW und 12,8 kW. Diese Ergebnisse spiegeln noch nicht das höchstmögliche Optimum wider, da die größtmögliche Ladungsreduzierung im Mittelpunkt der Forschung stand. Nichtsdestotrotz ist das Projektkonsortium der Ansicht, dass mit diesen Basiswerten typische Aufstellräume (z.B. in Kellern) ausreichen, um bald effiziente und sichere R290-Wärmepumpenprodukte für die Innenaufstellung zu erreichen. Mit kleinen Änderungen an der Anschlusskonstruktion, um sie als kleine Flüssigkeitssammler zu verwenden, könnten diese Kreisläufe sogar so angepasst werden, dass sie als Sekundärsysteme verwendet werden können, die dem funktionalen Design von Luft-Wasser-Wärmepumpen näherkommen. Dies ist eine typische Maßnahme einiger Hersteller auf dem europäischen Wärmepumpenmarkt, um die Anzahl der hergestellten Kältekreisläufe zu reduzieren, die in einer Vielzahl von Wärmepumpenprodukten in ihrem Portfolio als eine Art Plattformstrategie verwendet werden.
Dies führt zu dem Thema "sichere Auslegung von Wärmepumpen" als einem weiteren Schlüssel- und Kernthema für den Übergang zu Kältemitteln mit niedrigem Treibhauspotenzial, aber brennbaren Kältemitteln für ein breiteres Spektrum möglicher Aufstellungsorte. In diesem Projekt und einigen anderen Projekten während der Laufzeit des Annex 54 wurde die Gestaltung von Sicherheitszonen in der Nähe von Wärmepumpen untersucht. Nur die Untersuchungen für im Freien aufgestellte Wärmepumpen wurden während der Laufzeit des Anhangs abgeschlossen und es wurde darüber berichtet [1]. Für die Untersuchungen zur Sicherheitszone von Innengeräten wurden die Versuche an anderer Stelle veröffentlicht, siehe z.B. eine Veröffentlichung auf der Jahrestagung 2023 der Deutschen Gesellschaft für Kälte- und Klimatechnik [2].
Leider wird die Prüfung von Sicherheitszonen in den einschlägigen Sicherheitsnormen wie IEC 60335-2-40:2022 oder EN 378-1:2016/EN 378-2:2016 weder für Geräte im Freien noch für Geräte in Innenräumen sehr gut behandelt. Erst kürzlich wurde - zumindest für Innenraumgeräte - eine vielversprechende Prüfroutine für die EN-Norm vorgeschlagen, die eine Prüfung der Umgebungskonzentration vorsieht und zu einem besseren Verständnis für den Umgang mit Innenraumgeräten führen wird [3]. Obwohl zahlreiche Hersteller R290-Wärmepumpen mit definierten Sicherheitszonen in ihren Installationshandbüchern anbieten, ist die Situation in Bezug auf ein standardisiertes Vorgehen in den wichtigsten Sicherheitsnormen nicht besser.
In Absprache mit der Industrie wurde die Vielzahl der möglichen Konfigurationen auf 10 Aufstellungsszenarien beschränkt, für die Wärmepumpenaufstellungsorte in OpenFOAM simuliert wurden. Für alle Ergebnisse wurde eine Analyse von Isoplethenlinien und der direkte Vergleich zwischen verschiedenen Konfigurationen entwickelt, um die Bewertung vorteilhafter Aufstellungsorte sowie die Extraktion relevanter dynamischer Informationen für Risikobewertungen zu ermöglichen.

Überprüfung der Auswirkungen von Designoptimierung und Weiterentwicklung auf die LCCP-Reduzierung

Es wurden ganzheitliche Konzepte zur Kopplung von Gebäudesimulationen mit der Lastdynamik einer Wärmepumpe und der Wahl eines langfristigen Kältemittels entwickelt, die darauf abzielen, eine Lastverschiebung auf andere Kategorien zu vermeiden, um Instrumente für einen grundlegenderen Ansatz zu schaffen, der den gesamten Lebenszyklus von Wärmepumpen berücksichtigt [4]. Auf der Grundlage der Ergebnisse einer Ökobilanz, die alle 16 OECD-Kriterien bewertet, wird eine Handlungsempfehlung ausgesprochen und die Verwendung von R290 in Wärmepumpen für Wohngebäude empfohlen. Eine weitere unveröffentlichte LCCP-Analyse, deren Ergebnisse erst auf dem Annex 54-Expertensitzung im September 2021 vorgestellt wurden [5], kommt zu ähnlichen Ergebnissen.
Nachdem die gesamten Umweltauswirkungen einer Wärmepumpe ermittelt wurden, wird ein ökologischer Vergleich zwischen einer Wärmepumpe und einem Gasbrennwertkessel für den entsprechenden Lebenszyklus durchgeführt. Wie bereits erwähnt, haben die Effizienz der Wärmepumpe und die Herkunft

des eingekauften Stroms einen erheblichen Einfluss auf die Umweltauswirkungen einer Wärmepumpe und somit auch auf den ökologischen Vergleich. Bei einem SCOP = 3,1 und einem prognostizierten Anstieg des Anteils erneuerbarer Energien am deutschen Strommix verringert eine Wärmepumpe - egal mit welchem Kältemittel - die Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus um bis zu 54% im Vergleich zu einem Gas-Brennwertkessel.
Beide Studien verglichen verschiedene Kältemittel und prognostizierten drastische Veränderungen des Anteils der mit fossilen Brennstoffen erzeugten Elektrizität in den nächsten zwei Jahrzehnten. Hier führt der sinkende Anteil der indirekten Emissionen aufgrund einer umweltfreundlicheren Stromerzeugung zu erheblichen Unterschieden bei den gesamten CO2-Äq-Emissionen während des Lebenszyklus einer Wärmepumpe. Die indirekten Emissionen schrumpfen auf nur noch etwa 20% im Vergleich zur Situation in Deutschland im Jahr 2020. Dies sollte in die Entscheidungsprozesse für zukunftssichere Low-GWP-Kältemittel einbezogen werden.

Outlook für 2030

Der Übergang zu Kältemitteln mit niedrigem Treibhauspotenzial und - in fast allen Fällen - brennbaren Kältemitteln ist im Gange, und die politischen Rahmenbedingungen waren ein wichtiger Anreiz für neue Wärmepumpenentwicklungen. Für einen optimalen Ansatz zur Energieeinsparung ist die Verwendung von R290 als Kältemittel wichtig und wird in den nächsten Jahren bis 2030 an Bedeutung gewinnen, da hydronische Wärmepumpenanlagen den europäischen Wärmepumpenmarkt seit 2021 dominieren. Die reduzierte Füllmenge der Komponenten wird auch den Weg für mehr Wärmepumpentypen ebnen, die mit diesem Kältemittel gefüllt sind. Bestimmte alternative Kältemittel könnten jedoch auf dem Markt bleiben. Dies wird vor allem von den Sicherheitsvorschriften für ihre Zielmärkte abhängen.
Die globale Erwärmung wird jedoch den Heizbedarf im Allgemeinen verringern, und globale Studien prognostizieren bereits, dass die Kühlung und die Warmwasserbereitung in Zukunft eine größere Rolle spielen werden. Dies könnte zu einer raschen Verschiebung führen und Luft-Wärmepumpen sowie Brauchwasser-Wärmepumpen begünstigen, die bei der Warmwasserbereitung noch immer nur einen geringen Marktanteil haben.
Bei Warmwasser-Wärmepumpen wird R290 als Kältemittel aufgrund der geringen benötigten Füllmenge in Zukunft wahrscheinlich dominieren. Das Kältemittel R32 wird heute überwiegend eingesetzt. Hier ist es sehr wahrscheinlich, dass es zu Mischungen mit halogenierten Kältemitteln, aber auch mit brennbaren Kältemitteln kommen wird. Mit Blick auf andere Messgrößen wie den Ozonabbau muss die Produktion und der Abbau dieser Kältemittel erforscht werden, um langfristig falsche Empfehlungen zu vermeiden.
Erste Anlagen für die Innenraumnutzung von R290 sind in Deutschland bereits auf den Markt gekommen und es wird prognostiziert, dass dies auch für größere Anlagen, die in Mehrfamilienhäusern benötigt werden, verfügbar sein wird. Hier wird ein Fortschritt bis spätestens 2028 in einem ähnlich vielfältigen Spektrum auf der Angebotsseite erwartet. Die Förderprogramme wurden bereits angepasst, um den Einbau von Wärmepumpen in diesem großen Anteil des deutschen Wohnungsbestandes (etwa die Hälfte des deutschen Gebäudebestandes besteht aus Mehrfamilienhäusern) zu erhöhen. Andere Kältemittel mit niedrigem Treibhausgasausstoß werden jedoch aufgrund der Unternehmenspolitik und möglicherweise aufgrund von Sicherheitsfragen eine Rolle spielen - oft auch aufgrund mangelnder Sachkenntnis über das Spektrum der verfügbaren Sicherheitsmaßnahmen, wenn über Produktentwicklungsstrategien entschieden wird. Dies gilt jedoch für alle noch erforderlichen Entwicklungsaktivitäten für verschiedene Wärmepumpenmärkte, in denen der Übergang noch nicht einmal begonnen hat.

2. Voraussichtlicher Nutzen

Die Entwicklungen im Projekt safeSENSE ermöglichen die Entwicklung von Produkten für innenaufgestellte Heizgeräte mit dem klimafreundlichen, aber brennbaren Kältemittel Propan (R290). Dadurch wird es möglich, in vielen zusätzlichen Einbau- und Anwendungssituationen auf Wärmepumpen mit klimaschädlichen Kältemitteln und auch auf Brennwertgeräte zu verzichten, da ein sicherer Einsatz des gerade auch bei höheren Heizungsvorlauftemperaturen sehr effizienten Kältemittels Propan ermöglicht wird. In Zukunft können ähnliche Konzepte auch im kältetechnischen Bereich zum Einsatz kommen.

3. Relevante Ergebnisse von dritter Seite

Bezüglich sorptiver Sicherheitskonzepte lagen uns sowohl bei Projektbeginn als auch am Ende des Projektes keinerlei weitere bekanntgewordene technischen Lösungen in dem Anwendungsbereich vor. Eine erste Aktivität bei Projektstart war es, den technologischen Status Quo im Markt zu erfassen.
Hierbei lag der Fokus auf innenaufgestellten Wärmepumpen mit brennbaren Kältemitteln.

Zu Projektbeginn wurden zwei marktverfügbare Geräte von zwei unterschiedlichen Herstellern erfasst, im weiteren Verlauf wurden beide Geräte hinsichtlich ihrer Sicherheitsphilosophie hin untersucht und bewertet.

3.1 Gerät Hautec – Typ Carno HSC/ HSW

Abbildung 58: Innen stehende Hautec- Wärmepumpe vom Typ HSC/ WSW [6]

Beide im Gebäude aufgestellten Gerätetypen (siehe Abbildung *58*) werden in jeweils 6 Leistungsgrößen zwischen 7 kW und 19 kW Heizleistung (@W10/W35) angeboten. Der Füllmengenbereich Kältemittel R290 beträgt zwischen 0,60 und 1,14 kg.
Das von Hautec umgesetzte Sicherheitskonzept fußt auf eine normative Lösung, das heißt, durch eine ausreichende Ventilation des Aufstellraumes ist für einen sicheren Betriebszustand zu sorgen.
Dieses bedeutet im Umkehrschluss, dass ein eventuelles Sicherheitsrisiko des Apparates auf die Planungs- bzw. Installationsebene (siehe Abbildung *59*) delegiert wird.

Installationshinweise:

- Die Wärmepumpe sollte in der Nähe der Wärmequelle und der Heizung installiert werden um zu hohe Installationskosten zu vermeiden.
- Die Wärmepumpe sollte in einem trockenen und frostfreien Raum auf einem ebenen Fundament installiert werden.
- Bei Geräten, die mit brennbaren Kältemitteln betrieben werden, gelten zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen nach DIN IEC 61D/53/CD. Diese Wärmepumpen sind mit einem Ventilator ausgestattet, der für die Gehäuseentlüftung sorgt. Falls eine solche Wärmepumpe unterhalb Erdreich betrieben wird, so muß ein Lüftungsrohr vom Rohrstutzen der Wärmepumpe bis außerhalb des Gebäudes oberhalb (schneebedecktem) Erdreich geführt werden. Das verwendbare Rohr DN 100 darf max. 3 m lang sein und nicht mehr als 3 Bögen haben. Es kann handelsübliches HT-Rohr / Kanalrohr verwendet werden.

Abbildung 59: Auszug aus der Installationsanleitung Hautec HSC/ HSW

3.2 Gerät Nibe – Typ Fighter 470 HP

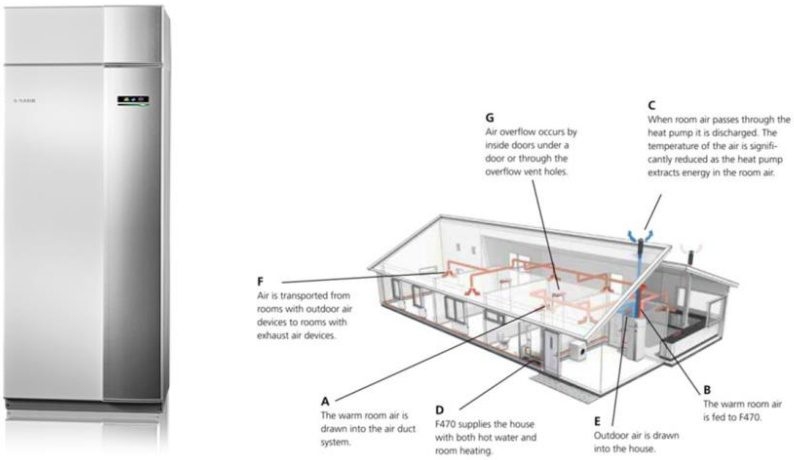


Abbildung 60: Nibe Abluftwärmepumpe vom Typ Fighter F470 für den Einbau in ein Passivhaus [7]

Bei der Nibe Fighter vom Typ F470 handelt es sich um eine speziell für den Einsatz in Passivhäusern entwickelte Abluft-Wärmepumpe (siehe Abbildung 60) für die Aufstellung innerhalb der Gebäudehülle.
Bei der Bauart des Gerätes ist es sichergestellt, dass bei permanent laufendem Abluftgebläse eine ausreichend hohe Luftwechselrate im Aufstellraum der Maschine sichergestellt ist.
Die Abluftwärmepumpe ist bei einer Kältemittel-Füllmenge R290 von 0,495 kg mit einer nominellen Heizleistung von 2,18 kW (@A20/ W35) ausgewiesen. Alternative sorptive Lösungen als Sicherheitskonzept waren und sind auch weiterhin nicht bekannt.

4. Erfolgte Veröffentlichungen

4.1 Konferenzbeiträge

Braungardt, S., Mittapalli, N., Oltersdorf, T., Fugmann, H.: Ausströmungs-Simulationen von außen aufgestellten Propan-Wärmepumpen. Simulationsergebnisse im Rahmen des IEA Annex 54, Freiburg im Breisgau (2021)

Sonner, C., Schnabel, L., Fugmann, H.: Safe Use of Flammable Refrigerants in Cooling/Heating Cycles. In: International Institute of Refrigeration (ed.) 15th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, Trondheim (2022). https://doi.org/10.18462/iir.gl2022.0196

4.2 Abschlussarbeiten

Al-Makkawi, Y.: Concept development and thermodynamic evaluation of the conversion of an air-to-air room air conditioner using environmentally friendly refrigerant. Master's Thesis, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems; University of Freiburg (2021)

Mittapalli, N.: Numerical Simulation of Leakage and Dispersion of Refrigerant using OpenFOAM. Master's Thesis, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems; University of Freiburg (2021).

Birkhofer, Mirjam: Nachweis von Gasen mit 3Omega-Wärmeleitfähigkeitssensoren. Bachelor Thesis, Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik; Universität Freiburg (2021)

Sonner, Christian. Experimentelle und simulationsbasierte Analyse eines Sorptionsbettes zur Aufnahme von natürlichen Kältemittel bei unterschiedlichen Leckagen. Dissertation, Albrecht-Ludwigs-Universität Freiburg (2022)

Kratt, Chiara. Untersuchung einer Propan-Leckage in den Sekundärkreis einer Wärmepumpe und Evaluierung einer Abscheidevorrichtung. Bachelor Thesis, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems; Hochschule für Technik, Wirtschaft und Medien Offenburg, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik (2023)

4.3 Weitere

Oltersdorf, T.: Country Report: Germany. In: Cao, T., Hwang, Y. (eds.) HPT Annex 54: Heat Pump Systems with Low-GWP Refrigerants TASKS 1, 2 AND 3

Cao, T.: HPT Annex 54: Heat Pump Systems with Low-GWP Refrigerants TASKS 1, 2 AND 3. https://heatpumpingtechnologies.org/annex54/wp-content/uploads/sites/63/2022/02/iea-annext-54-2021-annual-report-v2-021822.pdf.

4.4 Patentübersicht ➔ Siehe Erfolgskontrollbericht Vaillant

Literatur

[1] Braungardt, S., Mittapalli, N., Oltersdorf, T., Fugmann, H., “AUSSTRÖMUNGS-SIMULATIONEN VON AUSSEN AUFGESTELLTEN PROPAN-WÄRMEPUMPEN”, Final Report, Fraunhofer ISE, 2021.

[2] Oltersdorf, T., Joos, L., Sonner, C., Belz, C., Morawietz K., Methler, T., Fugmann, H., Schnabel, L., “Sicherer Betrieb einer 12kW Propan Wärmepumpe”, Proceedings of the 2023 Annual meeting of the German Society of Refrigeration and Air Conditioning (DKV).

[3] Meljac, L., Forsen, M., Colbourne, D., “Increasing flammable refrigerant charge size without compromising safety”, 13th IEA Heat Pump Conference, April 26-29, 2021, Jeju, Korea

[4] Vering, C., Zibunas, C., Tessarek, F., Moschner, N., Breuer, K. T., Höges, C., Romberg, H. von der Aßen, N. V., Müller, D., “Towards integral assessment of heat pumps and refrigerantsusing LCA: A case study for the German building stock”, 14th IEA Heat Pump Conference, May 15-18 2023, Chicago, US.

[5] Oltersdorf, T., Fugmann, H. UPDATE ON LC150 PROJECT LOW CHARGE HEAT PUMPS AND HOW TO MAXIMIZE DECARBONIZATION UNTIL 2040“, IIR-IEA Joint Workshop during the 7th IIR Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants, September 1, 2021.

[6] Hautec, „Bedienungs- und Installationsanweisung Sole- Wasser- Wärmepumpe HCS und Wasser- Wasser- Wärmepumpe HCW“, Art-Nr: BED 0017, Ausgabe vom 06.05. 2015, Download: https://hautec.eu/download

[7] Nibe, „Installateur Handbuch NIBE TM , Dokumenten-Nr.: IHB DE 1338-1 231488, Ausgabe vom 11.09.2016, Download: www.nibe.eu/de-de/support/handbuecher

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel safeSENSE - Entwicklung und Bewertung einer innovativen Sicherheitseinrichtung für Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln basierend auf Sorptionselementen und neuartiger Sensorik	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Füldner, Gerrit; Fugmann, Hannes; Hügenell, Philipp; Krampe-Zadler, Christof; Laurenz, Eric; Lingk, Tobias; Oltersdorf, Thore; Spahn, Hans-Joseph;	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2023
	6. Veröffentlichungsdatum 30.06.2024
	7. Form der Publikation elektronisch
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Georges-Köhler-Allee 301, 79110 Freiburg Vaillant GmbH, Berghauser Straße 40, 42859 Remscheid	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 03EN2030A/B
	11. Seitenzahl 67
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 7
	14. Tabellen 4
	15. Abbildungen 60
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Ziel des Vorhabens war die Entwicklung und Bewertung einer innovativen Sicherheitseinrichtung für Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln basierend auf Sorptionselementen und neuartiger Sensorik. Experimentell wurde die Stabilität des Sorptionsbettes gegenüber Umwelteinflüssen und die Degradation unter Umwelteinflüssen untersucht. Es wurden Sensoren zur Überwachung der Sicherheitseinrichtung weiterentwickelt. Sicherheitsrisiken durch Leckage von Kältemittel in Sekundärkreisläufe wurde untersucht und bewertet sowie geeignete Mitigations- und Sicherheitsmaßnahmen entwickelt. Die Sicherheitselemente wurden in einer Betrachtung des Gesamtsystems bewertet und ein umsetzbares Gesamtsicherheitskonzept für eine innenaufgestellte Kompressionswärmepumpe mit Kältemittel Propan (R290) aufgestellt.	
19. Schlagwörter Propan, R290, Sicherheit, Sorption, Sekundärkreis, Sensor	
20. Verlag TIB	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN In progress	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title safeSENSE - Development and evaluation of an innovative safety device for heat pumps with natural refrigerants based on sorption elements and novel sensor technology	
4. author(s) (family name, first name(s)) Füldner, Gerrit; Fugmann, Hannes; Hügenell, Philipp; Krampe-Zadler, Christof; Laurenz, Eric; Lingk, Tobias; Oltersdorf, Thore; Spahn, Hans-Joseph;	5. end of project 31.12.2023
	6. publication date 30.06.2024
	7. form of publication electronically
8. performing organization(s) (name, address) Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Georges-Köhler-Allee 301, 79110 Freiburg Vaillant GmbH, Berghauser Straße 40, 42859 Remscheid	9. originator's report no.
	10. reference no. 03EN2030A/B
	11. no. of pages 67
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 53107 Bonn	13. no. of references 7
	14. no. of tables 4
	15. no. of figures 60
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract The aim of the project was to develop and evaluate an innovative safety device for heat pumps with natural refrigerants based on sorption elements and innovative sensor technology. The stability of the sorption bed against environmental influences and the degradation under environmental influences were investigated experimentally. Sensors for monitoring the safety device were further developed. Safety risks due to refrigerant leakage into secondary circuits were investigated and evaluated and suitable mitigation and safety measures were developed. The safety elements were evaluated in a consideration of the overall system and a practicable overall safety concept for an indoor installed compression heat pump with propane refrigerant (R290) was drawn up.	
19. keywords Propane, R290, safety, sorption, secondary circuit, sensor	
20. publisher TIB	21. price