



Fraunhofer
ISE

LCR290

Entwicklung von Wärmepumpenlösungen mit Propan
für den Austausch von Gas- und Ölgeräten

Schlussbericht



Zuwendungsempfänger:

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V.

Förderkennzeichen:

03EN4046

Ausführende Stelle:

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Laufzeit des Vorhabens:

01.01.2023 – 31.12.2025

Autor*Innen: Björn Nienborg, Bruno Bavia Bampi, Mu Huang, Beatrice Rodenbücher, Sebastian Rohrer, Annette Uhl, Timo Methler, Hannes Fugmann, Thore Oltersdorf, Marcus Heeg, Martin Kreutz, Theresa Paul, Peter Engelman, Katharina Morawietz, Lena Schnabel

Projektleitung: Dr.-Ing. Lena Schnabel

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstr. 2, 79110 Freiburg

Technische und administrative Projektleitung:

Dr.-Ing. Katharina Morawietz, Björn Nienborg, Timo Methler

Danksagung

Das Forschungsprojekt LCR290 wurde in der Zeit vom 01.01.2023 bis zum 31.12.2025 durch den Projektträger Jülich (PtJ) unter dem Förderkennzeichen 03EN4046 betreut. Die Finanzierung erfolgte aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, wofür wir uns herzlich bedanken.



Inhalt

1.	AUSGANGSSITUATION DES VORHABENS	14
1.1	AUFGABENSTELLUNG	14
1.2	VORAUSSETZUNGEN	16
1.3	PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS.....	17
1.4	ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN.....	18
2.	ERGEBNISSE DES VORHABENS	19
2.1	REFERENZSZENARIEN UND ANFORDERUNGSPROFILE FÜR WÄRMEPUMPEN IN MEHRFAMILIENHÄUSERN	19
2.1.1	<i>Dezentrale Wärmeerzeugung, Innenaufstellung pro Wohnung</i>	<i>19</i>
	Welche Heizleistung ist für dezentrale Wärmepumpen erforderlich?	19
	Welcher Raum wird für die Installation einer dezentralen Wärmepumpe bevorzugt?	20
	Wie groß ist der minimal und maximal verfügbare Platz für die Installation der Wärmepumpe?	21
	Welche Belegung sollte für eine 3-Zimmer-Wohnung mit 55 m ² bei der Dimensionierung der Warmwasserversorgung angenommen werden?	22
	Wie hoch ist der maximale Geräuschpegel einer Haushaltswärmepumpe?	22
2.1.2	<i>Zentrale Wärmeerzeugung, Innenaufstellung</i>	<i>22</i>
	Welche Heizleistung wird für zentrale Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern (Innen- oder Außenaufstellung) benötigt?	22
	Was halten Wärmepumpenhersteller von großen Kombispeichern (Heizungs-Puffer + Warmwasser) für zentrale Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern?	23
	Welches Volumen sollte für den Pufferspeicher bei Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern verwendet werden?	24
	Wie viel Fläche steht in der bisherigen Installationsraum der Heizungsanlage zur Verfügung?	24
	Was ist eine durchschnittliche/minimale Raumhöhe?	25
	Gibt es einen Luftaustausch oder ein Kellerfenster?	25
2.1.3	<i>Zentrale Wärmeerzeugung, Innenaufstellung Zentrale Wärmeerzeugung, Außenaufstellung</i>	<i>25</i>
	Welcher Bereich steht für eine außen installierte A/W-Wärmepumpe (Monoblock) zur Verfügung?	25
	Gibt es Einschränkungen hinsichtlich der Höhe der Wärmepumpe?	25
	Welche Mindest-/Worst-Case-Abstände sind im Umfeld eines Geräts bedingt durch Grundstücksgrenzen und Schallemissionen zu erwarten?	26
	Welche weiteren Anforderungen gelten für den Aufstellungsort?	28
	Sind in der Nähe des Aufstellungsortes Vertiefungen zu erwarten?	28
	Wo sollte der Bivalenzpunkt einer außen installierten Wärmepumpe liegen?	29
2.2	WÄRMEPUMPEN-BAUMUSTER: KONSTRUKTION UND VERMESSUNG	30
2.2.1	<i>Anforderung Definition an alle Demonstratoren</i>	<i>30</i>
2.2.2	<i>Komponentenauswahl und Demonstratoren Entwicklung.....</i>	<i>31</i>

2.2.3	<i>Messung des Kältekreislaufs – thermische Leistung</i>	31
2.2.3.1	Dezentrale Lösung	32
2.2.3.2	Zentraler Demonstrator Variante 1	33
2.2.3.3	Zentral außenaufgestellter Kühlkreislauf	36
2.2.3.4	Performance der Demonstratoren	38
2.2.4	<i>Simulation von Kältekreisläufen und Komponenten</i>	38
2.2.4.1	Simulationsmodell	38
2.2.4.2	Vergleich von Simulation und Messung	39
2.2.4.3	Mögliche Anpassungen für die Simulationen	45
2.2.5	<i>Simulation von Vereisung</i>	46
2.2.5.1	Frostbildung und -wachstum in Luft-Wasser-Wärmepumpen	48
	Auswirkungen der Vereisung auf die Leistung von ASHPs: Eine Literaturübersicht	50
	IMST-ART-Frostsimulation: Ergebnisse und Validierung	54
2.3	SICHERHEITSKONZEPTE FÜR PROPAN-WÄRMEPUMPEN FÜR MEHRFAMILIENHÄUSER	59
2.3.1	<i>Einleitung Sicherheitskonzepte in LCR290</i>	59
2.3.1.1	Motivation und normative Einordnung	60
2.3.1.2	Angewandte Auswertemethoden	63
2.3.1.3	Übersicht über die durchgeführten Arbeiten	64
2.3.2	<i>Prototypenbau für eine zentralisierte Einheit zur Innenaufstellung</i>	64
2.3.3	<i>Einbau einer Sicherheits-Einhausung in den Prüfraum</i>	68
2.3.4	<i>Beschreibung der getesteten Sicherheitskonzepte</i>	69
2.3.4.1	Referenzfall (Kampagne 1)	69
2.3.4.2	Konzept mit Zirkulationsluftstrom (Kampagne 2)	72
2.3.4.3	Standard-Sicherheitskonzept: externe Belüftung (Kampagne 3)	75
2.3.4.4	Schornsteinkonzept (Kampagne 4)	79
2.3.4.5	Drainage-Konzept (Kampagne 5)	82
2.3.5	<i>Schlussfolgerung zur sicheren Nutzung der untersuchten Konzepte</i>	87
2.3.6	<i>Ergebnisse der SHAP-Analyse</i>	88
2.3.7	<i>Nicht-regulierte Sicherheitsuntersuchungen</i>	89
2.3.8	<i>Risikobewertung der untersuchten Sicherheitskonzepte</i>	89
2.3.9	<i>Fazit</i>	91
2.3.9.1	Baseline ohne Sicherheitsmaßnahmen (Kampagne 1)	92
2.3.9.2	Durchmischung/Umwälzung der Raumluft (Kampagne 2)	92
2.3.9.3	Aktiv belüftetes Gehäuse (Kampagne 3)	92
2.3.9.4	Passive Belüftung mittels Schornstein (Kampagne 4)	92
2.3.9.5	Passive Entlüftung mittels Drainage (Kampagne 5)	92
2.4	SYSTEMKONZEPTE FÜR WÄRMEPUMPEN IN MEHRFAMILIENHÄUSERN	93
2.4.1	<i>Grundlegende Bewertung unterschiedlicher Wärmepumpenlösungen</i>	93
2.4.1.1	Definition Systemvarianten	93

2.4.1.2	Datengrundlage für die Bewertung	94
2.4.1.3	Ergebnisse für zentrale Wärmeversorgung	98
2.4.1.4	Ergebnisse für wohnungsweise (dezentrale) Wärmeversorgung	99
2.4.1.5	Fazit	101
2.4.2	<i>Systemkonzepte für zentrale Wärmepumpensysteme</i>	102
2.4.2.1	Methodik	102
2.4.2.2	Ergebnisse zu verschiedenen hydraulischen Konfigurationen	104
2.4.2.3	Parametervariation zur Wärmepumpenleistung	106
2.4.2.4	Steuerung für Wärmepumpenverbünde	108
2.4.2.5	Schlussfolgerungen und Diskussion	112
2.4.3	<i>Systemkonzepte für dezentrale Wärmepumpensysteme</i>	113
2.4.3.1	Methodik	114
2.4.3.2	Ergebnisse	119
2.4.3.3	Quellennetze	123
2.4.3.4	Zusammenfassung zu dezentralen Wärmepumpensystemen	127
2.5	PLANUNGSPROZESS FÜR WÄRMEPUMPEN IN MEHRFAMILIENHÄUSERN	128
2.5.1	<i>Methodik</i>	128
2.5.1.1	Datenerhebung Beispielgebäude	128
2.5.1.2	Externe Planungsleistung	131
2.5.2	<i>Ergebnisse</i>	132
2.5.2.1	Voruntersuchungen	132
2.5.2.2	Beispielgebäude	134
2.5.2.3	Mögliche Sanierungsvarianten	143
2.5.3	<i>Extern durchgeführte Planungen</i>	148
2.5.3.1	Überblick der Planungen	148
2.5.3.2	Kostenvergleich	156
2.5.3.3	Diskussion	157
3.	GEPLANTE ODER ERFOLGTE VERÖFFENTLICHUNGEN	159

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: ARBEITSPAKETSTRUKTUR DES PROJEKTS LCR290.....	17
ABBILDUNG 2: GESCHÄTZTE HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER IM DEUTSCHEN WOHNUNGSBESTAND ERFORDERLICHEN HEIZLASTEN	19
ABBILDUNG 3: AUSLEGUNGSHEIZLASTEN DER WOHNUNGEN IN BEISPIELGEBÄUDEN; DIE GEBÄUDE IN DER EICKENER UND LEIPZIGER STRAßE VERFÜGEN ÜBER GASBEFEUERTE FUßBODENHEIZUNGEN.....	20
ABBILDUNG 4: ABMESSUNGEN VON 27 WAND-GASHEIZKESSELN VON 7 HERSTELLERN	21
ABBILDUNG 5: MÖGLICHE AUSFÜHRUNGSVARIANTEN VON WÄRMEPUMPENLÖSUNGEN ZUM ERSATZ DEZENTRALER GASKESSEL.....	22
ABBILDUNG 6: DATENBASIS FÜR EINE SCHÄTZUNG DER LEISTUNGSKLASSEN FÜR ZENTRALE WÄRMEERZEUGER: DIE HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER WOHNUNGSGRÖßEN AUF BASIS VON DATEN AUS DEM GEBÄUDEBESTAND DER WOHNUNGSUNTERNEHMEN IM INDUSTRIEBERAT UND DIE VERTEILUNG DER EFFIZIENZKLASSEN VON MEHRFAMILIENHÄUSERN.	23
ABBILDUNG 7: ABGELEITETE VERTEILUNG DER LEISTUNGSKLASSEN FÜR ZENTRALE NEBENGEBÄUDE UND ANZAHL DER GEBÄUDE, HOCHGERECHNET AUF GANZ DEUTSCHLAND.	23
ABBILDUNG 8: FLÄCHE DER TECHNIKRÄUME IM VERGLEICH ZUR BEHEIZTEN WOHNFLÄCHE IN UNTERSUCHTEN MUSTERGEBÄUDEN.....	24
ABBILDUNG 9: VORSCHRIFTEN ZU ABSTÄNDEN ZWISCHEN WÄRMEPUMPEN UND GRUNDSTÜCKSGRENZEN; NACH BUNDESLÄNDERN.	26
ABBILDUNG 10: SCHALLLEISTUNGSPEGEL VON WÄRMEPUMPEN GEMÄß EN 12102 IM VERGLEICH ZUR NENNHEIZLEISTUNG – MARKTVERGLEICH. QUELLE: LAMBDA	27
ABBILDUNG 11: BEREICH BEI INSTALLATION AN EINER GESCHLOSSENEN WAND. QUELLE: BWP-LEITFADEN.....	28
ABBILDUNG 12: BEISPIELBERECHNUNG DES SCOP FÜR EINE LUFT-WASSER-WÄRMEPUMPE UNTER VERWENDUNG DER IMST-ART- SOFTWARE BEI UNTERSCHIEDLICHEN ANFORDERUNGEN AN DIE BEREITSTELLUNG DER HEIZLEISTUNG (VON 5 kW BIS 55 kW). VEREISUNGS- UND ABTAUBETRIEB NICHT BERÜCKSICHTIGT.	29
ABBILDUNG 13: SCOP UND HEIZLEISTUNG FÜR DIE LUFT-WASSER-WÄRMEPUMPE AUS ABBILDUNG 12 IM VERGLEICH. ROT: STEIGENDER SCOP BEI STEIGENDER HEIZLEISTUNG. BLAU: FALLENDER SCOP BEI STEIGENDER HEIZLEISTUNG. SCHWARZ: TRENDKURVE FÜR DIE HEIZLEISTUNG BEI FALLENDEN SCOP. BEI EINER ERHÖHUNG DER HEIZLEISTUNG UM 10 kW SINKT DER SCOP UM CA. 0,1 PUNKTE.	29
ABBILDUNG 14: LEISTUNG DES AP2-KOMPRESSORS. (A) ANSAUGTEMPERATUR VS. AUSLASSTEMPERATUR. (B) DRUCKVERHÄLTNIS VS. AUSLASSTEMPERATUR.	32
ABBILDUNG 15: LEISTUNG DER AP2-WÄRMETAUSCHER. (A) KONDENSATOREINTRITTSTEMPERATUR IM VERGLEICH ZUR HEIZLEISTUNG (B) VERDAMPFER-EINTRITTSTEMPERATUR IM VERGLEICH ZUR HEIZLEISTUNG.....	32
ABBILDUNG 16: THERMISCHE LEISTUNG VON AP2 (A) ENERGIEBILANZ (B) HEIZLEISTUNG VS. COP.	33
ABBILDUNG 17: AP3-WÄRMELEISTUNG (A) ENERGIEBILANZ (B) HEIZLEISTUNG VS. COP.	34
ABBILDUNG 18: AP3-KOMPRESSORLEISTUNG. (A) ANSAUGTEMPERATUR VS. AUSTRITTSTEMPERATUR. (B) DRUCKVERHÄLTNIS VS. AUSTRITTSTEMPERATUR.	34
ABBILDUNG 19: LEISTUNG DER AP3-WÄRMETAUSCHER. (A) KONDENSATOREINTRITTSTEMPERATUR VS. HEIZLEISTUNG (B) VERDAMPFER- EINTRITTSTEMPERATUR VS. KÜHLLLEISTUNG (C) HEIZLEISTUNG VS. DRUCKABFALL IM KONDENSATOR (D) KÜHLLLEISTUNG VS. DRUCKABFALL IM VERDAMPFER.....	35

ABBILDUNG 20: THERMISCHE LEISTUNG DES AP4 (A) ENERGIEBILANZ UND (B) HEIZLEISTUNG VS. COP.	36
ABBILDUNG 21: AP4-KOMPRESSORLEISTUNG. (A) SAUGTEMPERATUR VS. AUSLASSTEMPERATUR. (B) DRUCKVERHÄLTNIS VS. AUSLASSTEMPERATUR	36
ABBILDUNG 22: LEISTUNG DER AP4-WÄRMETAUSCHER. (A) KONDENSATOREINTRITTSTEMPERATUR VS. HEIZLEISTUNG (B) VERDAMPFER- EINTRITTSTEMPERATUR VS. KÜHLEISTUNG (C) HEIZLEISTUNG IM KONDENSATOR VS. DRUCKABFALL IM KONDENSATOR (D) KÜHLEISTUNG IM VERDAMPFER VS. DRUCKABFALL IM VERDAMPFER.....	37
ABBILDUNG 23: BENUTZEROBERFLÄCHE DES IMST-ART-SIMULATIONSTOOLS FÜR EIN BEISPIEL EINER LUFT-WASSER-WÄRMEPUMPE. .	38
ABBILDUNG 24: SIMULATION UND MESSUNG DES AP2-KÄLTEMITTELKREISLAUFS: (A) HEIZLEISTUNG (kW), (B) ELEKTRISCHE LEISTUNG (kW), (C) SAUGTEMPERATUR UND (D) DRUCKSEITE (°C)	40
ABBILDUNG 25: VERGLEICH VON SIMULATION UND MESSUNG DES AP2-KÄLTEMITTELKREISLAUFS: (A) COP (B) KÄLTEMITTELFÜLLMENGE.	41
ABBILDUNG 26: SIMULATION UND MESSUNG DES AP3-KÄLTEMITTELKREISLAUFS: (A) HEIZLEISTUNG (kW), (B) ELEKTRISCHE LEISTUNG (kW), (C) SAUG- UND (D) DRUCK-TEMPERATUR (°C)	42
ABBILDUNG 27: VERGLEICH VON SIMULATION UND MESSUNG DES AP3-KÄLTEMITTELKREISLAUFS: (A) COP MIT UNTERKÜHLUNGSGRADIENTEN (SC) IN KELVIN UND (B) KÄLTEMITTELFÜLLMENGE.....	43
ABBILDUNG 28: SIMULATION UND MESSUNG DES AP4-KÄLTEMITTELKREISLAUFS: (A) HEIZLEISTUNG (kW), (B) ELEKTRISCHE LEISTUNG (kW), (C) SAUGTEMPERATUR UND (D) DRUCKSEITE (°C)	44
ABBILDUNG 29: VERGLEICH VON SIMULATION UND MESSUNG DES AP4-KÄLTEMITTELKREISLAUFS: (A) COP UND (B) LÜFTERLEISTUNG (kW).....	45
ABBILDUNG 30: VERGLEICH VON SIMULATION UND MESSUNG DES AP4-KÄLTEMITTELKREISLAUFS: KÄLTEMITTELFÜLLMENGE (G)	45
ABBILDUNG 31: REIF- BZW. FROSTWACHSTUMSPHASEN.	48
ABBILDUNG 32: VEREISUNGSPROZESS AUF DER LUFTSEITIGEN OBERFLÄCHE EINER AUßENWENDEL IN EINER ASHP-ANLAGE. ¹	49
ABBILDUNG 33: (LINKS) DIE ZEITLICHE VERÄNDERUNG DER VERDAMPFUNGS- UND KONDENSATIONSDRÜCKE; UND (RECHTS) DIE ZEITLICHE VERÄNDERUNG DER HEIZLEISTUNG UND DES COP ¹	50
ABBILDUNG 34: DIE UMGEBUNGSTEMPERATUR UND RELATIVE LUFTFEUCHTIGKEIT.....	51
ABBILDUNG 35: BILDER DES VEREISUNGSPROZESSES ¹ . VOM 17. BIS ZUM 23. NOVEMBER.	51
ABBILDUNG 36: DIE TÄGLICHE LEISTUNG DER LUFT-WASSER-WÄRMEPUMPE UND DIE DURCHSCHNITTSTEMPERATUR [6].	52
ABBILDUNG 37: EINFLUSS DER FROSTBILDUNG AUF DIE KAPAZITÄT BEI HFC (LINKS) UND SFC (RECHTS).	53
ABBILDUNG 38: BLOCKIERUNGSGRAD (BR) IM VERGLEICH ZUR VEREISUNGSZEIT ¹	53
ABBILDUNG 39: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER INSTRUMENTIERUNG IN DER WÄRMEPUMPENEINHEIT.	55
ABBILDUNG 40: TESTMATRIX DER AKTUELLEN STUDIE (DAS DIAGRAMM IST IN VERSCHIEDENE ZONEN UNTERTEILT: I – KONDENSATION, II – KONDENSATION + VEREISUNG, III – SUBLIMATION, IV – TROCKEN).	55
ABBILDUNG 41: MODELL (MOD) IM VERGLEICH ZU EXPERIMENTELLEN (EXP) WERTEN FÜR DEN LUFTSEITIGEN DRUCKABFALL, DIE VERDAMPFUNGSTEMPERATUR UND DEN COP UNTER DEN BEDINGUNGEN VON A-3W55.	56
ABBILDUNG 42: MODELL (MOD) IM VERGLEICH ZU EXPERIMENTELLEN (EXP) WERTEN FÜR DEN LUFTSEITIGEN DRUCKABFALL, DIE VERDAMPFUNGSTEMPERATUR UND DEN COP UNTER A-5W35-BEDINGUNGEN.	57

ABBILDUNG 43: MODELL (MOD) IM VERGLEICH ZU EXPERIMENTELLEN (EXP) WERTEN FÜR DEN LUFTSEITIGEN DRUCKABFALL, DIE VERDAMPFUNGSTEMPERATUR UND DEN COP UNTER A-7W35-BEDINGUNGEN.	58
ABBILDUNG 44: SICHERHEITSTUFEN IN WÄRMEPUMPENSYSTEMEN FÜR DEN EINSATZ HOCHENTZÜNDLICHER KÄLTEMITTEL	59
ABBILDUNG 45: REGLEMENTIERTE VS. NICHT REGLEMENTIERTE / KRITISCHE THEMEN FÜR DIE SICHERHEIT VON WÄRMEPUMPEN. OFFENE FRAGEN ZUM SICHERHEITSVERHALTEN UND ZUR PRÜFUNG DER SICHERHEITS-PERFORMANCE, DIE WÄHREND DER LAUFZEIT DES LCR290-PROJEKTS DANK NEUER METHODEN IN NORMEN GELÖST WURDEN.....	60
ABBILDUNG 46: CAD-ANSICHT DES SCHWEIßBEHÄLTERS MIT (LINKS) UND OHNE (MITTE) DECKEL, DICHTEFLÄCHE DES DECKELS (RECHTS).....	64
ABBILDUNG 47: ABDICHTUNG DES RAUMS UNTER DEM SCHWEIßTANK	65
ABBILDUNG 48: SCHLÄUCHE FÜR DIE GASVERSORGUNG MIT PROPAN (ROT) UND STICKSTOFF (GELB), DURCHFÜHRUNG DURCH DEN SCHWEIßTANK (LINKS), POSITIONIERUNG IM DuT (RECHTS)	65
ABBILDUNG 49: GETEILTER ADAPTER IN DER CAD-PLANUNG DES GEHÄUSES LINKS, PHYSISCHE UMSETZUNG RECHTS	66
ABBILDUNG 50: DREI VERSCHIEDENE AUFSÄTZE MIT UNTERSCHIEDLICHEN SPALTBREITEN VON LINKS NACH RECHTS – 0 MM (DICHTKAPPE); 0,5 MM; 1 MM	66
ABBILDUNG 51: HÖHENUNTERSCHIED ZWISCHEN DER UNTERKANTE DES SPALTES UND DER OBERFLÄCHE DER SCHWENKPLATTE.....	66
ABBILDUNG 52: GEHÄUSEDURCHFÜHRUNG FÜR KOAXIALKABEL, INTEGRATION EINES EX-VENTILATORS IN DIE ABLUFT	67
ABBILDUNG 53: ÜBERSICHT ÜBER DIE SENSORPOSITIONEN IM PRÜFSTAND FÜR INNENRAUM-WÄRMEPUMPEN	68
ABBILDUNG 54: VERBINDUNG ZWISCHEN DEN ZWEI PRÜFSTÄNDEN FÜR DIE FREISETZUNG – FÜR DIE INNEN- UND AUßENAUFSTELLUNG VON WÄRMEPUMPEN, ABSTANDSMESSUNGEN (RECHTS).....	68
ABBILDUNG 55: ÜBERSICHT ÜBER DIE SENSORPOSITIONEN IM PRÜFSTAND FÜR AUßENWÄRMEPUMPEN.....	69
ABBILDUNG 56: LINKS: LCR290-DEMONSTRATOR IN SEINEM „DICHTEN“ GEHÄUSE; OBEN AM DEMONSTRATOR IST DER INTERNE RAUMVENTILATOR ZU SEHEN. DIESER WIRD FÜR EINE IDEALE DURCHMISCHUNG IM AUFSTELLUNGSRAUM EINGESETZT, UM EINE BILANZIERUNG DER AUS DEM GEHÄUSE FREIGESetzten MENGEN ZU BESTIMMEN. RECHTS: SCHEMA ZUR KAMPAGNE 1.....	70
ABBILDUNG 57: MESSUNGEN ZU KAMPAGNE 1 MIT JEWEILIGER DARSTELLUNG DER ZEITEN MIT KONZENTRATIONEN ÜBER 100% UNTERE EXPLOSIONSGRENZE (LFL), ABHÄNGIG VOM ABSTAND ZUM DuT.	71
ABBILDUNG 58: EINBAUORT DES UMWÄLZVENTILATORS (LINKS) SCHLAUCHVERLÄNGERUNG NACH UNTEN (RECHTS).....	72
ABBILDUNG 59: LINKS: PARALLEL BETRIEB DER VENTILATOREN. RECHTS: SCHEMA DER KAMPAGNE 2.	73
ABBILDUNG 60: MESSUNGEN ZU KAMPAGNE 2 MIT JEWEILIGER DARSTELLUNG DER ZEITEN MIT KONZENTRATIONEN ÜBER 100% UNTERE EXPLOSIONSGRENZE (LFL), ABHÄNGIG VOM ABSTAND ZUM DuT.	73
ABBILDUNG 61: SCHEMA ZU SICHERHEITSKONZEPT KAMPAGNE 3	76
ABBILDUNG 62: LUFTEINLASS UND BYPASS-SPERRRING.....	76
ABBILDUNG 63: MESSUNGEN ZU KAMPAGNE 3 MIT JEWEILIGER DARSTELLUNG DER ZEITEN MIT KONZENTRATIONEN ÜBER 100% UNTERE EXPLOSIONSGRENZE (LFL), ABHÄNGIG VOM ABSTAND ZUM DuT.	77
ABBILDUNG 64 : GETESTETE KAMINABDECKUNGEN: AUSFÜHRUNG MIT ROTIERENDEM VENTILATOR (LINKS) UND AUSFÜHRUNG MIT FESTSTEHENDER REGENHAUBE (MITTIG). SCHEMA DER KAMPAGNE 4 (RECHTS).....	79
ABBILDUNG 65: MESSUNGEN ZU KAMPAGNE 4 MIT JEWEILIGER DARSTELLUNG DER ZEITEN MIT KONZENTRATIONEN ÜBER 100% UNTERE EXPLOSIONSGRENZE (LFL), ABHÄNGIG VOM ABSTAND ZUM DuT.	81

ABBILDUNG 66: SCHEMA ZU SICHERHEITSKONZEPT KAMPAGNE 5	83
ABBILDUNG 67: ABGEDICHTETER RAUM UNTER DEM ERHÖHTEN DEMONSTRATOR HP	83
ABBILDUNG 68: MESSUNGEN ZU KAMPAGNE 4 MIT JEWEILIGER DARSTELLUNG DER ZEITEN MIT KONZENTRATIONEN ÜBER 100% UNTERE EXPLOSIONSGRENZE (LFL), ABHÄNGIG VOM ABSTAND ZUM DUT.	84
ABBILDUNG 69: GETESTETE SICHERHEITSKONZEPTE IN LCR290 UND DEREN EINORDNUNG ANALOG DER KATEGORISIERUNG AUS ABBILDUNG 45	87
ABBILDUNG 76: SHAP-ANALYSE ZUR ERMITTLUNG DER RELEVANZ VARIERTER PARAMETER IN DER GESAMTHEIT UNTERSUCHTER KAMPAGNEN	89
ABBILDUNG 71: VISUALISIERUNG DES ZUSAMMENSPIELS ZWISCHEN DEM LEBENSZYKLUS VON GERÄTEN (Z. B. WÄRMEPUMPEN) UND DER ZUR RISIKOBEWÄLTIGUNG ANGEWANDTEN SICHERHEITSPHILOSOPHIE	90
ABBILDUNG 72: BERÜCKSICHTIGTE VARIANTEN FÜR DEZENTRALE WÄRMEPUMPENLÖSUNGEN	96
ABBILDUNG 73: EINFLUSS DES WÄRMEPUMPENSYSTEMS BEI ZENTRALER WÄRMEVERSORGUNG AUF DIE KRITERIEN; LWWP: LUFT- WASSER-WP, SWWP: SOLE-WASSER-WP, EWS: ERDWÄRMESONDE, FWS: FRISCHWASSERSTATION; 5: HÖCHSTE BEWERTUNG, 1: GERINGSTE BEWERTUNG	98
ABBILDUNG 74: EINFLUSS DER ART DER BRAUCHWARMWASSERERWÄRMUNG BEI ZENTRALER WÄRMEVERSORGUNG AUF DIE KRITERIEN; LWWP: LUFT-WASSER-WP, DLE: DURCHLAUFERHITZER; 5: HÖCHSTE BEWERTUNG, 1: GERINGSTE BEWERTUNG	98
ABBILDUNG 75: EINFLUSS DES WÄRMEPUMPENSYSTEMS BEI DEZENTRALER WÄRMEVERSORGUNG AUF DIE KRITERIEN; LWWP: LUFT- WASSER-WP, SWWP: SOLE-WASSER-WP, LLWP: LUFT-LUFT-WÄRMEPUMPE, EWS: ERDWÄRMESONDE, FWS: FRISCHWASSERSTATION; 5: HÖCHSTE BEWERTUNG, 1: GERINGSTE BEWERTUNG	99
ABBILDUNG 76: EINFLUSS DER POSITION DER AUßENEINHEIT VON SOLE-SPLIT-GERÄTEN BEI DEZENTRALER WÄRMEVERSORGUNG AUF DIE KRITERIEN; SWWP: SOLE-WASSER-WP, WÜ: WÄRMEÜBERTRAGER; 5: HÖCHSTE BEWERTUNG, 1: GERINGSTE BEWERTUNG ...	100
ABBILDUNG 77: EINFLUSS DER ART DER BRAUCHWARMWASSERERWÄRMUNG BEI DEZENTRALER WÄRMEVERSORGUNG AUF DIE KRITERIEN; SWWP: SOLE-WASSER-WP, EWS: ERDWÄRMESONDE, DLE: DURCHLAUFERHITZER; 5: HÖCHSTE BEWERTUNG, 1: GERINGSTE BEWERTUNG	101
ABBILDUNG 78: ÜBERSICHT BEWERTUNG FÜR ALLE UNTERSUCHTEN ZENTRALEN WÄRMEPUMPENLÖSUNGEN	102
ABBILDUNG 79: ÜBERSICHT BEWERTUNG FÜR ALLE UNTERSUCHTEN DEZENTRALEN WÄRMEPUMPENLÖSUNGEN; *R32, ALLE ÜBRIGEN SYSTEME MIT R290	102
ABBILDUNG 80: VOR- UND RÜCKLAUFTEMPERATURPROFIL DES HEIZSYSTEMS IN ABHÄNGIGKEIT VON DER AUßENTEMPERATUR SOWIE DER ENTSPRECHENDEN WÄRMELAST DES GEBÄUDES	103
ABBILDUNG 81: ZENTRALE LUFT-WASSER-WÄRMEPUMPENKONFIGURATION.	104
ABBILDUNG 82: UNTERSUCHTE HYDRAULISCHE KONFIGURATION A) STELLT DIE SINGLE-MODE-KONFIGURATION DAR, B) DIE DEDICATED-I- KONFIGURATION, C) DIE DEDICATED-II-KONFIGURATION UND D) DIE ANY-MODE-KONFIGURATION. INSTALLIERTE THERMISCHE LEISTUNG DER WÄRMEPUMPEN; THERMISCHE LEISTUNG BEI A-5/W52	105
ABBILDUNG 83: ERGEBNISSE ZU SPF UND ANTEIL DER ERZEUGTEN/ABGEGEBENEN WÄRME FÜR DIE VERSCHIEDENEN HYDRAULISCHEN KONFIGURATIONEN MIT MEHREREN WÄRMEPUMPEN UND DEM REFERENZFALL MIT EINER GROßEN WÄRMEPUMPE (EINE GROßE WP).	105

ABBILDUNG 84: ANZAHL DER EINSCHALTVORGÄNGE DER WÄRMEPUMPEN. FÜR DIE VERSCHIEDENEN HYDRAULISCHEN KONFIGURATIONEN VON MEHRFACH-WÄRMEPUMPEN UND DEN REFERENZFALL MIT EINER EINZIGEN GROßEN WÄRMEPUMPE (EINE GROßE WÄRMEPUMPE).	106
ABBILDUNG 85: ZYKLUSERGEBNISSE FÜR VERSCHIEDENE KOMBINATIONEN DER INSTALLIERTEN THERMISCHEN LEISTUNG DER WÄRMEPUMPEN IM SYSTEM DEDICATED-II. DIE VERSCHIEDENEN KOMBINATIONEN DER INSTALLIERTEN LEISTUNG WERDEN DURCH (HP1, HP2, HP3) kW DARGESTELLT.	107
ABBILDUNG 86: ZEITVERZÖGERUNG, SEQUENTIELLES EINSCHALT-SIGNAL FÜR WÄRMEPUMPEN.	108
ABBILDUNG 87: TEMPERATURHYSTERESE, SEQUENTIELLES EINSCHALT-SIGNAL FÜR DIE HP.	109
ABBILDUNG 88: KOMBINIERTER REGELUNGSSTRATEGIE FÜR DIE SEQUENZIELLE EINSCHALTUNG DER WÄRMEPUMPEN. KOMBINATION VON ZEITVERZÖGERUNG UND TEMPERATURHYSTERESE.	109
ABBILDUNG 89: PRIORITÄTSZUWEISUNG FÜR DIE STUFENSCHALTUNG DER WÄRMEPUMPEN (VEREINFACHTE DARSTELLUNG)	110
ABBILDUNG 90: SIGNAL ZUR SEQUENZIELLEN ABSCHALTUNG DER HPs. BASIEREND AUF DER TEMPERATURHYSTERESE.	111
ABBILDUNG 91: VERGLEICH DER EIN-/AUSSCHALTZYKLEN DER WÄRMEPUMPEN BEI DEN DREI REGELUNGSSTRATEGIEN.	112
ABBILDUNG 92: MÖGLICHKEITEN DER HYDRAULISCHEN INTEGRATION VON PUFFERSPEICHERN FÜR DIE RAUMHEIZUNG (AUSWAHL)	113
ABBILDUNG 93: ZWEI HYDRAULISCHE KONFIGURATIONEN FÜR DEZENTRALE WÄRMEPUMPENSYSTEME (HP), DIE MÖGLICHE STANDORTE FÜR ELEKTRISCHE ZUSATZHEIZUNGEN (EH) VERANSCHAULICHEN. LINKS: WÄRMEPUMPENSYSTEM MIT THERMISCHEM ENERGIESPEICHER (TES) AUSSCHLIEßLICH ZUR WARMWASSERBEREITUNG (HPS1); RECHTS: WÄRMEPUMPENSYSTEM MIT EINEM KOMBINIERTEN SPEICHER FÜR RAUMHEIZUNG UND WARMWASSERBEREITUNG ÜBER EINE FRISCHWASSERSTATION (HPS2).	114
ABBILDUNG 94: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES IN DYMOLA MODELLIERTEN DEZENTRALEN WÄRMEPUMPENSYSTEMS.	116
ABBILDUNG 95: HÄUFIGKEITSVERTEILUNGEN DER RAUM- UND WARMWASSTERTEMPERATUREN FÜR SECHS SYSTEMVARIANTEN OHNE ELEKTROHEIZUNGEN, WOBEI ENTWEDER OBERFLÄCHENNAHE ERDWÄRME (LINKE SEITE DER VIOLIN-DIAGRAMME, GRÜN) ODER AUßENLUFT (RECHTE SEITE, BLAU) ALS WÄRMEQUELLE GENUTZT WIRD, SOWIE DIE ERFÜLLUNGSRATE DER RAUMTEMPERATUR IN % (OBERES FELD) UND DER PROZESSFÄHIGKEITSINDEX FÜR DIE WARMWASSERBEREITUNG (UNTERES FELD).	119
ABBILDUNG 96: ZUSAMMENHANG ZWISCHEN SPEICHERKAPAZITÄT UND EINHALTUNG DES THERMISCHEN KOMFORTS FÜR SYSTEMVARIANTEN MIT UND OHNE ELEKTRISCHE HEIZUNGEN (EHs). (A) RAUMTEMPERATUR-EINHALTUNGSRATE; (B) PROZESSFÄHIGKEITSINDEX FÜR DIE WARMWASSERBEREITUNG.	119
ABBILDUNG 97: RAUMTEMPERATUR-EINHALTUNGSRATE ÜBER VERSCHIEDENE SYSTEMAUSLEGUNGSFAKTOREN FÜR DEZENTRALE WÄRMEPUMPENSYSTEME MIT ELEKTRISCHEN HEIZUNGEN IN DEN VORLAUFLEITUNGEN.	120
ABBILDUNG 98: SAISONALER LEISTUNGSFAKTOR (SPF) DER WÄRMEPUMPENSYSTEME MIT ELEKTRISCHEN HEIZUNGEN IN DEN VORLAUFLEITUNGEN ÜBER VERSCHIEDENE SYSTEMVARIANTEN UND WÄRMEQUELLEN HINWEG. (A) SPF FÜR DIE SYSTEME „MINI“ UND „SMALL“ MIT UNTERSCHIEDLICHER SPEICHERKAPAZITÄT. (B) SPF FÜR VERSCHIEDENE WÄRMEQUELLEN.	121
ABBILDUNG 99: KOMPRESSORZYKLENZAHL DER WÄRMEPUMPENSYSTEME MIT ELEKTRISCHEN HEIZUNGEN IN DEN VORLAUFLEITUNGEN ÜBER VERSCHIEDENE SYSTEMVARIANTEN UND WÄRMEQUELLEN HINWEG. (A) KOMPRESSORZYKLENZAHL FÜR DIE SYSTEME „MINI“ (60L) UND „SMALL“ (120L) BEI UNTERSCHIEDLICHER SPEICHERKAPAZITÄT. (B) KOMPRESSORZYKLENZAHL FÜR VERSCHIEDENE WÄRMEQUELLEN.	121

ABBILDUNG 100: ZUSAMMENHANG ZWISCHEN SPEICHERKAPAZITÄT UND SPITZENSTROMLAST EINER EINZELNEN DEZENTRALEN WÄRMEPUMPENANLAGE MIT ELEKTRISCHEN HEIZUNGEN IN DEN VERSORGUNGSLEITUNGEN IN SANIERTEN UND NICHT SANIERTEN WOHNUNGEN.....	122
ABBILDUNG 101: GLEICHZEITIGKEITSFUNKTIONEN DES 15-MINUTEN-DURCHSCHNITTS-STROMVERBRAUCHS FÜR DEZENTRALE WÄRMEPUMPENSYSTEME IN MEHRFAMILIENHÄUSERN MIT UNTERSCHIEDLICHER ANZAHL VON WOHNUNGEN UND UNTERSCHIEDLICHEM SANIERUNGSZUSTAND. ERGEBNISSE FÜR ASHP	122
ABBILDUNG 102: LINKS: BEISPIEL FÜR EINE AN DER FASSADE MONTIERTE VERSORGUNGSLEITUNG; RECHTS: EISBILDUNG AN DER LEITUNG (FLECKIGE OBERFLÄCHE AM RECHTEN ROHR) UND AM WANDKANAL	125
ABBILDUNG 103: BEISPIEL FÜR KAMIN-/SCHACHTQUERSCHNITTE MIT WÄRMEGEDÄMMTEN ROHREN.....	125
ABBILDUNG 104: STÜNDLICHE DURCHSCHNITTLICHE QUELLENSEITIGE WÄRMELAST EINER DEZENTRALEN WÄRMEPUMPENANLAGE IN EINEM UNRENOVIERTEN MEHRFAMILIENHAUS.....	126
ABBILDUNG 105: GLEICHZEITIGKEITSFUNKTIONEN DER STÜNDLICHEN DURCHSCHNITTLICHEN HEIZLAST AUF DER QUELLENSEITE FÜR DEZENTRALE WÄRMEPUMPENSYSTEME IN MEHRFAMILIENHÄUSERN MIT UNTERSCHIEDLICHER ANZAHL VON WOHNUNGEN UND UNTERSCHIEDLICHEM SANIERUNGSZUSTAND.	127
ABBILDUNG 112: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER GEBÄUDE NACH BAUALTERSKLASSE FÜR DEN GESAMTEN DEUTSCHEN GEBÄUDEBESTAND (LINKS) UND FÜR DAS GEBÄUDEPORTFOLIO DER FIRMEN AUS DEM INDUSTRIEBEIRAT (RECHTS).....	132
ABBILDUNG 113: VERGLEICH DES HEIZSYSTEMS IM DEUTSCHEN GEBÄUDEBESTAND (LINKS) MIT DEM GEBÄUDEPORTFOLIO DER DER FIRMEN AUS DEM INDUSTRIEBEIRAT (RECHTS)	133
ABBILDUNG 114: VERGLEICH DES ENDENERGIETRÄGERS IN MFH IN DEUTSCHLAND (LINKS) UND FÜR DAS GEBÄUDEPORTFOLIO DER WOHNUNGSUNTERNEHMEN DES INDUSTRIEBEIRATS (RECHTS)	133
ABBILDUNG 109: LAGEPLAN UND STRAßENANSICHT. QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG / ANSICHT ORIGINALPLAN	134
ABBILDUNG 110: NOMINALHEIZLAST DER HEIZKÖRPER BEI VERSCHIEDENEN VL/RL-TEMPERATUREN.....	135
ABBILDUNG 111: LAGEPLAN UND FOTO ESSEN, SCHWANENBUSCHSTR. 141 QUELLEN: EIGENE DARSTELLUNG	136
ABBILDUNG 112: NOMINALHEIZLAST DER HEIZKÖRPER BEI VERSCHIEDENEN VL/RL-TEMPERATUREN.....	137
ABBILDUNG 113: LAGEPLAN UND STRAßENANSICHT. QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG / ANSICHT ORIGINALPLAN	137
ABBILDUNG 114: NOMINALHEIZLAST DER HEIZKÖRPER BEI VERSCHIEDENEN VL/RL-TEMPERATUREN.....	138
ABBILDUNG 115: LAGEPLAN UND STRAßENANSICHT. QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG / ANSICHT GEBÄUDEPLAN	138
ABBILDUNG 116: NOMINALHEIZLAST DER HEIZKÖRPER BEI VERSCHIEDENEN VL/RL-TEMPERATUREN.....	139
ABBILDUNG 117: LAGEPLAN UND STRAßENANSICHT.....	140
ABBILDUNG 118: NOMINALHEIZLAST DER HEIZKÖRPER BEI VERSCHIEDENEN VL/RL-TEMPERATUREN.....	141
ABBILDUNG 119: KELLERGRUNDRISS UND SCHNITT. GEBÄUDEPLÄNE AUS DER BAUZEIT.....	144
ABBILDUNG 120: ANSICHT EICKENER STRAßE MIT LEITUNGSFÜHRUNG AN DER FASSADE. QUELLE: ANSICHT ORIGINALPLAN, BEARBEITET	145
ABBILDUNG 121: FASSADE DER LEIPZIGER STR. 27 MIT AUßENEINHEITEN UND PROPANBEDINGTEN SCHUTZABSTÄNDEN. BILDQUELLE: GWG SCHÖNEBECK, BEARBEITET	147

ABBILDUNG 122: GRUNDRISS KELLER UND 1. OBERGESCHOSS MIT AKTUELLEM STANDORT DER GAS-ETAGENHEIZUNGEN UND POTENZIELLEM NEUEN TECHNIKRAUM (NR. 269). QUELLE: GWSG MÖNCHENGLADBACH, BEARBEITET VON IG ESSEN	150
ABBILDUNG 123: KONZEPTSCHEMA: A/W-WP MIT PUFFERSPEICHER, TWW-SPEICHER UND FRISCHWASSERSTATION. AUS: ERLÄUTERUNGSBERICHT IG ESSEN.....	151
ABBILDUNG 124: GRUNDRISS MIT BESTANDSTHERMEN. QUELLE: PLAN IME ESSEN (BEARBEITET), FOTOS IG ESSEN	151
ABBILDUNG 125: STRANGSCHEMA BEISPIELGEBÄUDE 2	152
ABBILDUNG : GRUNDRISS KELLERGECHOSS MIT MÖGLICHEM ORT FÜR HEIZUNGSRAUM	153
ABBILDUNG 127: KONZEPTSCHEMA: A/W-WP MIT PUFFERSPEICHER UND BESTEHENDEN EL. DURCHLAUFERHITZER. QUELLE: BERICHT IG ESSEN	153
ABBILDUNG 128: MESSUNG BESTANDSSYSTEM. QUELLE: SOLARES BAUEN.....	154
ABBILDUNG 129: ANLAGENSCHHEMA (VORABZUG). QUELLE: SOLARES BAUEN	155
ABBILDUNG : ANLAGENSCHHEMA (VORABZUG). QUELLE: SOLARES BAUEN.	156
ABBILDUNG 131: INVESTITIONSKOSTEN IM VERHÄLTNIS ZUR LEISTUNG DES NEUEN WÄRMEERZEUGERS	157
ABBILDUNG 132: SPEZIFISCHE INVESTITIONSKOSTEN IN €/kW INSTALLIERTER LEISTUNG BEI A2/W35 BZW. B0/W23	157

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: ANWENDUNGS- UND ENTWICKLUNGSSCHWERPUNKTE	15
TABELLE 2: VEREINFACHTE DARSTELLUNG DER SCHALLLEISTUNGSPEGEL UND DER DARAUS RESULTIERENDEN ENTFERNUNGEN ZU SCHUTZBEDÜRFTIGEN RÄUMEN.....	26
TABELLE 3 DEZENTRAL (AP2 – ETAGEN-WÄRMEPUMPE)	30
TABELLE 4 ZENTRAL INNEN (AP3 – KELLERLÖSUNG).....	30
TABELLE 5 ZENTRAL AUßEN (AP4 – AUßENAUFGESTELLTE LW-WÄRMEPUMPE).....	30
TABELLE 6 LISTE ALLER KOMPONENTEN VERWENDET IN DEN DEMONSTRATOREN.....	31
TABELLE 7 ÜBERSICHT LEISTUNG DER DEMONSTRATOREN.....	38
TABELLE 8 FORMELZEICHEN ÜBERSICHT IM VEREISUNGSKAPITEL	46
TABELLE 9 : HAUPTMERKMALE DES RIPPENROHR-WÄRMETAUSCHERS.....	54
TABELLE 10: VERFÜGBARE KONZEPTE IN IEC 60335-2-40:2022 (EDITION 7) FÜR A3-KÄLTEMITTEL	61
TABELLE 11 : ÄNDERUNGEN ZWISCHEN DEN EDITIONS 7 UND 8 SOWIE DEN BEIDEN FRAGMENTEN DER ÄNDERUNG 1 (BEZOGEN AUF IEC 60335-2-40 FÜR A3-KÄLTEMITTEL).....	62
TABELLE 12: GELTENDE BEDINGUNGEN FÜR DEN ABSAUGVOLUMENSTROM EINES BELÜFTETEN GEHÄUSES.....	78
TABELLE 13: UNTERSUCHTE SYSTEMVARIANTEN FÜR DIE ZENTRALE WÄRMEVERSORGUNG	93
TABELLE 14: UNTERSUCHTE SYSTEMVARIANTEN FÜR DIE DEZENTRALE (WOHNUNGSWEISE) WÄRMEVERSORGUNG.....	94
TABELLE 15: SPF-ERGEBNISSE FÜR VERSCHIEDENE KOMBINATIONEN VON WÄRMEPUMPEN FÜR DIE KONFIGURATION DEDICATED-II. DIE VERSCHIEDENEN KOMBINATIONEN DER INSTALLIERTEN LEISTUNG WERDEN DURCH (HP1, HP2, HP3) kW DARGESTELLT.	107
TABELLE 16: VERGLEICH DES SPF ZWISCHEN DEN DREI REGULINGSSTRATEGIEN	111
TABELLE 17: SPEZIFIKATIONEN DER THERMISCHEN ENERGIESPEICHER FÜR SECHS VARIANTEN DEZENTRALER WÄRMEPUMPENSYSTEME. 1 SCHMELZ-TEMPERATUR BEI 58 °C; 2 DIE WÄRMEKAPAZITÄT WIRD DURCH SIMULATION AUS EINEM LADEZUSTAND VON 60 °C FÜR WASSER UND 65 °C FÜR SALZHYDRAT BERECHNET, WOBEI DIE ENTLADUNG SO LANGE FORTGESETZT WIRD, BIS DIE WASSERAUSTRITTSTEMPERATUR UNTER 40 °C FÄLLT.	115
TABELLE 18: DÄMMUNGSANFORDERUNGEN FÜR KALTWASSERLEITUNGEN GEMÄß GELTENDER DEUTSCHER GESETZGEBUNG	124
TABELLE 19 AUSGEWÄHLTE BEISPIELGEBÄUDE:	128
TABELLE 20: KENNDATEN BEISPIELGEBÄUDE EICKENER STRAßE.....	134
TABELLE 21: KENNDATEN BEISPIELGEBÄUDE SCHWANENBUSCHSTRASSE	136
TABELLE 22: KENNDATEN BEISPIELGEBÄUDE HANNOVER LÖWENBERGER STRASSE.....	138
TABELLE 23: KENNDATEN BEISPIELGEBÄUDE POTSDAM.....	139
TABELLE 24: KENNDATEN BEISPIELGEBÄUDE LEIPZIGER STRASSE	140
TABELLE 25: EIGNUNG DER BEISPIELGEBÄUDE FÜR DIE NUTZUNG VERSCHIEDENER WÄRMEQUELLEN. GRÜN = EIGNUNG, HELLGRÜN/HELLROT = EINGESCHRÄNKT GEEIGNET, ROT= KEINE EIGNUNG.....	142
TABELLE 26: KENNZAHLEN GEBÄUDEBESTAND UND PLANUNGSERGEBNIS	149

1. Ausgangssituation des Vorhabens

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Projekt LCR290 war es, einfach anwendbare und multiplizierbare Lösungen für den Austausch von Gas- und Ölheizungen durch Wärmepumpen in Bestandsgebäuden unter Verwendung des natürlichen Kältemittels R290 (Propan) zu erarbeiten.

Die Kombination aus dem für die Energiewende erforderlichen Anstieg installierter Wärmepumpensysteme (6 Mio. Geräte bis 2030) und der angestrebten Verschärfung der F-Gas-Verordnung, die in der Entwurfsfassung ein de facto Verbot für die bisher noch breit verwendeten Kältemittel R410A und R407C bedeutet, stellt für die Wärmepumpenhersteller und die umsetzenden Gewerke eine große Herausforderung dar. Dabei stellen sich je nach Bestandsanlagentechnik und Gebäudeklasse (E/ZFH vs. MFH, Baualtersklasse) verschiedene Anforderungen und Schwierigkeitsgrade des Heizungsaustauschs durch Wärmepumpen. Besondere Herausforderungen werden im Wohnungsbestand der Mehrfamilienhäuser gesehen.

In dem hier skizzierten Projekt sollen für die drei Anwendungsfelder

- „Ersatz Gas-Etagenheizung“,
- „Ersatz Zentralheizung im Keller“ und
- „Leistungssteigerung außen aufgestellter Wärmepumpen“

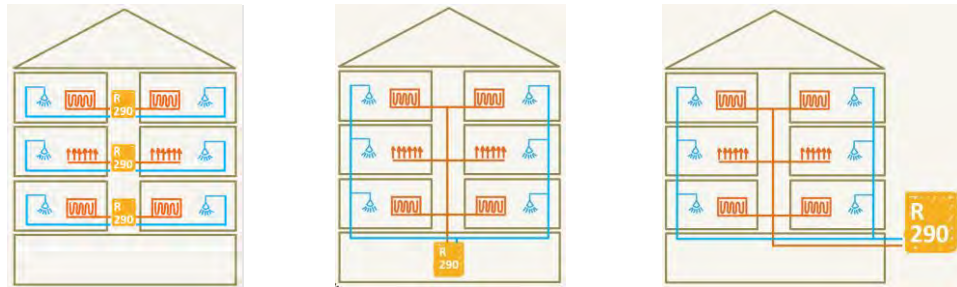
technische Wärmepumpensystemlösungen entwickelt und in unterschiedlicher Ausprägung durch Funktionsmuster demonstriert werden. Die Lösungen sollen derart gestaltet sein, dass im Anschluss an das Projekt eine breite und akzeptierte Umsetzung in Gebäuden stattfinden kann.

Die wissenschaftlichen Herausforderungen liegen in zahlreichen Einzelthemen, wie z.B. der Kältemittelreduktion für neue Wärmepumpensysteme, der Entwicklung von Lösungen für den Ersatz von Gasetagenheizungen, der systematischen Quellenanalyse hierfür und der integrierenden Regelung zwischen Gerät und System und soll Grundstein für Entwicklungsfragen der nächsten und übernächsten Produktgenerationen sein. Tabelle 1 fasst die Arbeitsinhalte kompakt zusammen.

Tabelle 1: Anwendungs- und Entwicklungsschwerpunkte

LCR290

LOW CHARGE SOLUTIONS



NAME:	Innen/ Etage (MFH)	Innen/ Keller (EFH/MFH)	Außen
GEBÄUDETYP:	MFH/ Etagenlösung, Bestand	EFH und MFH, Bestand	EFH und MFH, Neubau und Bestand
WÄRMEQUELLE	Luft (indirekt), Erdreich, NT-Netz	Luft (indirekt), Erdreich, NT-Netz	Luft (direkt)
THERMISCHE LEISTUNG	bis 10 kW	10-80 kW	10-80 kW
HERAUSFORDERUNGEN	R290 Gerätekonzept für Heizung und Trinkwarmwasser mit 150g Füllmenge, Integration Kühlfunktion, Gesamtintegration und Regelung Quelle	R290 Gerätekonzept mit Sicherheitskonzept, Qualifizierung von Komponenten höherer Leistung, vereinheitlichte Quellenerschließung, stark unterschiedliche Bauvorschriften	Sicherheitszonen um Geräte erfordern gezielte Aufstellung, bei hohen Leistungen erhöhte Komplexität im urbanen Raum, stark unterschiedliche Bauvorschriften
LÖSUNGSANSATZ GERÄT	„steckerfertiges“ Gerätekonzept mit LC150 Kältekreis und Speicher, auf zentrale Quelle angepasste Regelung, Sicherheitskonzepte	Gerätekonzept mit LC150 Kältekreis, für große Leistungen Kaskade oder skaliert, Vereinheitlichung von Sicherheitskonzepten	Gerätekonzept für große Leistungen mit Kaskade oder skaliert, Kompaktheit durch Füllmengenreduktion, füllmengenoptimierte, effiziente Abtaustrategien, Vereinheitlichung von Sicherheitskonzepten
LÖSUNGSANSATZ SYSTEM	Quellennetz mit zentralem Luftkollektor, Erdreich, Gebäudehülle oder NT-Wärmepumpe, Regelung zentral/ dezentral, Standardisierung	Standardisierung von Schnittstellen, robuste und effiziente Hydraulikkonzepte, Optimierung, Selbstparametrierung	Standardisierung von Schnittstellen, robuste und effiziente Hydraulikkonzepte, Optimierung, Selbstparametrierung

Die zentralen Marktakteure dieses Prozesses, die Wohnungswirtschaft und die Wärmepumpenhersteller, sind über einen Beirat in das Projekt eingebunden und können die Anforderungen und Randbedingungen der zu entwickelnden Lösungen mitbestimmen und so zentral an der Entwicklung der Lösungen teilhaben und jeweils in ihre dann folgenden Produktentwicklungen übernehmen.

1.2 Voraussetzungen

Die Ausgangssituation für das Vorhaben LCR290 war durch ambitionierte Ziele der Bundesregierung zum Wärmepumpenausbau als Folge des Ukraine-Kriegs geprägt. Bis 2025 sollten in Deutschland 3 Millionen Wärmepumpen installiert sein, bis 2030 sogar 6 Millionen. Zudem sah das Gebäudeenergiegesetz vor, dass ab dem 1. Januar 2024 neu eingebaute Heizungssysteme mindestens zu 65 % mit erneuerbaren Energien betrieben werden müssen. Um diese Ziele zu erreichen, wurde eine Vervierfachung der Produktions- und Installationskapazitäten für Wärmepumpen angestrebt.

Parallel dazu verschärfte die Überarbeitung der F-Gas-Verordnung den Druck auf etablierte Kältemittel: Der Phase-Down fluoriierter Treibhausgase wurde beschleunigt, und ab 2027 dürfen Wärmepumpen mit einer Heizleistung von mehr als 12 kW nur noch Kältemittel mit einem Treibhauspotenzial (GWP) von unter 750 verwenden. Dies kam einem defacto-Verbot der bis dahin weit verbreiteten Kältemittel R410A und R407C gleich, die im Jahr 2020 noch einen Marktanteil von über 85 % hatten.

Gleichzeitig nahm der Wärmepumpenmarkt stark an Fahrt auf: Im Jahr 2022 wurden rund 236.000 Wärmepumpen installiert, was einem Zuwachs von 53 % entspricht. Diese wurden überwiegend außen aufgestellt an Einfamilienhäusern verbaut. Aufgrund begrenzter Verfügbarkeit von Komponenten und Geräten für größere Bestandsgebäude sowie mangels Installation- und Betriebserfahrungen im Mehrfamilienhausbereich bestand in diesem Bereich ein deutlicher Forschungsbedarf. Diese Kombination aus politischen Zielvorgaben, regulatorischem Wandel und dynamischem Markthochlauf bildet die Ausgangslage für das Projekt.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde in fünf Arbeitspaketen strukturiert. AP1 und AP5 sind übergreifende Arbeitspakete, die Daten erheben, zentrale Fragestellungen bearbeiten, Wissen aufbereiten und sowohl innerhalb des Projekts als auch im Außenraum verbreiten. Die Arbeitspakete 2, 3 und 4 adressieren die konkreten Anwendungsfelder „Etage“, „Keller“ und „Außenaufstellung“. Im Rahmen dieser Arbeitspakete wurden konkrete Lösungen und Konzepte entwickelt, die begleitend und im Anschluss an das Projekt in die Produktentwicklung der Firmen Eingang finden können.

In der Abbildung 1 sind Arbeitspakete übersichtlich mit ihren Arbeitsschwerpunkten dargestellt. Dabei sind die wissenschaftlich-konzeptionellen Arbeiten in Hellblau hinterlegt, die zu erreichenden Projektergebnisse in Form eines Funktionsmusters in Grün und die Konzept- und Softwarelösungen in Gelb dargestellt. Die Details der Arbeitsplanung sind auf den folgenden Seiten ausgeführt.

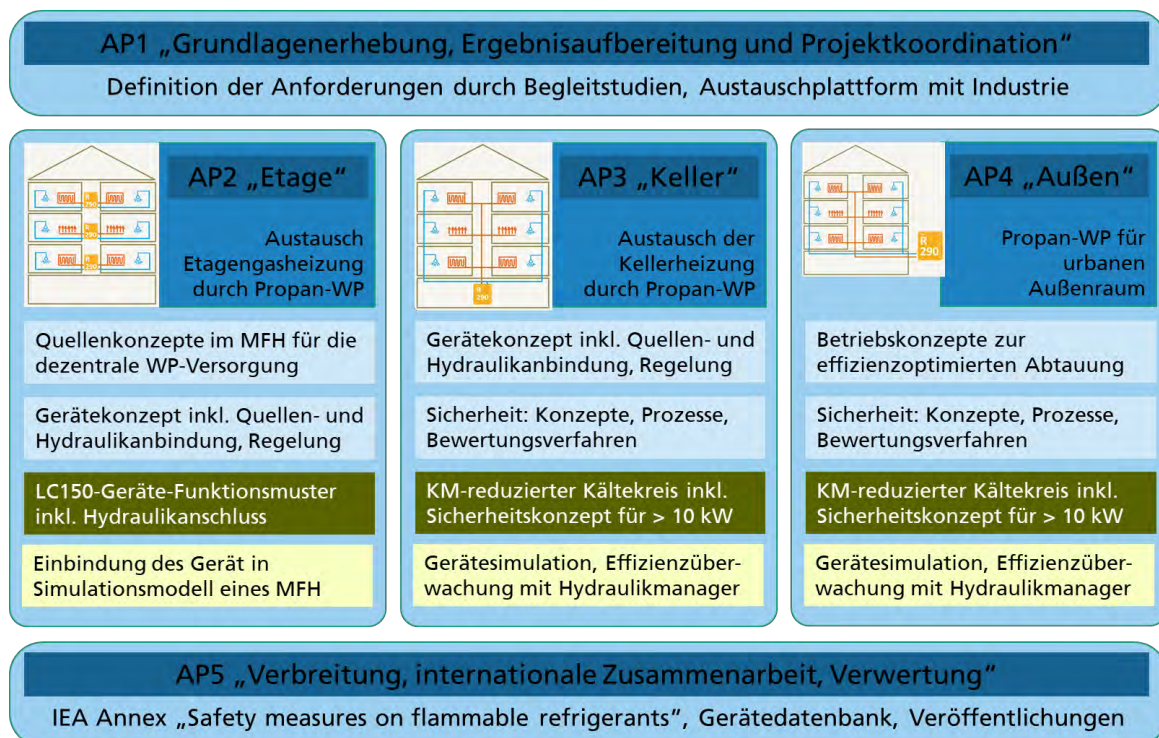


Abbildung 1: Arbeitspaketstruktur des Projekts LCR290

1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt wurde als Branchen-Plattformprojekt aufgesetzt. Dieser Ansatz erlaubt schnelles, fokussiertes Bearbeiten der F&E-Aufgaben, eine breite Teilhabe der Branche an den Ergebnissen und eine gute Präsentationsplattform für die Industrie. Die Forschungsarbeiten fanden dabei am Fraunhofer ISE unter enger fachlicher Begleitung durch 20 Industriefirmen statt.

Neben Wärmepumpenherstellern wurden auch die Wohnungswirtschaft und umsetzende Unternehmen am Beirat beteiligt. Eine Übersicht gibt die nachfolgende Liste:

ait-deutschland GmbH

Atlantic Société Française de Développement Thermique

Bosch Thermotechnik GmbH

CTA AG

Danfoss GmbH

Gemeinnützige Schönebecker Wohnungsbau-Genossenschaft e.G.

Gemeinnützige Wohnungs- und Siedlungsgesellschaft mbH Mönchengladbach

GETEC WÄRME & EFFIZIENZ GmbH

iDM Energiesysteme GmbH

Immobilien Management Essen GmbH

Kermi GmbH

KSG Hannover GmbH

ProPotsdam GmbH

SOLVIS GmbH

STIEBEL ELTRON GmbH & Co. KG

Triple Solar BV

Vaillant GmbH

Viessmann Climate Solutions SE

Weider Wärmepumpen GmbH

WOLF GmbH

Die Universität València (Universitat Politècnica de València) sowie die Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (IN-ATECH – Institut für Nachhaltige Technische Systeme) waren als Unterauftragnehmer am Projekt beteiligt.

2. Ergebnisse des Vorhabens

2.1 Referenzszenarien und Anforderungsprofile für Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern

Im Projekt LCR290 wurden mit der Wohnungswirtschaft und der Wärmepumpenindustrie Referenzszenarien und Anforderungsprofile für Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern erarbeitet. Dazu wurden zunächst Fragen zu Referenzen und Anforderungen eingesammelt. Dieser Abschnitt 2 ist so aufgebaut, dass einige dieser Fragen aufgeführt werden und anschließend eine Beantwortung oder Einordnung stattfindet.

2.1.1 Dezentrale Wärmeerzeugung, Innenaufstellung pro Wohnung

Welche Heizleistung ist für dezentrale Wärmepumpen erforderlich?

Eine Schätzung der im deutschen Mietwohnungsbestand erforderlichen Standardheizlasten, differenziert nach Wohnungsgröße, ist in Abbildung 2 dargestellt.

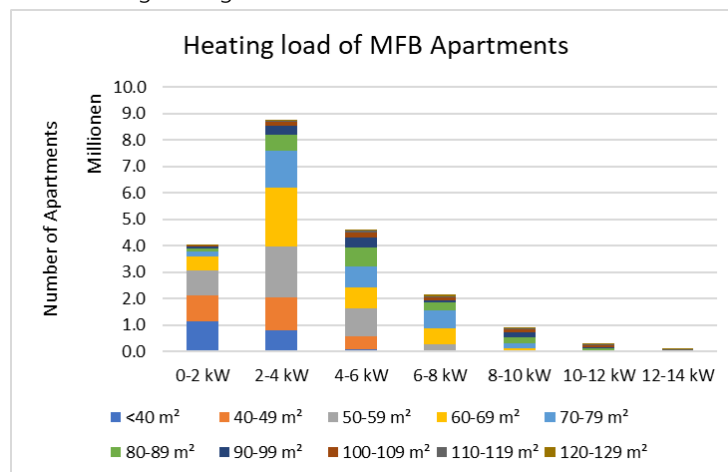


Abbildung 2: Geschätzte Häufigkeitsverteilung der im deutschen Wohnungsbestand erforderlichen Heizlasten

Zu diesem Zweck wurden der Häufigkeitsverteilung der Energieeffizienzklassen von Mehrfamilienhäusern¹ durchschnittliche flächenbezogene Heizlasten zugeordnet. Diese Häufigkeitsverteilung wurde dann flächendeckend mit dem Anteil der Wohnungen mit entsprechender Wohnfläche im Mietwohnungsbestand mit >3 Wohneinheiten in Deutschland abgeglichen. Das Ergebnis: 60 % der Wohnungen weisen Heizlasten unter 4 kW und 80 % unter 6 kW auf.

Ungenauigkeiten bei dieser Schätzung ergeben sich aus

- der pauschalen Zuordnung durchschnittlicher flächenbezogener Heizlasten zu jeder Energieeffizienzklasse
- der pauschalen Anwendung der Zuordnung von Energieeffizienzklassen auf alle Wohngebiete
- der Tatsache, dass sich die Häufigkeitsverteilung der Wohnfläche nur auf den Mietwohnungsbestand bezieht

¹ Quelle: German Energy Agency dena: Preparatory studies for the development of a long-term renovation strategy in accordance with Art. 2a of the EU Buildings Directive 2018/844 (EPBD). Ergänzung zum Abschlussbericht – 16.09.2019

Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass der Großteil des Wohnungsbestands Heizlasten im niedrigen bis mittleren einstelligen Bereich aufweist. Ein exemplarischer Vergleich mit den Heizlasten der Wohnungen in Beispielgebäuden (siehe Abbildung 72) bestätigt dies.

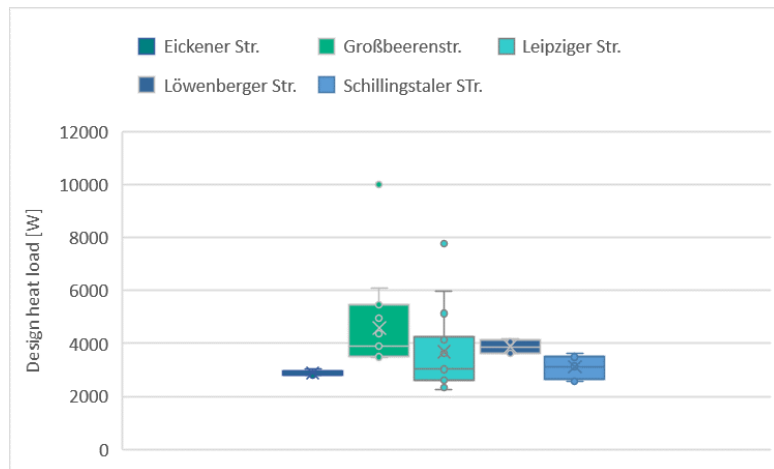


Abbildung 3: Auslegungsheizlasten der Wohnungen in Beispielgebäuden; die Gebäude in der Eickener und Leipziger Straße verfügen über gasbefeuerte Fußbodenheizungen

Für die Auslegung des nachfolgend beschriebenen Warmwasserspeichers muss die Wärmepumpe bei Anwendungen mit Badewanne eine Beladungskapazität von 2,5 kW aufweisen (Entnahmeprofil E.4 gemäß EN 15450). Ohne Badewanne (Entnahmeprofil E.3) reduziert sich die erforderliche Leistung auf weniger als 0,5 kW. Entscheidend für die erforderliche Heizleistung ist daher die Heizlast des Hauses. Ausschlaggebend für die maximal erforderliche Temperatur von 60 °C unter den angenommenen Randbedingungen (max. 55 °C Vorlauftemperatur zum Heizsystem) ist die Warmwasserbereitung.

Für die Auslegung in LCR290 wird eine maximale Heizleistung von max. 5 kW bei B0/W55 angenommen. Die Wärmepumpe muss zudem bei allen möglichen/zu erwartenden Quelltemperaturen eine Temperatur von 60 °C für die Warmwasserbereitung liefern können. Eine reduzierte Leistung ist akzeptabel.

Hinweis: Bei Luft als Quelle kann am Auslegungspunkt von -7 °C von ca. 10 % weniger Leistung ausgegangen werden; bei einer höheren Quelltemperatur steigt die Leistung.

Welcher Raum wird für die Installation einer dezentralen Wärmepumpe bevorzugt?

Es liegen keine Informationen zur Häufigkeitsverteilung von Aufstellungsorten/Aufhängungsorten für wandmontierte Heizkessel in Wohnungen vor. Typische Standorte sind Badezimmer, Küche, Flur, Abstellraum. Da die Wohnungen in der Regel bewohnt sind und nicht davon ausgegangen werden kann, dass Leerräume vorhanden sind, sollte der bisherige Aufstellungsort nach Möglichkeit beibehalten werden.

Kritische Umgebungen können auftreten in

- Badezimmer -> Spritzwasser und Feuchtigkeit; sollte kein Problem darstellen, muss aber zumindest berücksichtigt werden
- Küche -> erhöhte Anforderungen an Geometrie, Design und Geräuschentwicklung
- Flur -> erhöhte Anforderungen an die Geometrie, insbesondere die „Tiefe“ sollte hier berücksichtigt werden
- Abstellraum -> relativ viel Platz, aber reduzierte Luftwechselraten, was unter 150 g kein Problem darstellen sollte

Der vorhandene Aufstellungsort des Gaskessels sollte bevorzugt als neuer Standort der Wärmepumpe gewählt werden. Anforderungen in kritischen Umgebungen müssen möglicherweise durch leise und platzsparende Varianten erfüllt werden.

Wie groß ist der minimal und maximal verfügbare Platz für die Installation der Wärmepumpe?

Wand-Gasheizkessel haben typischerweise Abmessungen in der Größenordnung von 450 x 750 x 350 mm (BxHxT). Eine Übersicht über die Abmessungen von Geräten von 7 Herstellern für den europäischen Markt ist in Abbildung 4 zu sehen. Grundsätzlich können die Geräte Warmwasser und Heizwärme ohne zusätzlichen Speicher bereitstellen. In einigen Fällen werden sie jedoch mit einem zusätzlichen Warmwasserspeicher installiert, um den Komfort auch bei gleichzeitiger Entnahme an mehreren Stellen zu gewährleisten und die gleichzeitige Nutzung von Heizung und Warmwasser zu ermöglichen.

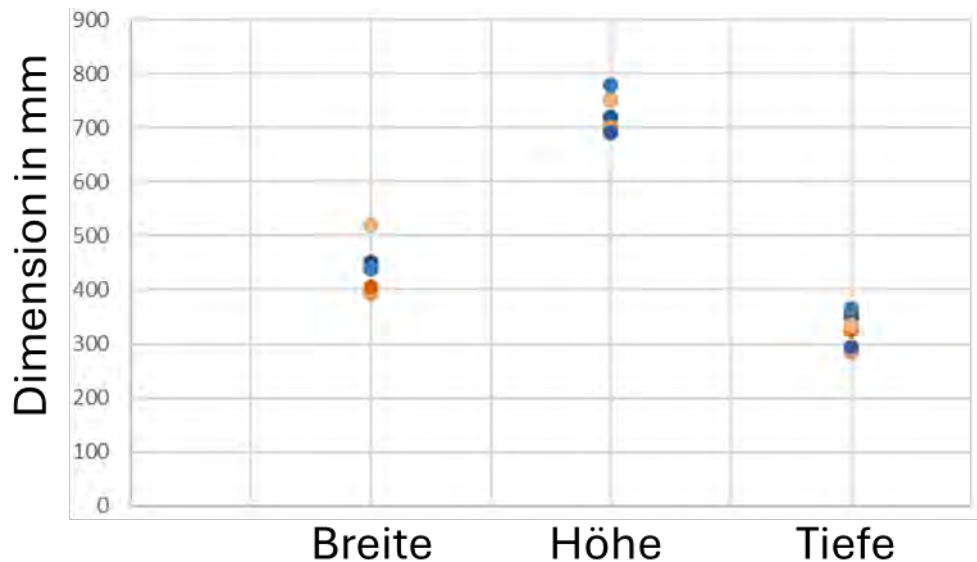


Abbildung 4: Abmessungen von 27 Wand-Gasheizkesseln von 7 Herstellern

Aus Sicht der Wohnungswirtschaft ist es wünschenswert, dass Wärmepumpenlösungen die gleichen Abmessungen wie ein Gaskessel haben. Da dies aufgrund des für Wärmepumpen erforderlichen Warmwasserspeichers eine Herausforderung darstellt, werden die in Abbildung 5 gezeigten Varianten in Betracht gezogen. Eine leichte Vergrößerung der Abmessungen ist möglich, da kein Abgaskanal erforderlich ist (mehr Höhe verfügbar).



Abbildung 5: Mögliche Ausführungsvarianten von Wärmepumpenlösungen zum Ersatz dezentraler Gaskessel

Welche Belegung sollte für eine 3-Zimmer-Wohnung mit 55 m² bei der Dimensionierung der Warmwasserversorgung angenommen werden?

In LCR290 wird für die dezentral versorgten Wohnungen in den Referenzgebäuden (56...65 m²) eine Belegung von 3 Personen angenommen.

Bei einer Auslegung für 3 Personen und Teilspeicherung gemäß EN 15450 ist ein Speicher mit einem Volumen von ca. 82 l bei einer Speichertemperatur von 60 °C erforderlich. Einschließlich der erforderlichen Dämmung entspricht dies einem Gaskessel auch ohne Wärmepumpe.

Wie hoch ist der maximale Geräuschpegel einer Haushaltswärmepumpe?

In der DIN 4109-1989 wird für schutzbedürftige Räume im eigenen Haus ein Schalldruckpegel von max. 30 dB(A) in Wohn- und Schlafzimmern und 33 dB(A) in Küchen empfohlen. Bei den oben untersuchten wandhängenden Gasheizkesseln liegt der Schalleistungspegel zwischen 27 und 47 dB(A) bei Teillast und zwischen 41 und 52 dB(A) bei Vollast. Bei Wandmontage (halbkugelförmige Schallausbreitung) kann in 1 m Entfernung ein Schalldruckpegel angenommen werden, der 8 dB(A) unter dem Schalleistungspegel liegt, d. h. zwischen 19 und 39 dB(A) bei Teillast und zwischen 33 dB(A) und 44 dB(A) bei Vollast.

Da Wohn-/Schlafzimmer in der Regel nicht als Aufstellungsorte für Wärmeerzeuger genutzt werden, wird für die Entwicklung des LCR290 ein Zielwert von 33 dB(A) für den Schalldruckpegel in 1 m Entfernung unter Nennbedingungen verwendet.

2.1.2 Zentrale Wärmeerzeugung, Innenaufstellung

Welche Heizleistung wird für zentrale Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern (Innen- oder Außenanstellung) benötigt?

Zur Abschätzung der Gebäudeheizlasten im Mehrfamilienhausbestand wurde ein ähnlicher Ansatz wie in Absatz 2.1.1, Abbildung 2 zur Ermittlung der Häufigkeitsverteilung der Heizlasten pro Wohnung gewählt. Zu diesem Zweck wurden die Häufigkeitsverteilung der Wohnungsgrößen auf Basis von Daten aus dem Gebäudebestand der Wohnungsunternehmen im Industriebeirat und die Verteilung der Effizienzklassen von Mehrfamilienhäusern (siehe Abbildung 6) kombiniert, woraus sich die Verteilung in Abbildung 7 ergab.

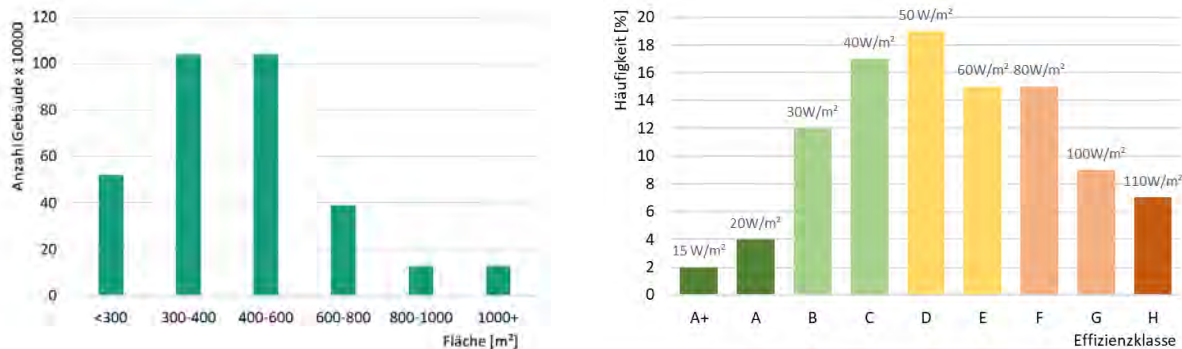


Abbildung 6: Datenbasis für eine Schätzung der Leistungsklassen für zentrale Wärmeerzeuger: die Häufigkeitsverteilung der Wohnungsgrößen auf Basis von Daten aus dem Gebäudebestand der Wohnungsunternehmen im Industriebeirat und die Verteilung der Effizienzklassen von Mehrfamilienhäusern.¹

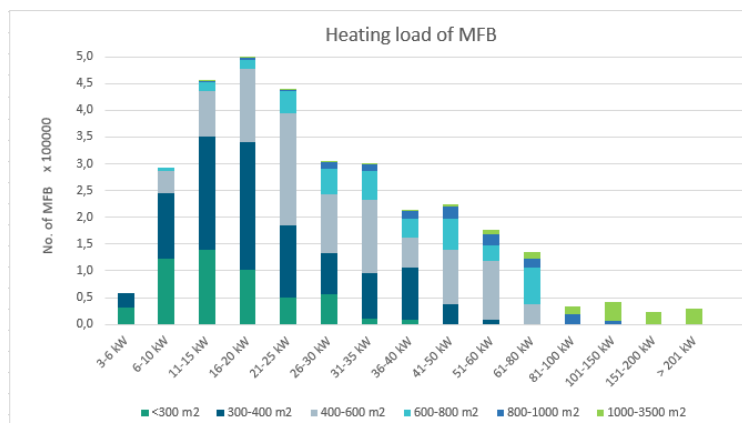


Abbildung 7: Abgeleitete Verteilung der Leistungsklassen für zentrale Nebengebäude und Anzahl der Gebäude, hochgerechnet auf ganz Deutschland.

In LCR290 wird eine Wärmepumpenleistung zwischen 30 und 35 kW am Auslegungspunkt (A-7/W55 oder B0/W55) angestrebt. Für die Warmwasserbereitung ist zudem eine Zieltemperatur von 65 °C bei reduzierter Leistung erforderlich.

Was halten Wärmepumpenhersteller von großen Kombispeichern (Heizungs-Puffer + Warmwasser) für zentrale Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern?

Die Hersteller stehen zentralen Wärmepumpenlösungen kritisch gegenüber; diese Systeme erreichen oft einen suboptimalen saisonalen Leistungsfaktor, da die Temperaturen für die Warmwasserbereitung und die Heizung nicht unabhängig voneinander festgelegt werden können oder es zu einem Austausch zwischen den Zonen im Speicher kommt. Auch die Regelung dieser Systeme hat sich in der Praxis als schwierig erwiesen.

Daher berücksichtigt LCR290 keine Kombispeicher für zentrale Wärmepumpenlösungen.

¹ Quelle: Deutsche Energie-Agentur dena: Vorstudien zur Entwicklung einer langfristigen Sanierungsstrategie gemäß Art. 2a der EU-Gebäuderichtlinie 2018/844 (EPBD). Ergänzung zum Abschlussbericht – 16.09.2019

Welches Volumen sollte für den Pufferspeicher bei Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern verwendet werden?

Das Volumen des Pufferspeichers muss so bemessen sein, dass auch bei geringer Heizlast eine Mindestlaufzeit gewährleistet ist und somit die Anzahl der Startvorgänge reduziert wird und bei Luft/Wasser- -Wärmepumpen mit Umkehrbetrieb ausreichend Energie für die Abtauung zur Verfügung steht. Wie die Antworten der Hersteller auf die vorangegangenen Fragen zeigen, werden unterschiedliche Ansätze und Philosophien verfolgt. Ziel von LCR290 ist es, Systemkonzepte aufzuzeigen, die so kompakt und dennoch so robust wie möglich sind. Aus diesem Grund werden eher knappe Abmessungen als Ausgangspunkt gewählt und im Laufe des Projekts bei Bedarf korrigiert.

Für Monoblock-Luft-Wasser-Wärmepumpen: 10 l/kW Nennleistung

Für Sole-Wärmepumpen: 25 l/kW Mindestleistung (Abtauung noch zu definieren, siehe oben)

Wie viel Fläche steht in der bisherigen Installationsraum¹ der Heizungsanlage zur Verfügung?

Bei Heizungsanlagen mit einer Nennleistung von mehr als 28 kW muss die Fläche des Aufstellungsraums mindestens 7,5 m² betragen. Wir gehen in typischen Gebäuden (siehe z.B. Abbildung 8) von einer Aufstellungsraumfläche zwischen 8 und 15 m² aus. Meistens im Keller, sehr selten unter dem Dach.

Im Referenzfall gehen wir von 10 m² aus, bei Bedarf mit zusätzlichem Aufwand auch von 15 m².

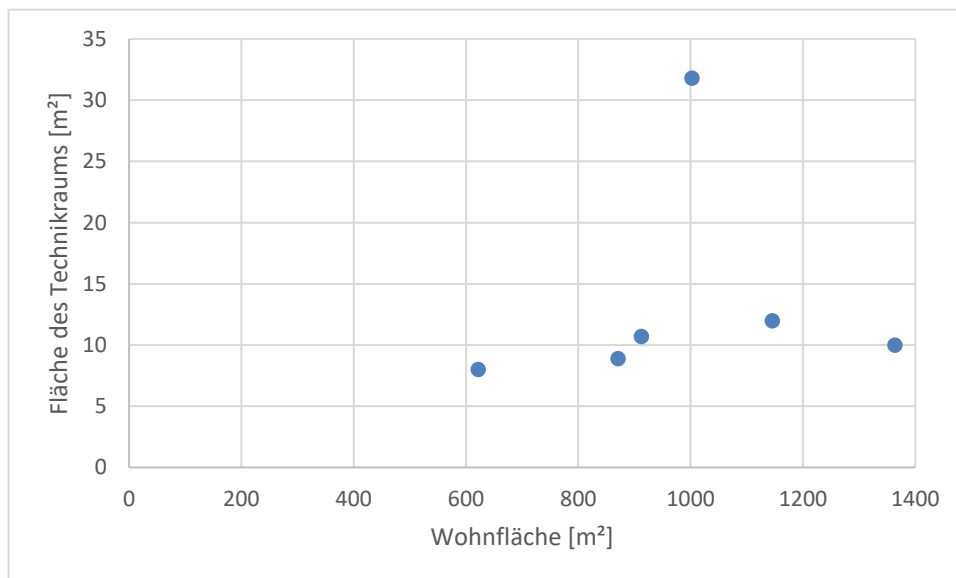


Abbildung 8: Fläche der Technikräume im Vergleich zur beheizten Wohnfläche in untersuchten Mustergebäuden.

¹ Wenn die Nennleistung einer Heizungsanlage weniger als 50 Kilowatt beträgt oder wenn sie mit flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen betrieben wird, reicht ein Aufstellungsraum anstelle eines Heizraums aus.

Was ist eine durchschnittliche/minimale Raumhöhe?

Die Raumhöhe wird in den Mustergebäuden mit ca. 2,05 – 2,50 m angegeben. Das gesetzliche Minimum für Heizungsräume beträgt 2,00 m (gilt nicht für Wärmepumpen). Auch die Dämmung der Kellerdecke muss berücksichtigt werden.

Im Referenzfall gehen wir von 2,20 m aus.

Gibt es einen Luftaustausch oder ein Kellerfenster?

Von Kellerfenstern kann nicht ausgegangen werden. Dennoch sind moderne Passivhäuser auf minimale Luftwechselraten ausgelegt. Dies kann daher als Grundlage herangezogen werden

Für Passivhäuser und KfW-40-Häuser gilt n50-Wert: < 0,6 1/h
Aus Sicht der Raumlufthygiene wird ein Mindestluftwechsel von >0,3 bis 0,5 empfohlen.

(Der sogenannte n50-Wert (Einheit: 1/h) gibt an, wie oft das Innenraumvolumen pro Stunde ausgetauscht wird).

Für Kamine in Gebäuden muss eine ausreichende Verbrennungsluftzufuhr sichergestellt sein. Zu diesem Zweck sind Öffnungen nach außen vorzusehen. Die genauen Anforderungen und Abmessungen hängen von der Nennleistung ab.

Da die Wärmepumpenlösungen als Ersatz für fossile Heizsysteme gedacht sind, gehen wir davon aus, dass entsprechende Öffnungen nach außen vorhanden sind.

2.1.3 Zentrale Wärmeherzeugung, Innenaufstellung Zentrale Wärmeherzeugung, Außen- aufstellung

Welcher Bereich steht für eine außen installierte A/W-Wärmepumpe (Monoblock) zur Verfügung?

Die Wärmepumpe sollte außerhalb des Gebäudes aufgestellt werden. In vielen Fällen stehen in Mehrfamilienhäusern folgende Standorte zur Verfügung:

- Erdgeschoss: Innenhof, Garten
- Dach
- Garagen, Parkhäuser, Tiefgaragen und Parkplätze

Ziel ist es, die Wärmepumpen im Erdgeschoss zu installieren, um die Installationskosten so gering wie möglich zu halten.

Für einen Zielbereich zwischen 20 kW und 50 kW wird eine erforderliche Aufstellfläche von weniger als 2 m² erwartet. Hinweis: In der Regel muss zusätzlicher Platz für die Installation von Sicherheitsvorrichtungen vorgesehen werden.

Gibt es Einschränkungen hinsichtlich der Höhe der Wärmepumpe?

Die Höhe der Wärmepumpe sollte für das Gerät unter 2 m gehalten werden, um

- Baugenehmigungen zu vermeiden (Einstufung als Bauwerk)
- das Risiko des Missbrauchs (z. B. Hochklettern) zu minimieren
- eine freie Sicht zu gewährleisten (für Nachbarn, für Bewohner im 1. Stock, ...)

Welche Mindest-/Worst-Case-Abstände sind im Umfeld eines Geräts bedingt durch Grundstücksgrenzen und Schallemissionen zu erwarten?

Abstände zu Grundstücksgrenzen sind in den Bundesländern nicht einheitlich geregelt. Es gibt zwar Empfehlungen oder Vorschriften für einen Abstand von 3 m zur Grundstücksgrenze. Häufiger gibt es jedoch keine ausdrückliche Vorgabe, solange die Wärmepumpe kein Bauwerk darstellt. Abbildung 9 zeigt die verschiedenen Vorschriften, kategorisiert nach Bundesländern

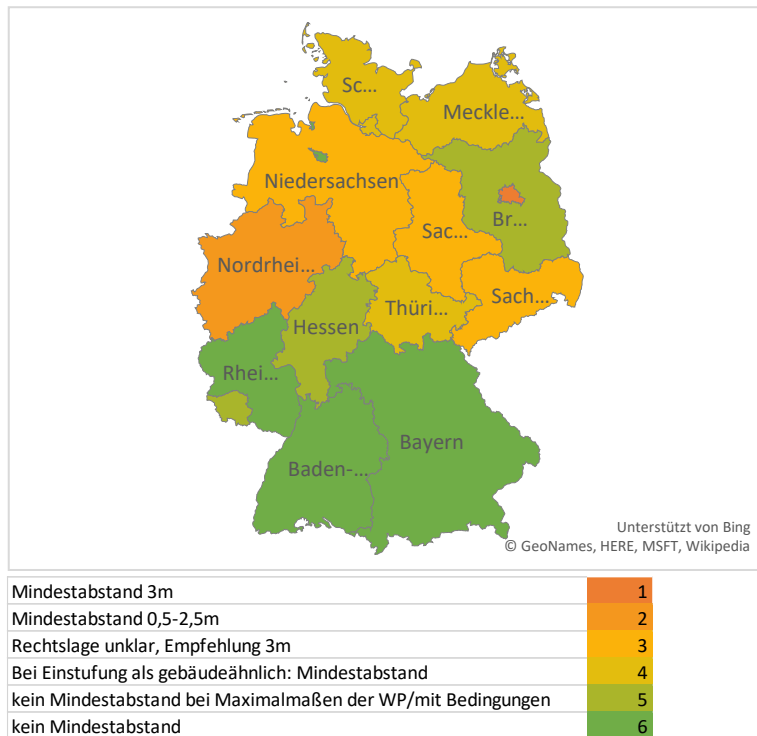


Abbildung 9: Vorschriften zu Abständen zwischen Wärmepumpen und Grundstücksgrenzen; nach Bundesländern.

Anforderungen an die Lärmemissionen führen indirekt auch zu Mindestabständen zwischen Wärmepumpen und Gebäuden. Die Abstände von Schallquellen (z. B. Wärmepumpen) zu schutzbedürftigen Räumen sind in Tabelle 2 dargestellt

Tabelle 2: Vereinfachte Darstellung der Schalleistungspegel und der daraus resultierenden Entfernungen zu schutzbedürftigen Räumen.

Schalleistungspegel des Geräts (dB)	Abstand allgemeines Wohngebiet (m)	Abstand reines Wohngebiet (m)
48	< 3,0	3
51	< 3,0	4,5
54	3,4	6,7
57	5,2	9,7
60	7,6	13,9
63	10,9	19,7

Zu den schutzbedürftigen Räumen¹ gehören beispielsweise

- Wohnzimmer (einschließlich Wohnzimmer-Dielen, Wohnküchen),
- Schlafzimmer (einschließlich Übernachtungszimmer in Beherbergungsbetrieben),
- Schlafzimmer in Krankenhäusern und Sanatorien,
- Unterrichtsräume in Schulen, Universitäten und ähnlichen Einrichtungen,
- Büroflächen,
- Übungsräume, Besprechungsräume und ähnliche Arbeitsräume.

Die Schallleistungspegel (L_W) von Wärmepumpen variieren stark. Eine Darstellung der Schallleistungspegel über den Nennleistungsbereich von Wärmepumpen findet sich unter Abbildung 10. Sie zeigt Werte von 42 dB(A) bis 67 dB(A).

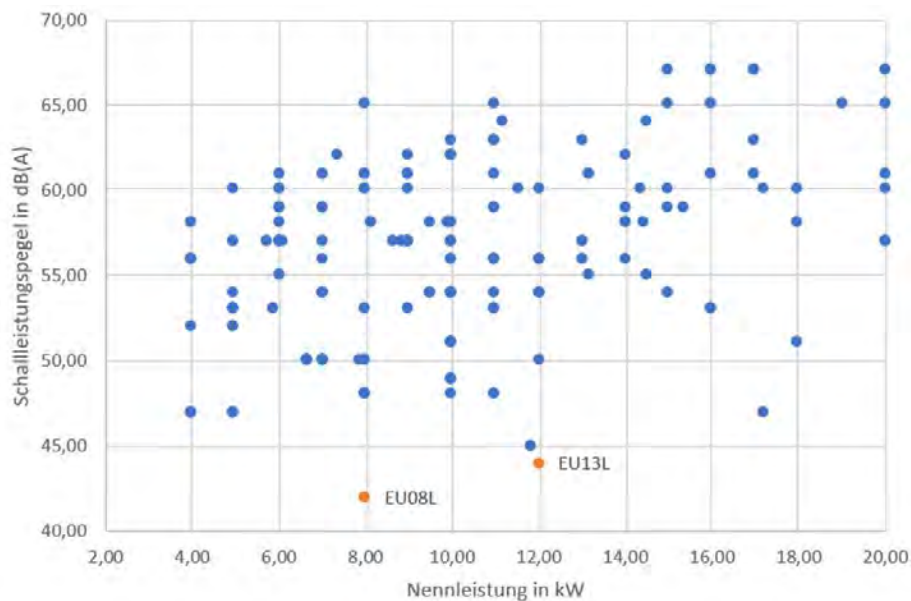


Abbildung 10: Schallleistungspegel von Wärmepumpen gemäß EN 12102 im Vergleich zur Nennheizleistung – Marktvergleich. Quelle: Lambda²

Eine geeignete Auswahl der Wärmepumpe unter Berücksichtigung der Lärmemissionen der Wärmepumpe ist erforderlich. Schallschutzhauben oder andere Maßnahmen können die erforderlichen Emissionsminderungen auf einen zulässigen Höchstwert ermöglichen.

Der Mindestabstand zwischen der Wärmepumpe und schutzbedürftigen Räumen liegt zwischen 3 m und 14 m (60 dB(A) L_W). Der Mindestabstand zu Grundstücksgrenzen ist in Deutschland nicht einheitlich geregelt. Er liegt zwischen 0 m und 3 m.

¹ <https://www.baunetzwissen.de/bauphysik/fachwissen/schallschutz/mindestschallschutz-nach-din-4109-1-2018-6444996>

² <https://lambda-wp.at/energieeffizienz/>

Welche weiteren Anforderungen gelten für den Aufstellungsort?

Innerhalb der Schutzbereiche dürfen keine Öffnungen vorhanden sein (eine kurze Übersicht über die Abstände findet sich in den „Richtlinien für die Außenaufstellung von Wärmepumpen mit brennbaren Kältemitteln“ des BWP¹ (siehe auch Abbildung 11)); es können jedoch Sichtschutzvorrichtungen (z. B. Pflanzen/Hecken) und/oder Zäune (zur Zugangsbeschränkung zum Gerät) um das Gerät herum errichtet werden. Der Zugang für Wartung, Service usw. muss gewährleistet sein, ebenso wie eine ungehinderte Zu- und Abluft. Vaillant gibt für eines seiner Produkte einen Abstand von 200 mm zur Wand vor, zum Beispiel².

Berechnungen der erforderlichen Abstände für Wärmepumpen für bestimmte Gebäude können auf der Website des Wärmepumpen-Ampel-Projekts durchgeführt werden³.

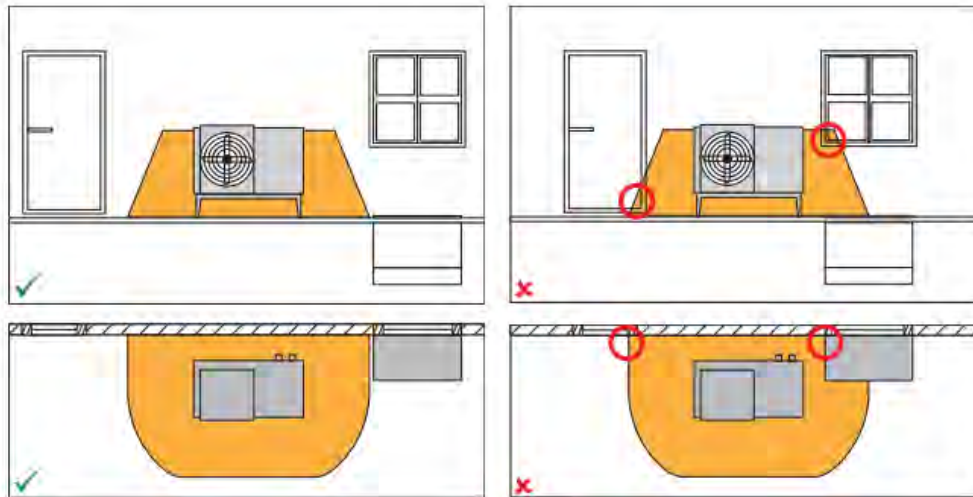


Abbildung 11: Bereich bei Installation an einer geschlossenen Wand. Quelle: BWP-Leitfaden.

Sind in der Nähe des Aufstellungsortes Vertiefungen zu erwarten?

In der Regel ist davon auszugehen, dass

- Kellertreppen,
- Absenkungen,
- Lichtschächte

in der Nähe der Aufstellungsorte zu erwarten sind. Die Aufstellungsorte müssen gemäß den Vorgaben zu Sicherheitszone und Abständen geprüft werden.

Absenkungen in der Nähe des Aufstellungsortes müssen in die Planung einbezogen werden.

¹ https://www.waermepumpe.de/fileadmin/user_upload/waermepumpe/08_Sonstige/Filedump/BWP_LF_Kaeltemittel_WEB.pdf

² <https://www.vaillant.de/downloads-1/anleitungen-1/arotherm-plus-3/0020299004-07-2547041.pdf>, Seite 21

³ <https://waermepumpen-ampel.ffe.de/projekt>

Wo sollte der Bivalenzpunkt einer außen installierten Wärmepumpe liegen?

Nachfolgend (siehe Abbildung 12) ist eine Berechnung des SCOP für eine Luft-Wasser-Wärmepumpe (feste Geometrie) in einer Außenaufstellung auf Basis von Simulationen dargestellt. Diese wird für verschiedene Heizleistungen (bei -10 °C) berechnet.

Bei einer Heizleistung von 55 kW wird ein SCOP von 3,48 erreicht. Hier werden 15 kW rein elektrisch und 40 kW über die Wärmepumpe bereitgestellt. Der Bivalenzpunkt liegt bei -5 °C

Bei einer erforderlichen Heizleistung von 40 kW erreicht dieselbe Wärmepumpe einen SCOP von 3,64 ohne zusätzliche elektrische Heizung. Der Bivalenzpunkt liegt bei -10 °C.

Bei einer erforderlichen Heizleistung von 25 kW erreicht dieselbe Wärmepumpe ohne zusätzliche Elektroheizung einen SCOP von 3,75 (Maximalwert der Simulation). Der Bivalenzpunkt liegt unter -10 °C.

Die SCOP-Werte und Heizleistungen sind in Abbildung 13 zusammengefasst.

Die Simulation zeigt, dass die Wahl eines Bivalenzpunktes (und damit der Heizleistung) zwischen -5 °C und -10 °C einen relevanten Einfluss auf die SCOP-Werte hat.

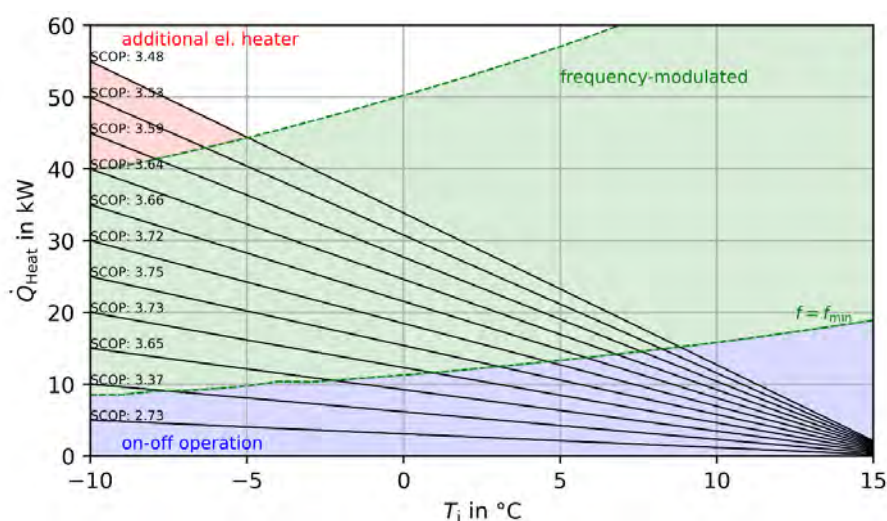


Abbildung 12: Beispielberechnung des SCOP für eine Luft-Wasser-Wärmepumpe unter Verwendung der IMST-ART-Software bei unterschiedlichen Anforderungen an die Bereitstellung der Heizleistung (von 5 kW bis 55 kW). Vereisungs- und Abtaubetrieb nicht berücksichtigt.

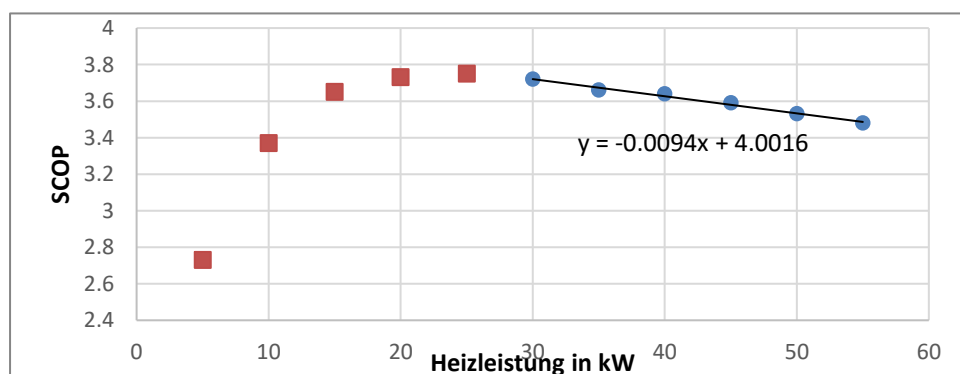


Abbildung 13: SCOP und Heizleistung für die Luft-Wasser-Wärmepumpe aus Abbildung 12 im Vergleich. Rot: steigender SCOP bei steigender Heizleistung. Blau: fallender SCOP bei steigender Heizleistung. Schwarz: Trendkurve für die Heizleistung bei fallendem SCOP. Bei einer Erhöhung der Heizleistung um 10 kW sinkt der SCOP um ca. 0,1 Punkte.

2.2 Wärmepumpen-Baumuster: Konstruktion und Vermessung

Im Rahmen des LCR290 Projektes sind mehrere Wärmepumpendemonstratoren, entwickelt, gebaut und vermessen worden.

2.2.1 Anforderung Definition an alle Demonstratoren

Auf Basis der gezeigten Rahmenbedingungen, dem Projektantrag und in Abstimmung mit dem Industriebeirat wurden für die drei Anwendungsfelder in den folgende drei Tabellen (Tabelle 3, Tabelle 4, Tabelle 5) die zentralen Key Performance Indicators (KPIs) festgelegt.

Tabelle 3 Dezentral (AP2 – Etagen-Wärmepumpe)

Parameter	Zielwert
Thermische Heizleistung	3 – 6 kW
Max. Vorlauftemperatur Heizung	55 °C
Max. Vorlauftemperatur BWW	65 °C
Max. Kältemittelfüllmenge R290	≤ 150 g
geplanter SCOP55	~3,4 (Bivalenz bei –10 °C)
Elektrischer Anschluss	16 A / 230 V (B16-Sicherung)
Geräteabmessungen	Vergleichbar Gastherme (~450×750×350 mm)

Tabelle 4 Zentral Innen (AP3 – Kellerlösung)

Parameter	Zielwert
Thermische Nennheizleistung	~30 kW bei A-10/W55
Max. Vorlauftemperatur	55 °C (Heizung) / 65 °C (BWW)
Kältemittelfüllmenge R290	<1000 g (angestrebt ≤ 700 g)
geplanter SCOP55	~3,4 (Bivalenz bei –10 °C)

Tabelle 5 Zentral Außen (AP4 – Außenaufgestellte LW-Wärmepumpe)

Parameter	Zielwert
Thermische Nennheizleistung	~30 kW bei A-10/W55
Max. Vorlauftemperatur	55 °C
Gesamtfüllmenge R290	< 2 kg (angestrebt ≤ 1,5 kg)
geplanter SCOP55	~3,4 (Bivalenz bei –10 °C)
Verdampfer-Rohrdurchmesser	5 mm Rundrohr (Reduktionsziel)

2.2.2 Komponentenauswahl und Demonstratoren Entwicklung

Die Komponentenauswahl für die Demonstratoren erfolgte auf Basis der umfangreichen Datenbasis aus dem Vorgängerprojekt LC150, einer umfangreichen Marktrecherche und einer anonymen Abstimmung unter Beteiligung aller Unternehmen des Industriebeirats. Zu diesem Zweck wurden einfache vergleichbare Simulationsszenarien aufgesetzt, welche die Performance aller angefragten Komponenten abbilden können. Ein Beispiel-Output dieser Simulationen ist in Tabelle 6 zusehen. Auf Basis dieser Informationen wurden die sechs Demonstratoren definiert. Die final ausgewählten Komponenten sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6 Liste aller Komponenten verwendet in den Demonstratoren

Komponente	Kältekreis	Typ
Kompressor 1	AP2 – RC1	Rollkolbenverdichter
Kompressor 2	AP2 – RC3	k.A.
Kompressor 3	AP3 – Variante 1	Rollkolbenverdichter
Kompressor 4	AP3 – Variante 2	Rollkolbenverdichter
Kompressor 5	AP4 – Variante 1 & 2	Rollkolbenverdichter
Verdampfer 1	AP2 – RC1	Stahl-Plattenwärmeübertrager asymmetrisch
Verdampfer 2	AP2 – RC3	Stahl-Plattenwärmeübertrager asymmetrisch
Verdampfer 3	AP3 – Variante 1 & 2	Stahl-Plattenwärmeübertrager asymmetrisch
Verdampfer 4	AP4 – Variante 1	Rundrohrlamellen-Wärmeübertrager 7 mm
Verdampfer 5	AP4 – Variante 2	Rundrohrlamellen-Wärmeübertrager 5 mm
Kondensator 1	AP2 – RC1	Stahl-Plattenwärmeübertrager symmetrisch
Kondensator 2	AP2 – RC3	Stahl-Plattenwärmeübertrager asymmetrisch
Kondensator 3	AP3 – Variante 1 & 2	Stahl-Plattenwärmeübertrager asymmetrisch
Kondensator 4	AP4 – Variante 1 & 2	Stahl-Plattenwärmeübertrager symmetrisch

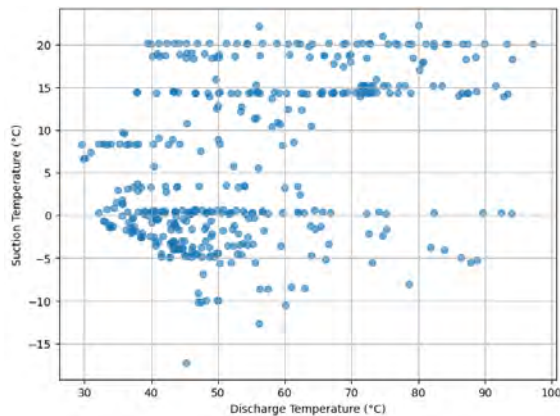
2.2.3 Messung des Kältekreislaufs – thermische Leistung

Die Messdaten der getesteten Kältekreisläufe geben Aufschluss über die Leistung einzelner Komponenten und der gesamten Kältekreisläufe. Die folgende Analyse präsentiert beispielhaft wichtige Ergebnisse zur Leistung von Kompressor, Verdampfer, Verflüssiger und des gesamten Kreislaufs auf der Grundlage der gesammelten Daten für die jeweiligen Kategorien an Demonstratoren.

2.2.3.1 Dezentrale Lösung

Zur Beschreibung der Kompressorleistung zeigt Abbildung 14 (A) die Beziehungen zwischen Ansaug- und Auslasstemperaturen. Ein breiter Bereich an Auslasstemperaturen spiegelt die unterschiedlichen Testbedingungen wider. Die relativ stabile Ansaugtemperatur über alle getesteten Bedingungen hinweg bestätigt einen stabilen und gut geregelten Verdampferbetrieb. Andererseits bestätigt Abbildung 10 (B), dass ein höheres Druckverhältnis erforderlich ist, um eine höhere Auslasstemperatur zu erreichen, was zu einer höheren Kompressionsarbeit und einem geringeren Wirkungsgrad führt.

(A)



(B)

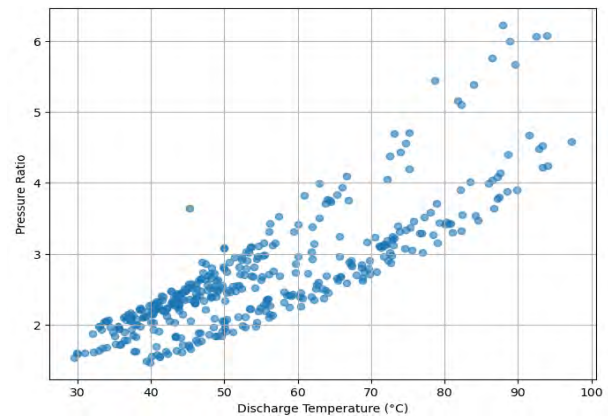
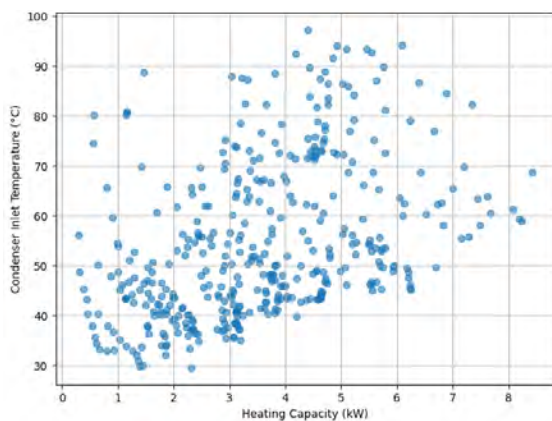


Abbildung 14: Leistung des AP2-Kompressors. (A) Ansaugtemperatur vs. Auslasstemperatur. (B) Druckverhältnis vs. Auslasstemperatur.

Die Leistung des Wärmetauschers wird anhand der Einlasstemperaturen und der übertragenen Wärme beschrieben. Wie in Abbildung 15 (A) das T-Q-Diagramm des Kondensators zeigt, nimmt die Heizleistung mit steigenden Kondensatoreinlasstemperaturen zu. Das T-Q-Diagramm des Verdampfers in Abbildung 15 (B) zeigt, dass die Kühlleistung mit sinkender Verdampfer-Einlasstemperatur zunimmt, was dem erwarteten Wärmeübertragungsverhalten entspricht. Die Streuung der Daten bei niedrigeren Temperaturen deutet jedoch auf Schwankungen im Kältemittelstrom hin, insbesondere im Teillastbetrieb.

(A)



(B)

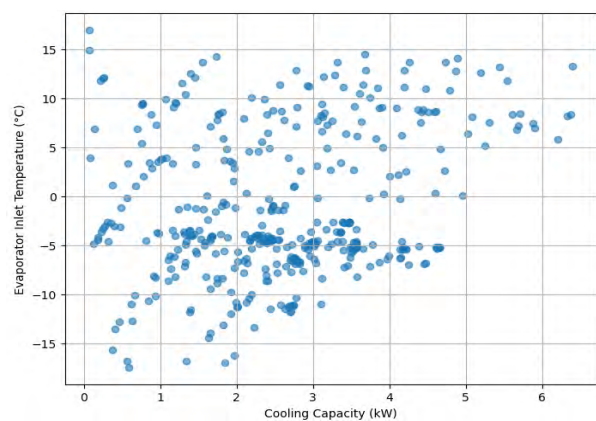
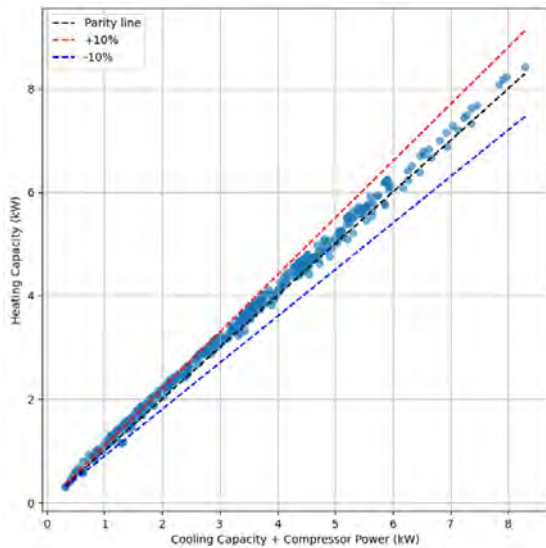


Abbildung 15: Leistung der AP2-Wärmetauscher. (A) Kondensatoreintrittstemperatur im Vergleich zur Heizleistung (B) Verdampfer-Eintrittstemperatur im Vergleich zur Heizleistung.

Die Gesamtleistung des Kreislaufs, dargestellt in Abbildung 16, wird anhand der Energiebilanz und der COP-Trends bewertet. Das Energiebilanzdiagramm zeigt, dass die gemessene Heizleistung gut mit der Eingangsenergie (d. h. Kühlleistung plus Kompressorleistung) übereinstimmt, wobei die Datenpunkte eng der Paritätslinie folgen. Geringe Abweichungen deuten auf geringfügige, nicht berücksichtigte Wärmeverluste oder Effekte der Zusatzheizung hin. Das Diagramm „Heizleistung vs. COP“ weist eine hohe Streuung auf, was Schwankungen im Wirkungsgrad unter verschiedenen Testbedingungen widerspiegelt. Der allgemeine Trend zeigt einen Rückgang des COP bei höheren Leistungen aufgrund des erhöhten Stromverbrauchs des Kompressors und thermischer Verluste.

(A)



(B)

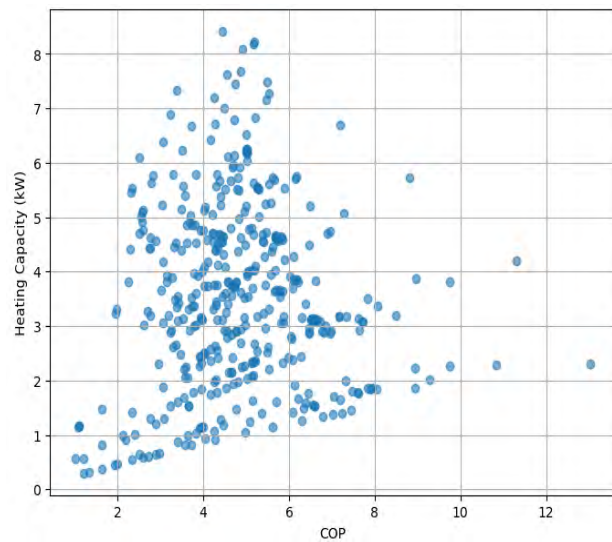
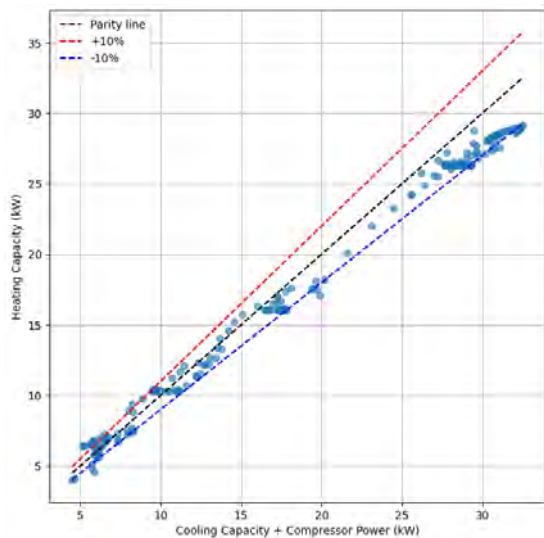


Abbildung 16: Thermische Leistung von AP2 (A) Energiebilanz (B) Heizleistung vs. COP.

2.2.3.2 Zentraler Demonstrator Variante 1

Zur Bewertung der Validität der Messungen wird die Gesamtzyklusleistung, dargestellt in Abbildung 17, anhand einer Energiebilanz und der COP-Veränderungen in Abhängigkeit von der Heizleistung bewertet. Das Energiebilanz-Paritätsdiagramm (A) zeigt, dass die gemessene Heizleistung gut mit der erwarteten Eingangsenergie übereinstimmt. Die bei höheren Lasten beobachteten Abweichungen lassen sich möglicherweise auf Wechselrichterverluste zurückführen, die dem System zusätzliche Energie zuführen, die nicht für die Heizseite genutzt werden kann. Die COP-Analyse (B) zeigt einen Rückgang bei höheren Leistungen, was aufgrund erhöhter Wärmeverluste und eines höheren Stromverbrauchs des Kompressors zu erwarten ist.

(A)



(B)

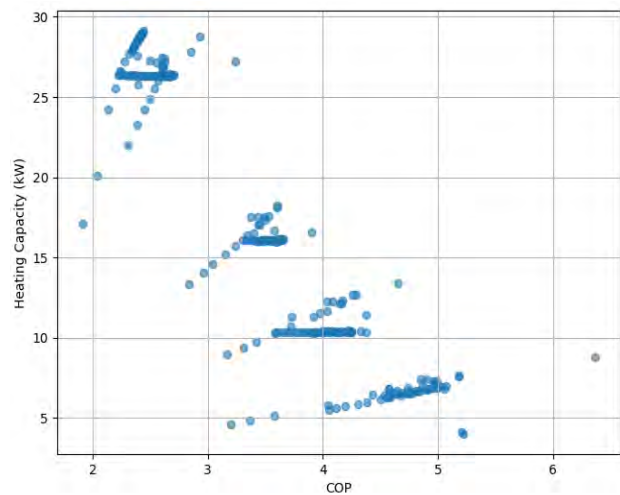
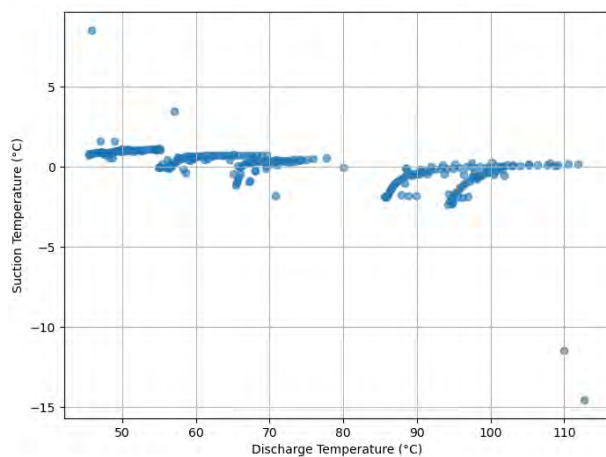


Abbildung 17: AP3-Wärmeleistung (A) Energiebilanz (B) Heizleistung vs. COP.

Wie bei dem dezentralen System wird die Kompressorleistung wie in Abbildung 18 dargestellt durch die Beziehungen zwischen Ansaug- und Auslasstemperaturen beschrieben. Es wurde ein breiter Bereich von Auslasstemperaturen getestet, wobei die Ansaugtemperatur meist bei etwa 0 °C gehalten wurde. Das Druckverhältnis zeigt ebenfalls einen ähnlichen Trend wie bei AP2.

(A)



(B)

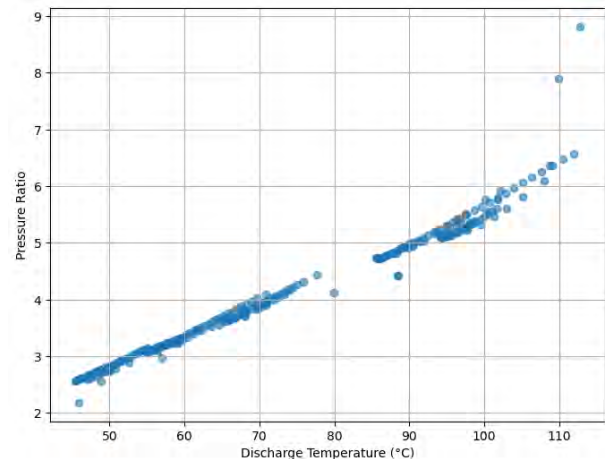


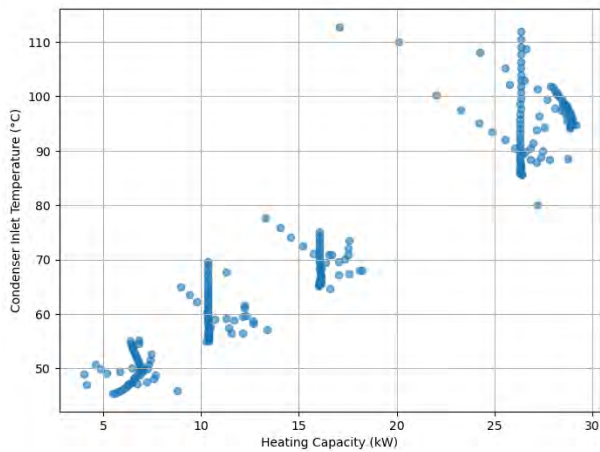
Abbildung 18: AP3-Kompressorleistung.

(A) Ansaugtemperatur vs. Austrittstemperatur. (B) Druckverhältnis vs. Austrittstemperatur.

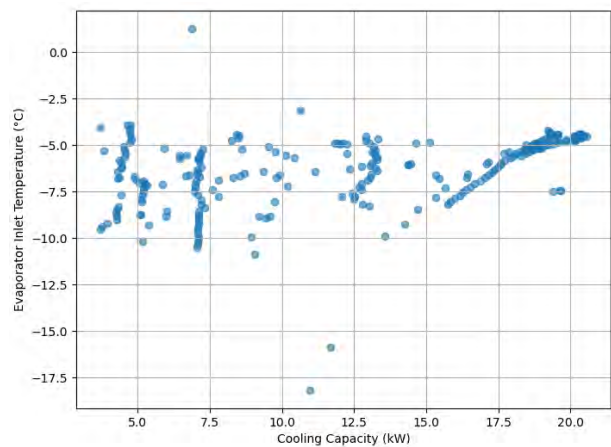
Die Leistung der Wärmetauscher wird wie in Abbildung 19 dargestellt anhand der Einlasstemperaturen, der übertragenen Wärme und des Druckabfalls bewertet. Das T-Q-Diagramm des Kondensators (A) zeigt, dass die Heizleistung mit steigenden Kondensatoreinlasstemperaturen zunimmt, entsprechend den Anforderungen für SCOP-Messungen. In ähnlicher Weise zeigt das T-Q-Diagramm des Verdampfers (B), dass die Kühlleistung mit sinkender Verdampfer-Eintrittstemperatur zunimmt. Die Streuung der Daten bei niedrigeren Temperaturen deutet jedoch auf mögliche Schwankungen im Kältemittelstrom hin, insbesondere unter Teillastbedingungen.

Der Druckabfall über den Kondensator (Abbildung 19 C) steigt mit der Heizleistung an, was einen höheren Strömungswiderstand bei steigender thermischer Last widerspiegelt und die Notwendigkeit einer sorgfältigen Steuerung der Druckverluste auf der Kältemittelseite unterstreicht. Ebenso steigt der Druckabfall im Verdampfer (Abbildung 19 D) mit der Kühlleistung an, was den Einfluss des Strömungswiderstands bei höheren Lasten verdeutlicht. Der steile Anstieg des Druckabfalls bei höheren Leistungen deutet darauf hin, dass eine Optimierung der Kältemittelverteilung und des Druckabfallmanagements die Gesamteffizienz des Systems weiter verbessern könnte.

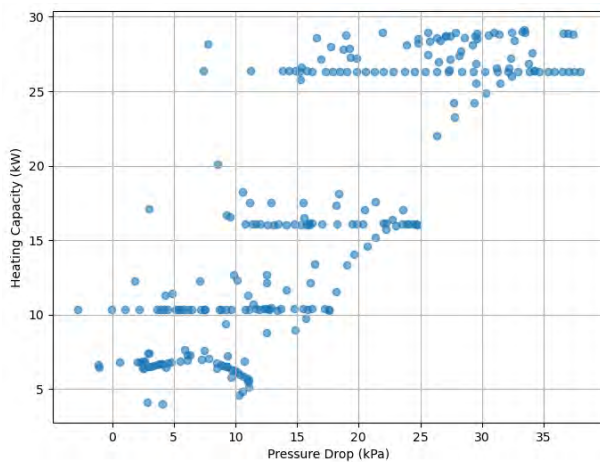
(A)



(B)



(C)



(D)

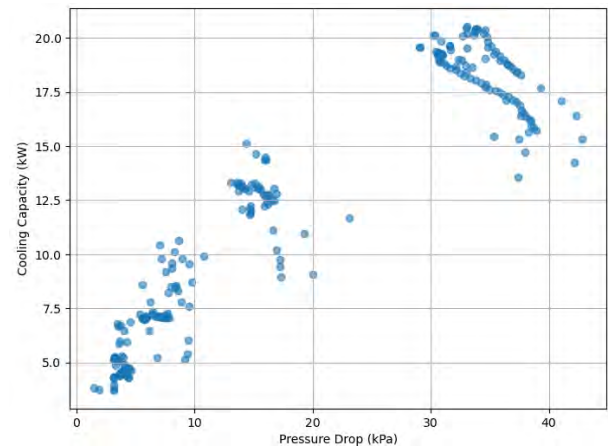


Abbildung 19: Leistung der AP3-Wärmetauscher.

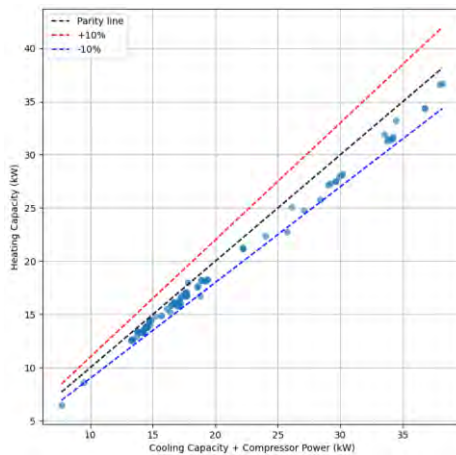
(A) Kondensatoreintrittstemperatur vs. Heizleistung (B) Verdampfer-Eintrittstemperatur vs. Kühlleistung

(C) Heizleistung vs. Druckabfall im Kondensator (D) Kühlleistung vs. Druckabfall im Verdampfer

2.2.3.3 Zentral außenaufgestellter Kühlkreislauf

Die Gesamtzyklusleistung, dargestellt in Abbildung 20, wird anhand einer Energiebilanz und der COP-Schwankungen in Abhängigkeit von der Heizleistung bewertet. Das Energiebilanz-Paritätsdiagramm (Abbildung 20 A) zeigt, dass die gemessene Heizleistung gut mit der erwarteten Eingangsenergie übereinstimmt, wobei Abweichungen bei höheren Lasten möglicherweise darauf zurückzuführen sind, dass Wechselrichterverluste zusätzliche Energie in das System einbringen, die nicht für die Heizseite genutzt werden konnte. Die COP-Analyse (Abbildung 20 B) zeigt einen Rückgang bei höheren Leistungen, was aufgrund erhöhter Wärmeverluste und eines höheren Stromverbrauchs des Kompressors zu erwarten ist. Die Ventilatorleistung ist nicht in der Energiebilanz enthalten, da es sich um einen Saugventilator handelt, der die dem System zugeführte Energie nicht direkt beeinflusst.

(A)



(B)

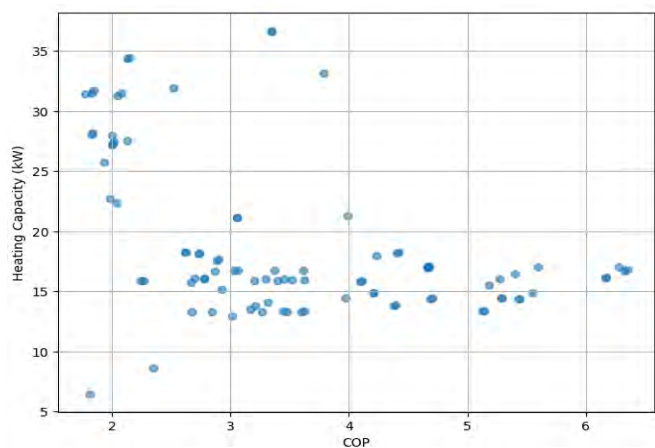
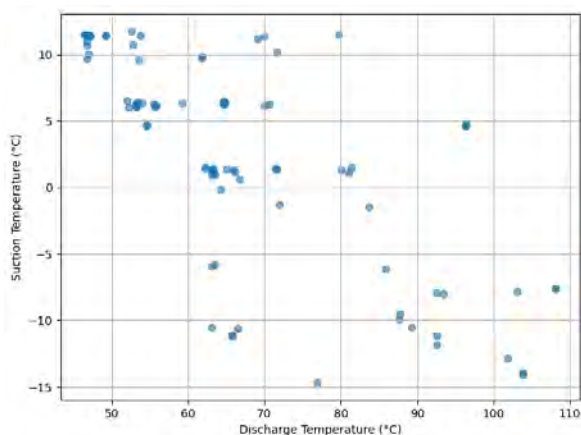


Abbildung 20: Thermische Leistung des AP4 (A) Energiebilanz und (B) Heizleistung vs. COP.

Gleiche Analysen wie zu den dezentralen und zentralen innen aufgestellten Demonstratoren wurden für AP4 durchgeführt- Abbildung 21 zeigt den Bereich der Testbedingungen (A) und bestätigt den Trend des Druckverhältnisses im Kompressor (B).

(A)



(B)

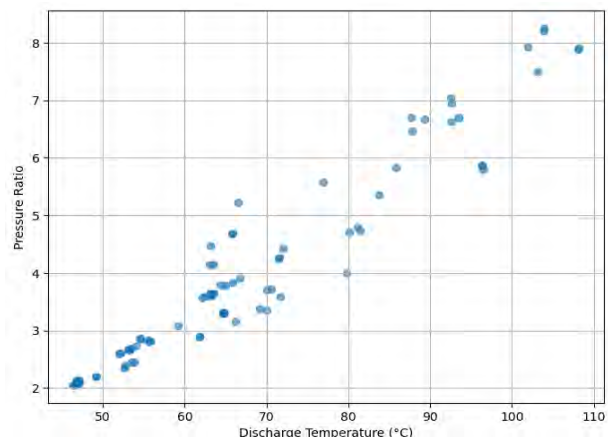
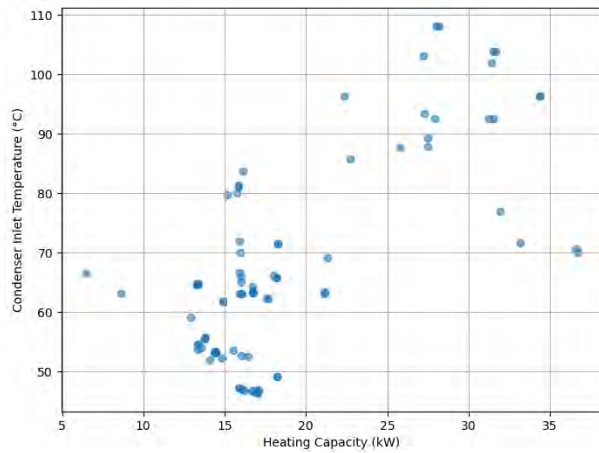


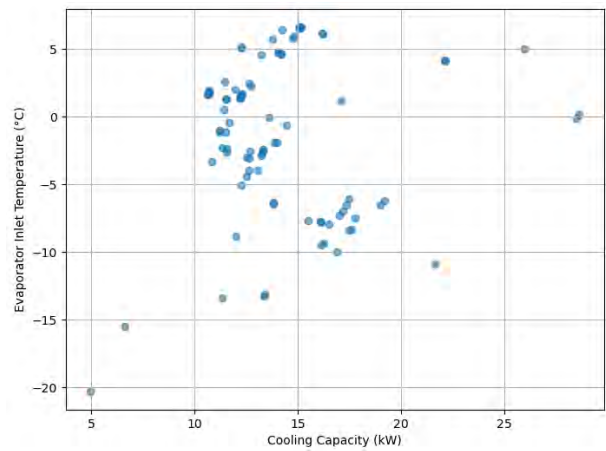
Abbildung 21: AP4-Kompressorleistung. (A) Saugtemperatur vs. Auslasstemperatur. (B) Druckverhältnis vs. Auslasstemperatur

Bei den Wärmetauschern wurde ein ähnlicher Ansatz wie bei AP2 und AP3 verfolgt. Dies ist in Abbildung 22 dargestellt.

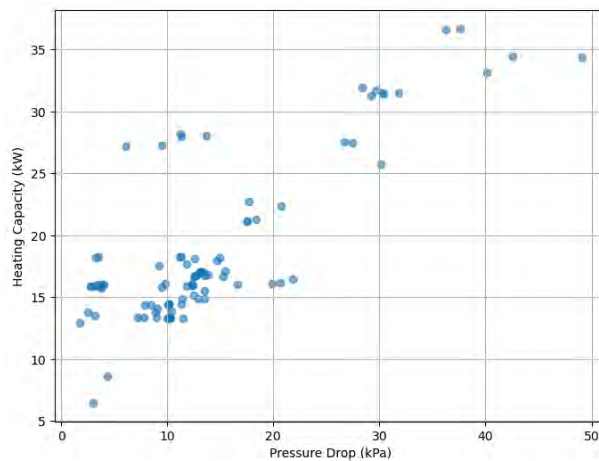
(A)



(B)



(C)



(D)

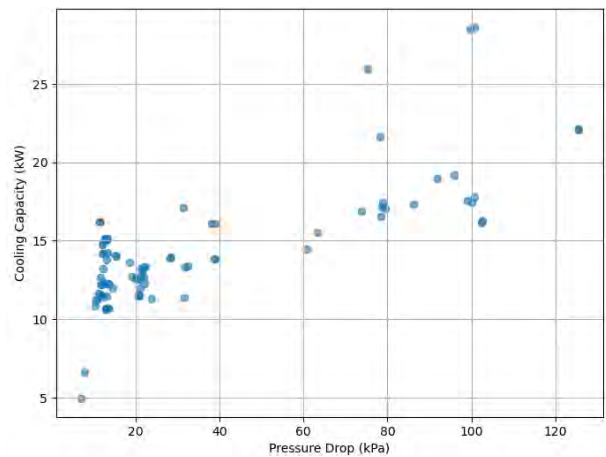


Abbildung 22: Leistung der AP4-Wärmetauscher.

(A) Kondensatoreintrittstemperatur vs. Heizleistung (B) Verdampfer-Eintrittstemperatur vs. Kühlleistung

(C) Heizleistung im Kondensator vs. Druckabfall im Kondensator (D) Kühlleistung im Verdampfer vs. Druckabfall im Verdampfer

Eine Heizleistung von bis zu 37 kW konnte erreicht werden ohne den Kompressor mit voller Drehzahl zu betreiben.

2.2.3.4 Performance der Demonstratoren

Zusammenfassend zeigt Tabelle 7 die Effizienz, benötigte Füllmenge und maximale Heizleistung der Demonstratoren in ihren drei Kategorien.

Tabelle 7 Übersicht Leistung der Demonstratoren

Demonstrator	SCOP	Füllmenge	Heizleistung @B0/W55
RC1	3,8 (SCOP55)	150 g	4,9 kW
RC3	4,4 (SCOP35)	110 g	6,0 kW
Zentral innen Variante 1	3,7 (SCOP55)	760 g	31,0 kW
Zentral innen Variante 2	4,1 (SCOP55)	620 g	28,0 kW
Zentral außen Variante 1	3,6 (SCOP55)	2000 g	30,0 kW

2.2.4 Simulation von Kältekreisläufen und Komponenten

Zusätzlich wurden alle Kältekreise simulativ abgebildet, um Rückschlüsse auf mögliche Unstimmigkeiten und neue Verbesserungsansätze für die Simulationssoftware schließen zu können.

2.2.4.1 Simulationsmodell

Für die Simulation des Kältekreislaufs wird die Software IMST-ART1 verwendet. Jede Komponente wird einzeln modelliert und zu einem Kältekreislauf zusammengefasst.

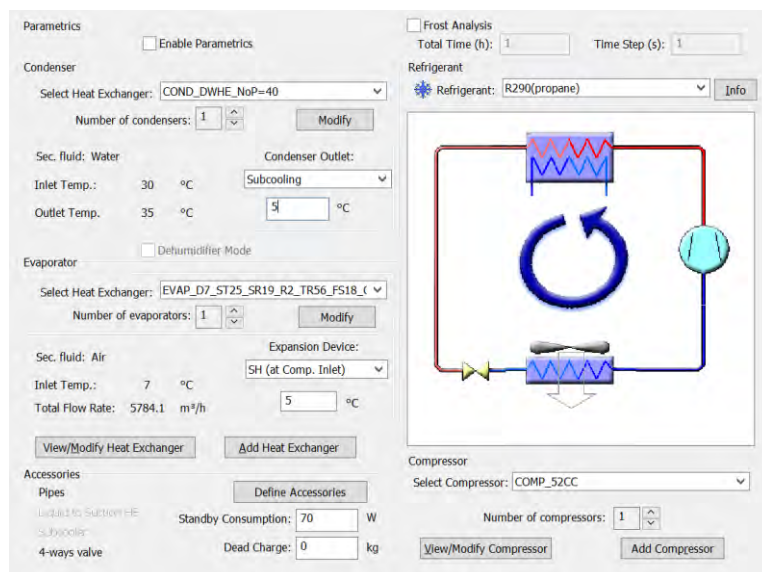


Abbildung 23: Benutzeroberfläche des IMST-ART-Simulationstools für ein Beispiel einer Luft-Wasser-Wärmepumpe.

¹ https://www.imst-art.com/?page_id=67

2.2.4.2 Vergleich von Simulation und Messung

Für diesen Vergleich wurden Datenblattangaben verwendet, um die Komponenten in der Simulationssoftware IMST-ART zu generieren. Die Leistung der Komponenten kann daher in der Simulation von den Messwerten abweichen.

2.2.4.2.1 Dezentraler Kältekreis

Für den dezentralen Kältekreislauf wurden die Datenblattwerte für die beiden Wärmeübertrager direkt verwendet. Ein Vergleich der Datenblattwerte, an einzelnen Betriebspunkten, mit den Messungen zeigte jedoch, dass der im Datenblatt angegebene Massenstrom des Kompressors nicht mit den Messdaten übereinstimmt. Dies wurde an den Hersteller kommuniziert und das Massenstrommodell wurde anhand der Messdaten validiert. Die folgende Analyse verwendet den durch die Messungen validierten Massenstrom des Kompressors und zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen der Simulation und den Messungen auch außerhalb der 5 Validierungsbetriebszustände.

Abbildung 24 zeigt, dass die Temperaturen auf der Kompressorseite, einschließlich der Einlass- und Auslassbedingungen, sowie die elektrische Leistungsaufnahme des Kompressors und die Heizleistung eine gute Übereinstimmung zwischen Messungen und Simulationen aufweisen.

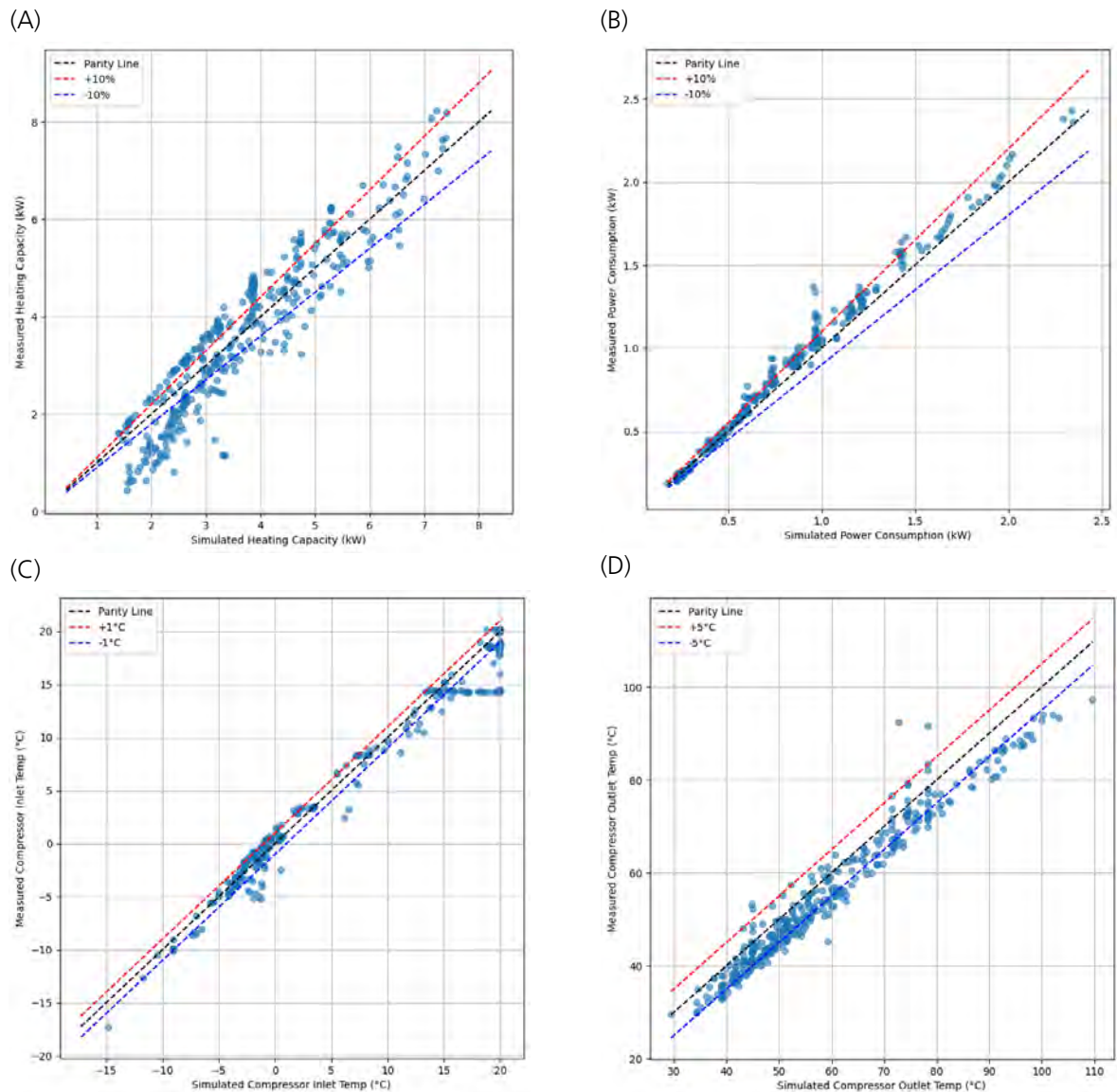
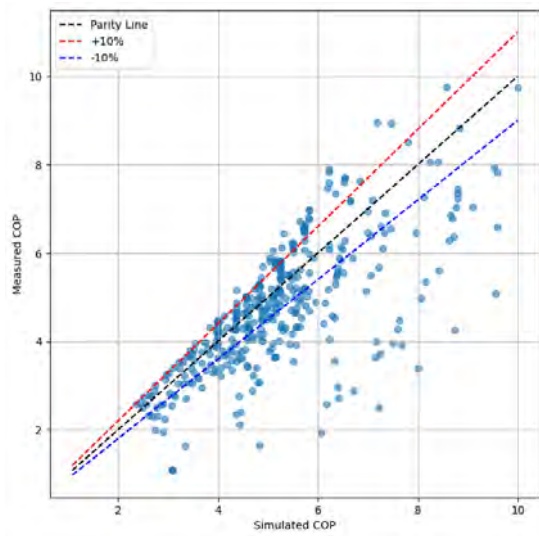


Abbildung 24: Simulation und Messung des AP2-Kältemittelkreislaufs: (A) Heizleistung (kW), (B) elektrische Leistung (kW), (C) Saugtemperatur und (D) Druckseite (°C)

Abbildung 25 gibt einen Überblick über das allgemeine Verhalten hinsichtlich COP und Kältemittelfüllmenge des AP2-Kältemittelkreislaufs. Der COP liegt für die meisten Punkte innerhalb des akzeptablen Unsicherheitsbereichs. Die Kältemittelfüllmenge wird durch die Simulation unterschätzt. Dies ist hauptsächlich auf die Verwendung der Standard-Öllöslichkeit in der Simulation zurückzuführen; die Verwendung der spezifischen Korrelation der Öllöslichkeit dürfte zu noch besseren Ergebnissen führen. Totvolumina in den Komponenten, die in der Simulation nicht berücksichtigt werden, könnten ein weiterer Grund für die Abweichung sein. Die Simulation hat zudem an Punkten mit sowohl niedrigen Kompressordrehzahlen als auch hohen Füllmengen (d. h. >200 g) Ungenauigkeiten, wie in Abbildung 25B zu sehen ist. Diese Ungenauigkeiten werden auf die starke Unterkühlung und somit veränderten fluiddynamischen Zustände im Kondensator zurückgeführt. Weder die Wärmeübertrager Modelle, noch das Reale Produkt sind für Unterkühlungen >5K ausgelegt, was zu erheblichen Unsicherheiten und Anomalien führt.

(A)



(B)

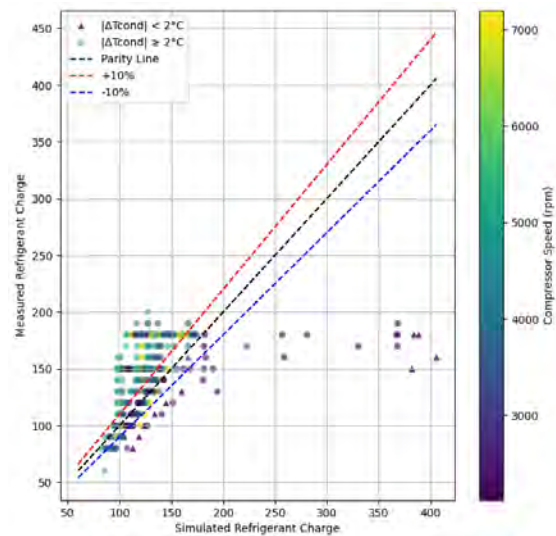
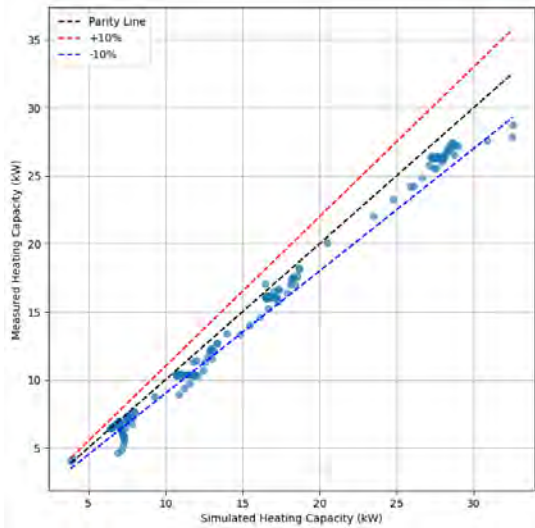


Abbildung 25: Vergleich von Simulation und Messung des AP2-Kältemittelkreislaufs:
(A) COP (B) Kältemittelfüllmenge.

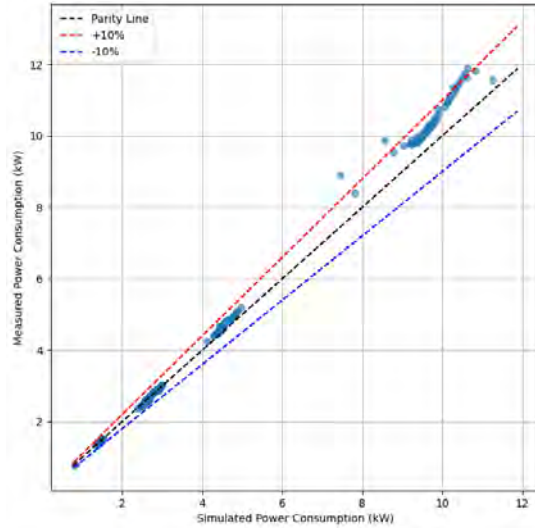
2.2.4.2.2 Zentral innen aufgestellter Kältekreislauf

Die folgende Abbildung 26 zeigt ein Beispiel dafür, wie Simulation und Messung übereinstimmen. Die Heizleistung stimmt gut überein. Die simulierte Heizleistung ist etwas höher als die Messwerte. Die in den Kondensator eingespeiste Temperatur (entspricht der Auslasstemperatur des Kompressors) ist wahrscheinlich nicht die Ursache für die geringfügige Abweichung. Die Abweichung zwischen Messung und Simulation der Auslasstemperatur liegt unter 10 % (Abbildung 26 D), und die gemessene Temperatur ist teilweise höher als die simulierte Temperatur, sodass für die Messung eine höhere Heizleistung zu erwarten wäre.

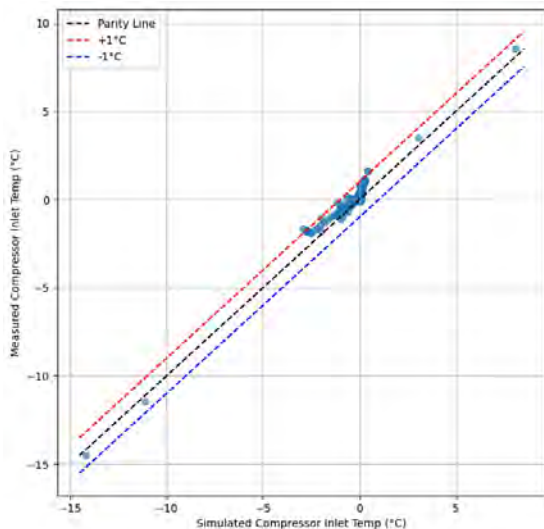
(A)



(B)



(C)



(D)

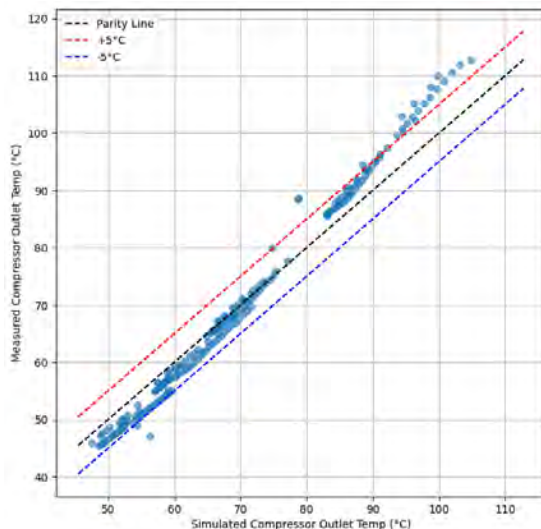


Abbildung 26: Simulation und Messung des AP3-Kältemittelkreislaufs: (A) Heizleistung (kW), (B) elektrische Leistung (kW), (C) Saug- und (D) Druck-Temperatur (°C)

Die elektrische Leistung des Wechselrichters wurde bei der Messung auf 12 kW begrenzt. Daher zeigen die Messpunkte in Abbildung 26 (B) keine Werte über 12 kW. Die simulierte elektrische Leistung stimmt gut mit der Messung überein.

Da sowohl die Heizleistung als auch die elektrische Leistung des Kompressors eine zufriedenstellende Übereinstimmung aufweisen, ist zu erwarten, dass auch der COP in akzeptablem Einklang steht. Abbildung 27 zeigt den COP. Abgesehen von einigen Ausreißern bei höheren COPs ist die auffällige Abweichung bei niedrigeren COPs zu beobachten. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Simulation bei hohen

Leistungsstufen die elektrische Leistung unterschätzt und die thermische Leistung überschätzt. Die Abweichung bei höheren COPs an einigen Punkten ist auf eine geringe Unterkühlung (siehe Abbildung 27 A, violette Punkte) am Kondensator zurückzuführen. An diesen Messpunkten könnte eine Zweiphasenströmung vorliegen. Daher sind die Berechnungen der Enthalpie und der Wärmeübertragungsrate fehleranfälliger.

(A)

(B)

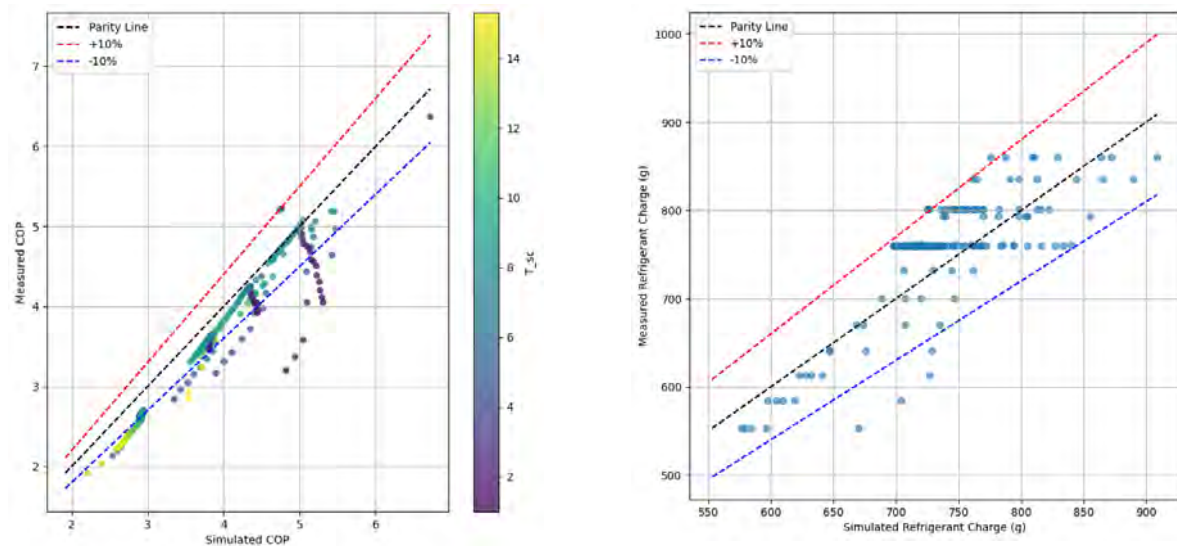


Abbildung 27: Vergleich von Simulation und Messung des AP3-Kältemittelkreislaufs:
(A) COP mit Unterkühlungsgradienten (SC) in Kelvin und (B) Kältemittelfüllmenge.

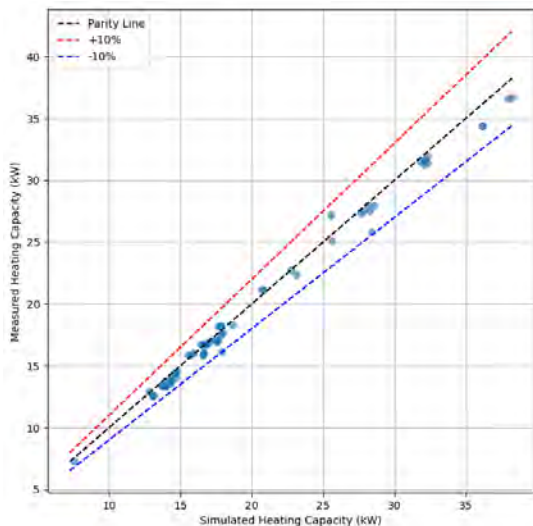
Abbildung 27 zeigt die Kältemittelfüllmenge. Es besteht eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung. Dies lässt sich durch die genaue Kenntnis des Innenvolumens aller Komponenten erklären.

2.2.4.2.3 Zentral außen aufgestellter Kältekreislauf

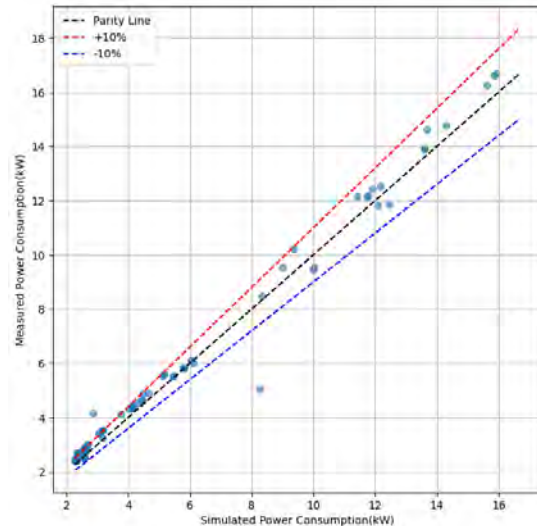
Die folgende Abbildung zeigt ein Beispiel dafür, inwiefern Simulation und Messung übereinstimmen und voneinander abweichen.

Es besteht eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung hinsichtlich der Heizleistung und der elektrischen Kompressorleistungsaufnahme (siehe Abbildung 28 (A) und (B)).

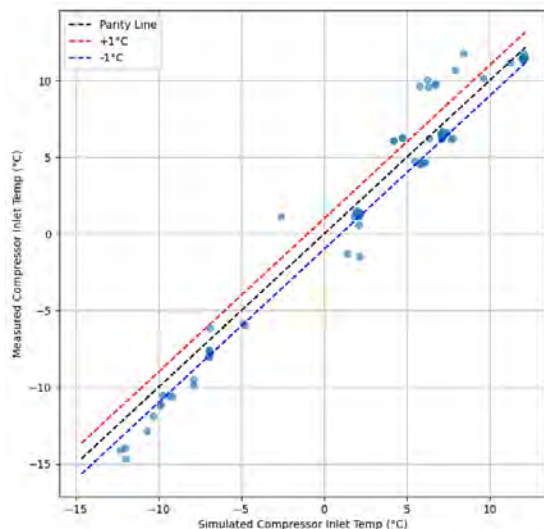
(A)



(B)



(C)



(D)

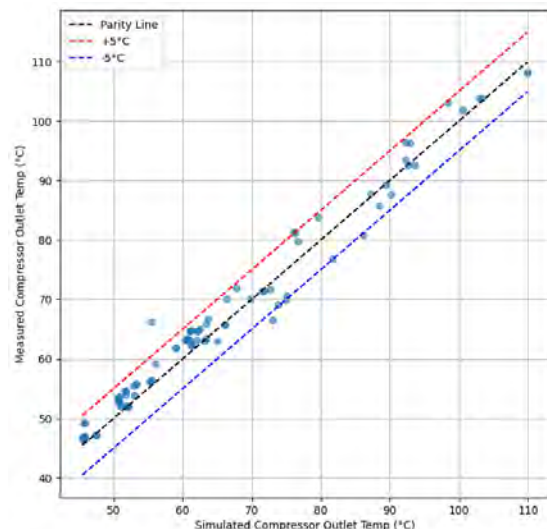
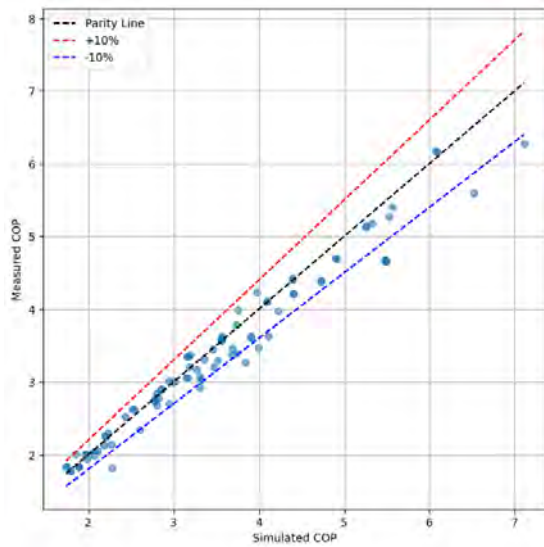


Abbildung 28: Simulation und Messung des AP4-Kältemittelkreislaufs: (A) Heizleistung (kW), (B) elektrische Leistung (kW), (C) Saugtemperatur und (D) Druckseite (°C)

Aufgrund der guten Simulation der Heizleistung und der elektrischen Kompressorleistung zeigt der COP in Abbildung 29 (A) eine gute Übereinstimmung. Eine noch bessere Übereinstimmung wäre zu erwarten, wenn die elektrische Ventilatorleistung besser simuliert werden könnte. In Abbildung 29 (B) wird die Differenz zwischen der Simulation und der Messung der Ventilatorleistung dargestellt. Als Eingabe für das IMST-ART-Tool wird eine Ventilator Kennlinie verwendet. Aufgrund der Unsicherheit hinsichtlich des luftseitigen Druckabfalls, des luftseitigen Volumenstroms und der geometrischen Randbedingungen sind die Informationen der Ventilator Kennlinie jedoch begrenzt.

(A)



(B)

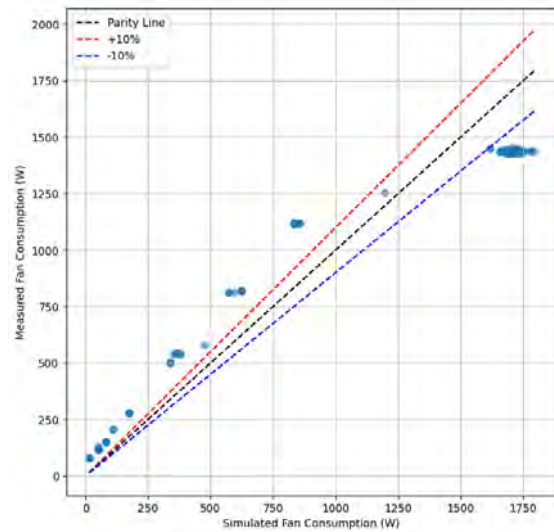


Abbildung 29: Vergleich von Simulation und Messung des AP4-Kältemittelkreislaufs:
(A) COP und (B) Lüfterleistung (kW)

Abbildung 30 zeigt, dass die Simulation die Füllmenge deutlich unterschätzt. Die Unterschätzung ist auf einen Kältemittelspeicher in der gemessenen Wärmepumpe zurückzuführen, der in IMST-ART nicht simuliert wird. Der Füllstand des Speichers ist bei der Messung nicht bekannt. Daher ist eine Simulation der Kältemittelfüllmenge schwierig durchzuführen.

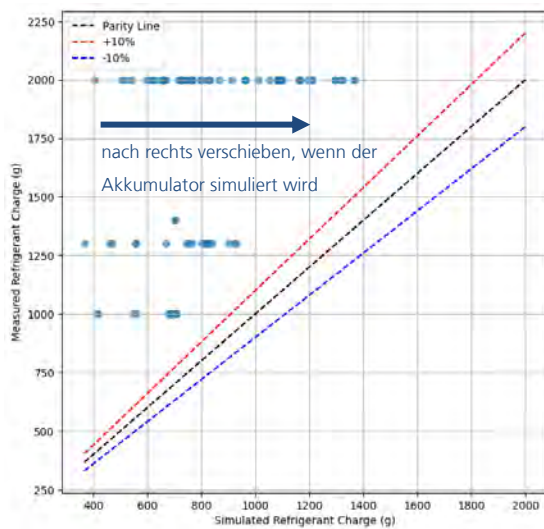


Abbildung 30: Vergleich von Simulation und Messung des AP4-Kältemittelkreislaufs: Kältemittelfüllmenge (g)

2.2.4.3 Mögliche Anpassungen für die Simulationen

Anpassungen für diese Komponenten werden auf der Grundlage der Abweichungen zwischen den Messwerten und den Simulationsergebnissen aus dem Datenblatt vorgeschlagen. Diese Anpassungen könnten dazu beitragen, kritische Aspekte der Simulation von Wärmepumpen in zukünftigen Projekten besser zu verstehen:

- Kompressor dezentral innen aufgestellt – Der R290-Massenstrom im Datenblatt und in der Messung weicht ab. Gründe müssen analysiert werden. Ein Test mit einem einzelnen Kompressor ist hilfreich, um Abweichungen frühzeitig zu erkennen.
- Alle Komponenten dezentral innen aufgestellt – Die Innenvolumina aller Komponenten müssen doppelt überprüft werden, um die R290-Füllmenge besser abzustimmen. Der Kompressor ist die kritischste Komponente. Im Konstruktionsprozess sollte der Komponentenhersteller frühzeitig nach dem Innenvolumen gefragt werden. Diese Information ist in Datenblättern nicht standardmäßig enthalten.
- Kompressor zentral innen aufgestellt – Der R290-Massenstrom wurde in der Simulation möglicherweise überschätzt. Ein Einzelkompressortest ist hilfreich, um Abweichungen frühzeitig zu erkennen.
- Kompressor zentral innen aufgestellt – Die elektrische Leistung könnte in der Simulation unterschätzt werden. Ein Einzelkompressortest ist hilfreich, um Abweichungen frühzeitig zu erkennen.
- Verdampfer zentral außen aufgestellt – Druckabfallkorrektur auf der R290-Seite. Eine Wärmeübertragergeometrie mit Kältemittelrohren mit kleinem Durchmesser (5 mm), großer Rohrlänge und mehreren Durchläufen ist schwer mit einem korrekten Druckabfall auf der Kältemittelseite zu konstruieren. Eine intensive Überprüfung wird empfohlen.
- Lüfter zentral außen aufgestellt – Die Leistungsaufnahme muss überprüft werden. Daten der Lüfterkennlinie können bei der Abschätzung der Leistungsaufnahme helfen. Die Druckabfallinformationen des Verdampfers sollten jedoch sorgfältig analysiert werden, wenn sie mit den Informationen der Lüfterkennlinie kombiniert werden.
- Alle Kreisläufe – Einführung einer genaueren Korrelation der Öllöslichkeit zur Verbesserung der R290-Füllmengenabschätzung

2.2.5 Simulation von Vereisung

Im Rahmen des Projektes LCR290 wurde das Vereisungsmodell der Simulationssoftware IMST Art in Zusammenarbeit mit der Universität València, sowie der Uni Freiburg, weiterentwickelt. Die Entwicklungen, Integration und Validierung des IMST-ART-Frostmodells erfolgte in Zusammenarbeit bzw. Kooperation mit der Universität Valencia, welche mit einem Unterauftrag an dem Projekt beteiligt wurde. Der erste Abschnitt behandelt das Problem der Frostbildung und des Frostwachstums sowie dessen erhebliche Auswirkungen auf Luftwärmepumpen (ASHP), indem der Frostprozess und seine Morphologie detailliert beschrieben werden und eine umfassende Literaturrecherche zu den jüngsten Fortschritten bei der Quantifizierung und Lösungsansätzen für dieses Problem durchgeführt wird. Der letzte Abschnitt zeigt die Ergebnisse des IMST-ART-Modells und die Validierung anhand von experimentellen Daten aus einer speziellen Versuchsreihe.

Tabelle 8 Formelzeichen Übersicht im Vereisungskapitel

BR	Blockierungsgrad [%]
T	Temperatur [°C]
$\dot{m}$	Massenstrom [kg/s]
q	Wärmeübertragungsrate [W]
δ	Dicke [m]
ρ	Dichte [kg/m³]
η	Wirkungsgrad [%]
h_m	Massentransferkoeffizient [kg/m²·s]

W	Feuchtigkeitsverhältnis [$\text{kg}_{\text{ww}}/\text{kg}_{\text{da}}$]
A	Fläche [m^2]
t	Zeit [s]
D_{eff}	Effektiver Massendiffusionskoeffizient [m^2/s]
ϕ_{ww}	Wasserdampf-Massenabsorptionsrate pro Volumeneinheit [$\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$]
k_{eff}	Effektive Wärmeleitfähigkeit der Frostsicht [$\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$]
$D_{\text{ww-a}}$	Binäre Diffusionsleitfähigkeit von Wasserdampf in Luft [m^2/s]
ε	Porosität [-]
Δt	Zeitschritt [s]
i_{sv}	Latentwärme der Wasserdampf-Sublimation [J/kg]
f	Lüfterreibungsfaktor [-]
u	Geschwindigkeit [m/s]
W	Breite [m]
H	Höhe [m]
P	Umfang [m]
Δp	Druckabfall [Pa]
S_t	Rohrabstand [m]
F_p	Lamellenabstand [m]
σ_f	Kontraktionsfaktor [-]

2.2.5.1 Frostbildung und -wachstum in Luft-Wasser-Wärmepumpen

Einleitung

Bei Luft-Wasser-Wärmepumpen, die bei Temperaturen unter null Grad betrieben werden, bildet sich Frost auf der Oberfläche der Verdampfer und sammelt sich dort an. Die Frostbildung führt folglich zu einer Verringerung der Wärmeübertragungsrate und zur Verstopfung des Luftkanals. Daher verringert Frost die Nennleistung der Anlage, die für trockene Bedingungen ausgelegt ist.

Um die Betriebseffizienz der Luft-Wasser-Wärmepumpen auf einem hohen Niveau zu halten, wurden verschiedene Abtauvorrichtungen sowie deren Regelungsstrategien entwickelt und experimentell untersucht^{1,2}. Um einen Abtauzyklus genau vorherzusagen und zu steuern, sollten zunächst die komplexen Zusammenhänge zwischen dem Frostbildungsprozess und den Betriebsbedingungen des Systems geklärt werden, insbesondere die Messung der Eigenschaften der Frostansammlung.

Daher ist es vor der Modellierung des Frostbildungsprozesses an Verdampfern sehr wichtig, erstens die Natur der Frostbildung und des Frostwachstums sowie die Mechanismen zu verstehen, die dieses komplizierte Phänomen steuern, und zweitens die Literatur nach aktuellen experimentellen Studien zu durchsuchen, um die Auswirkungen der Frostansammlung auf die wichtigsten Leistungsparameter der Luft-Wasser-Wärmepumpen zu quantifizieren.

Frostbildungsprozess

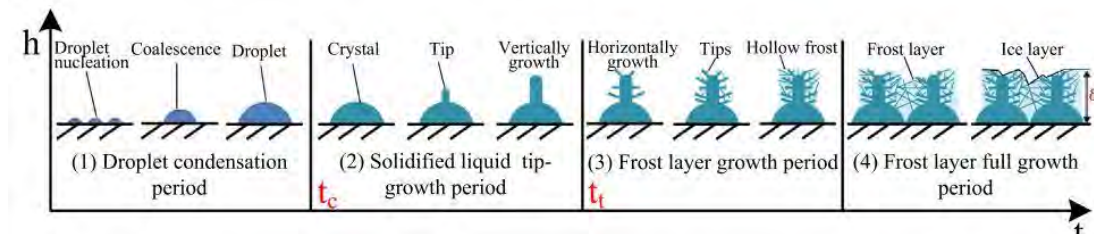


Abbildung 31: Reif- bzw. Frostwachstumsphasen³.

Basierend auf der Definition von Song et al.³ lässt sich der gesamte Vereisungsprozess in vier Phasen unterteilen, wie in Abbildung 31 dargestellt. Jede Phase ist wie folgt definiert:

Phase der tropfenweisen Kondensation (DWC): Während der anfänglichen Abkühlungsphase bildeten sich auf der kalten Oberfläche kondensierende Tröpfchen im unterkühlten Zustand. Zunächst findet die Tröpfchenkeimbildung statt, unmittelbar danach erfolgt die Koaleszenz der Tröpfchen. Alle koaleszierenden Tröpfchen verwandeln sich in Eispartikel, nachdem eine charakteristische Zeit (die sogenannte kritische Zeit) t_c erreicht ist. Diese Zeitskala ist eine Funktion der Umgebungsbedingungen (Temperatur, natürliche oder erzwungene Konvektion) sowie der Temperatur und Rauheit der kalten Oberfläche.

¹ M. Song, J. Dong, C. Wu, Y. Jiang, and M. Qu, "Improving the frosting and defrosting performance of air source heat pump units: review and outlook," HKIE Transactions, vol. 24, no. 2, pp. 88–98, Apr. 2017, doi: 10.1080/1023697X.2017.1313134.

² M. Amer and C. C. Wang, "Review of defrosting methods," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 73, no. October 2016, pp. 53–74, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.01.120.

³ M. Song and C. Dang, "Review on the measurement and calculation of frost characteristics," Int J Heat Mass Transf, vol. 124, pp. 586–614, 2018, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.03.094.

Phase des Wachstums der erstarrten Flüssigkeitsspitzen (STG): Diese Phase beginnt mit einem tropfenförmigen Kristall, der sich zu einem stabförmigen Kristall entwickelte. Die Eiskristalle liegen weit voneinander entfernt und wachsen in Form einer vertikalen Säule. Die Phase der Erstarrung und des Spitzenwachstums beginnt und dauert bis zum Erreichen einer Übergangszeit t_t , in der sich eine relativ gleichmäßige poröse Frostschrift bildet.

Phase des Frostschriftwachstums (FLG): In dieser Phase bildeten sich an der Spitze der Eiskristalle Frostverzweigungen. Diese wachsen dreidimensional und verbinden sich mit benachbarten Frostverzweigungen, wodurch eine flache Frostschrift entsteht.

Phase des vollständigen Wachstums der Frostschrift (FLFG): Die Frostschrift verändert ihre Form nicht wesentlich, bis die Temperatur an der Frostoberfläche aufgrund eines Anstiegs des thermischen Widerstands des Frosts $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreicht. Dementsprechend beginnt der obere Teil der Frostschrift zu schmelzen und sich in Wasser zu verwandeln. Das geschmolzene Wasser dringt in die Frostschrift ein und gefriert dort zu einer Eisschicht. Das Schmelzen und Gefrieren bewirkt einen plötzlichen Anstieg der Dichte der Frostschrift und einen plötzlichen Rückgang ihres Wärmewiderstands, was zu einer Temperatur der Frostschrift unter null führt, und es kommt erneut zu einer Frostablagerung. Dann setzt sich ein zyklischer Prozess aus Schmelzen, Gefrieren und Ablagerung oft periodisch fort, bis die Frostbildung aufhört, wenn der Gleichgewichtszustand der Wärmeübertragung erreicht ist.

Umgebungs- und Oberflächenbedingungen können den Frostbildungsprozess beeinflussen. Dies wurde an Oberflächen von Platten, Wärmetauschern und Kühlsystemen umfassend untersucht. Darüber hinaus unterscheiden sich die Frostbildungseigenschaften auf hydrophoben und superhydrophoben Oberflächen von denen auf gewöhnlichen Oberflächen.

Wie von Kim et al. ¹ zusammengefasst, beeinflussten die Veränderungen der Oberflächeneigenschaften das Verhalten der Frostbildung im Frühstadium, von der trockenen Oberfläche bis zur Bildung von Eiskristallen. Die Oberflächeneigenschaften haben keinen Einfluss auf das Wachstum der Frostschrift, und die Veränderung der Oberflächeneigenschaften werden nur vor der Kristallwachstumsphase, also der DWC-Phase, berücksichtigt.

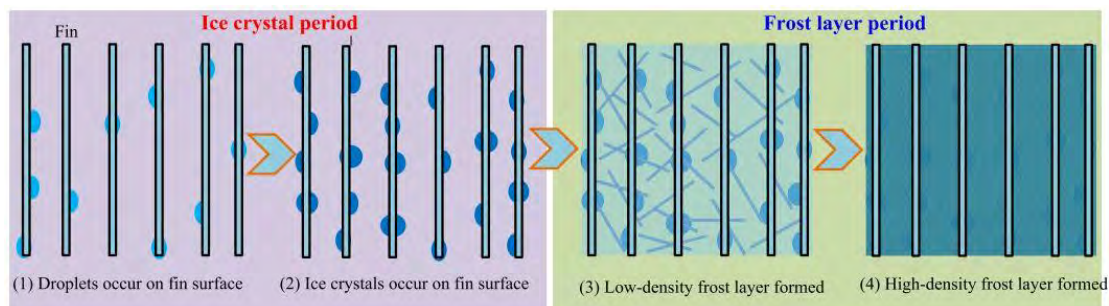


Abbildung 32: Vereisungsprozess auf der luftseitigen Oberfläche einer Außenwendel in einer ASHP-Anlage. ¹

Die Temperatur der kalten Oberfläche spielt während des Vereisungsprozesses die wichtigste Rolle. Aufgrund unterschiedlicher Temperaturen der kalten Oberfläche unterscheiden sich der Vereisungsprozess auf der Oberfläche der Außenwendel in einer ASHP-Anlage und der Vereisungsprozess im Inneren der Verkleidung eines Kühlschranks grundlegend von dem auf einer flachen Plattenoberfläche.

¹ M. H. Kim, H. Kim, K. S. Lee, and D. R. Kim, "Frosting characteristics on hydrophobic and superhydrophobic surfaces: A review," *Energy Convers Manag*, vol. 138, pp. 1–11, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.01.067

Auswirkungen der Vereisung auf die Leistung von ASHPs: Eine Literaturübersicht

In diesem Unterabschnitt versuchen wir, die neuesten experimentellen Studien aus der Literatur zusammenzufassen, die sich mit dem Einfluss der Frostbildung auf die Leistung von ASHPs befassen.

Guo et al.¹ führten eine Versuchsreihe durch, um den Einfluss von Frostwachstum und Frostmorphologie auf die Leistung einer Split-Wärmepumpen-Klimaanlage mit einer Nennkühlleistung von 11,2 kW zu untersuchen. In dieser Arbeit wurden die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit im Außenraum auf Werte zwischen -15 und 5 °C bzw. 55–90 % geregelt. Es zeigte sich, dass unter Bedingungen einer relativen Luftfeuchtigkeit von 55 % im Außenbereich keine Frostbildung auftrat oder diese auf den kalten Oberflächen keine nennenswerten Auswirkungen hatte. Die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit im Innenraum wurden auf 20 °C bzw. 60 % geregelt, und der Luftdurchsatz durch den Innenwärmetauscher wurde während aller Versuche bei 2500 m³/h gehalten.

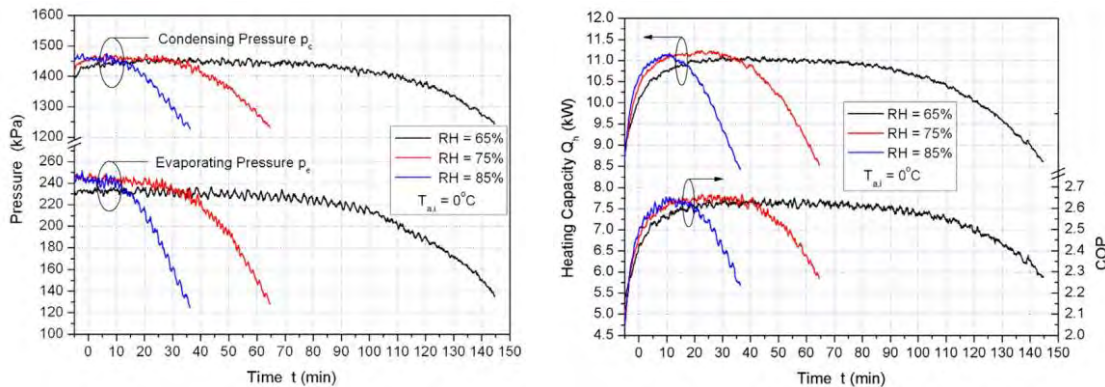


Abbildung 33: (links) die zeitliche Veränderung der Verdampfungs- und Kondensationsdrücke; und (rechts) die zeitliche Veränderung der Heizleistung und des COP¹.

Die Ergebnisse in Abbildung 33 sind in zwei Zeiträume unterteilt. Wenn beispielsweise die relative Luftfeuchtigkeit (RH) 75 % beträgt, führt im ersten Zeitraum (von $t = 0$ bis 20 min) die Bildung von Eiskristallen zu einer Zunahme der Oberflächenrauheit, was wiederum eine Verbesserung des luftseitigen Wärmeaustauschs zur Folge hat. Aus Abbildung 33 (rechts) ist ersichtlich, dass der COP in diesem Zeitraum ansteigt, während der Verdampfungsdruck nahezu konstant bleibt (Abbildung 33 (links)). Dennoch sind die negativen Auswirkungen der Frostansammlung auf den Luftstrom in diesem Zeitraum vernachlässigbar. Im zweiten Zeitraum (von $t=20$ bis 65 min) führt die Zunahme der Frostansammlung zu zwei wesentlichen negativen Auswirkungen: erstens zu einem Anstieg des luftseitigen Wärmewiderstands und zweitens zur Blockierung des Luftströmungskanal. Die Kombination dieser beiden Effekte führt zu einem raschen Rückgang der COP- und Verdampfungsdruckwerte, wie in Abbildung 33 zu sehen ist.

Eine weitere Studie wurde von Wang et al.¹ durchgeführt, um das Phänomen der fehlerhaften Enteisung zu untersuchen. Der Feldversuch fand in einem Bürogebäude in Peking, China, statt, das elf Räume mit einer Gesamtheizfläche von 185 m² umfasst. Eine Luft-Wasser-Wärmepumpe dient sowohl als Heiz- als auch als Kühlquelle für das Testgebäude. Die Nennheizleistung und die elektrische Eingangsleistung betragen unter Nennbedingungen 28,07 kW bzw. 8,48 kW.

¹ X. M. Guo, Y. G. Chen, W. H. Wang, and C. Z. Chen, "Experimental study on frost growth and dynamic performance of air source heat pump system," Appl Therm Eng, vol. 28, no. 17–18, pp. 2267–2278, 2008, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2008.01.007.

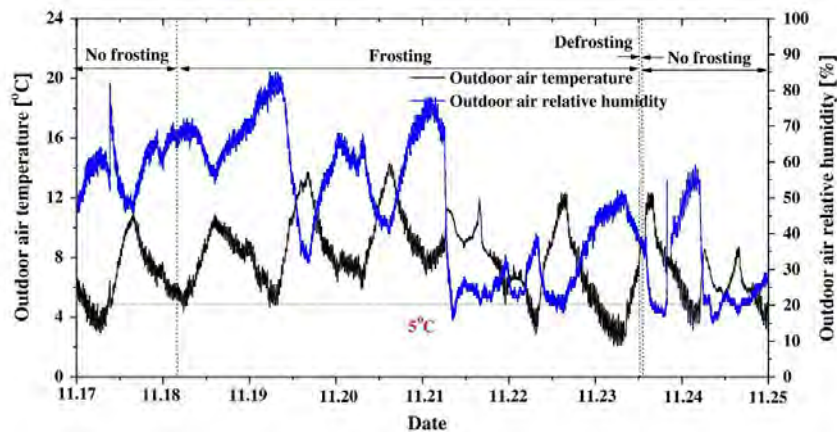


Abbildung 34: Die Umgebungstemperatur und relative Luftfeuchtigkeit¹.

Gemäß Abbildung 34 schwankt die Umgebungstemperatur während des Testzeitraums periodisch zwischen 2,1 °C und 14,3 °C, mit einem Durchschnittswert von 7,9 °C, und die relative Luftfeuchtigkeit schwankt zwischen 15 % und 85 %, mit einem Durchschnittswert von 48,3 %.

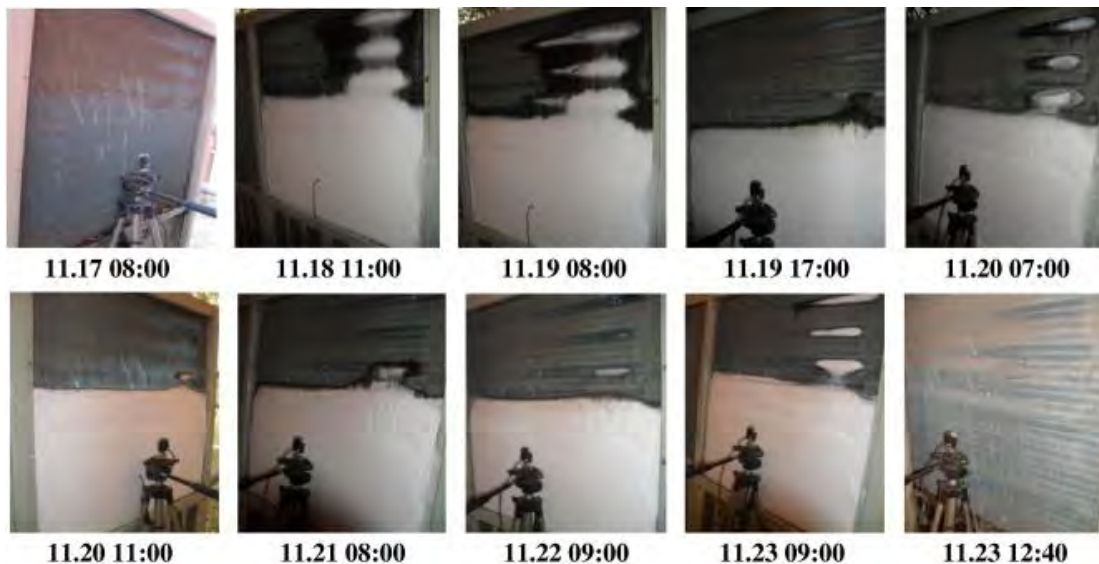


Abbildung 35: Bilder des Vereisungsprozesses¹. Vom 17. bis zum 23. November.

Abbildung 35 zeigt das Auftreten von Fehlaltauung. Den Bildern zufolge läuft die getestete Luft-Wasser-Wärmepumpe mindestens fünf Tage lang, wobei über 60 % der Oberfläche des Außenwärmetauschers vereist sind und kein automatischer Abtauzyklus ausgeführt wird. Die durchschnittliche Dicke der Eisschicht erreicht 10 mm. Diese starke Eisschicht verursacht sowohl einen hydraulischen als auch einen thermischen Widerstand an der Oberfläche des Wärmetauschers, was die Leistung der Luft-Wasser-Wärmepumpe erheblich verringert.

¹ W. Wang, Y. C. Feng, J. H. Zhu, L. T. Li, Q. C. Guo, and W. P. Lu, "Performances of air source heat pump system for a kind of mal-defrost phenomenon appearing in moderate climate conditions," Appl Energy, vol. 112, pp. 1138–1145, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.12.054.

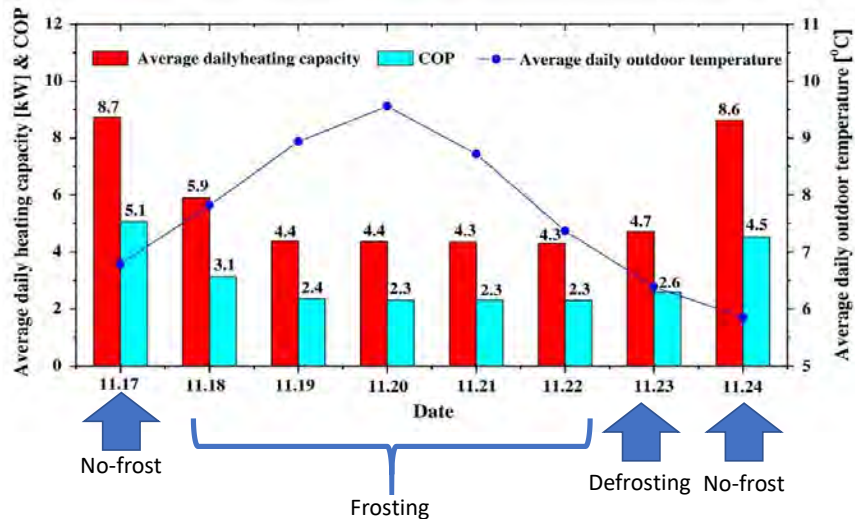


Abbildung 36: Die tägliche Leistung der Luft-Wasser-Wärmepumpe und die Durchschnittstemperatur [6].

Abbildung 36 zeigt die tägliche Leistung der getesteten Luft-Wasser-Wärmepumpe. Eine erste Vereisung wurde am 18. November festgestellt, doch der Abtauzyklus wurde von der Regelungsstrategie nicht automatisch ausgeführt, bis die Autoren den Abtauzyklus am 23. November manuell starteten. An Tagen ohne Vereisung kann die tägliche durchschnittliche Heizleistung auf einem wünschenswerten Niveau von 8,7 kW bleiben. An Tagen mit Vereisung und Abtauung sinkt die Heizleistung auf 5,9 kW bzw. 4,7 kW, was einer Verringerung um 38 % entspricht.

An Tagen mit vollständiger Vereisung sinkt die Heizleistung zudem auf den Mindestwert von 4,3 kW, was nur 49 % des Wertes an Tagen ohne Vereisung entspricht. Der COP zeigt ein ähnliches Muster. Der Durchschnittswert des COP sinkt während des Vereisungsprozesses, bleibt auf dem Mindestwert von 2,3 stabil und steigt dann während des Abtauprozesses wieder an. Der COP an Tagen mit vollständiger Vereisung beträgt nur 45 % des Wertes an Tagen ohne Vereisung.

Hwang und Cho¹ entwickelten ein numerisches Modell zur Vorhersage der lokalen Frostdicken, des Verstopfungsgrades sowie der lokalen und gesamten Wärmeübertragungsraten eines Feinrohr-Wärmetauschers unter Standard- (SFC) und hohen (HFC) Vereisungsbedingungen. Der getestete Wärmetauscher weist folgende Spezifikationen auf:

- Rohraußendurchmesser = 7,3 mm.
- Lamellentiefe = 12,6 mm.
- Breite x Höhe = 400 x 250 mm.
- Rippenabstand = 1,2 mm.
- Rippenform = Flachplatte
- Reihe/Spalte = Einzel/12

¹ J. Hwang and K. Cho, "Numerical prediction of frost properties and performance of fin-tube heat exchanger with plain fin under frosting," International Journal of Refrigeration, vol. 46, pp. 59–68, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2014.04.026.

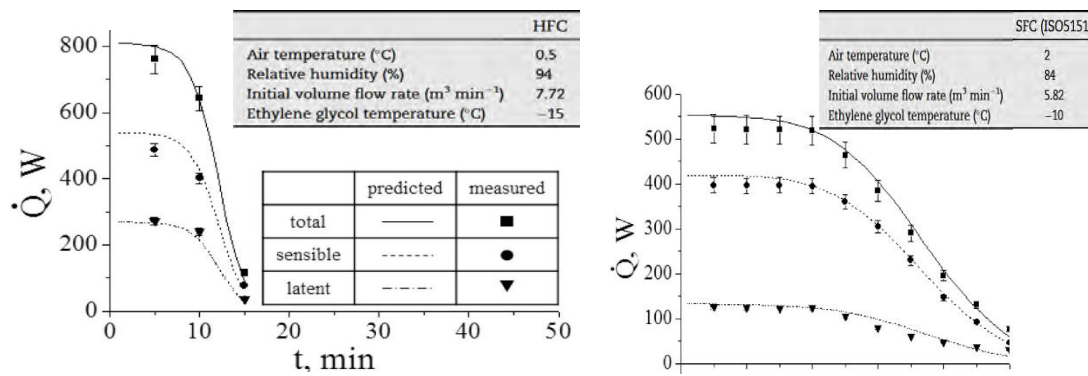


Abbildung 37: Einfluss der Frostbildung auf die Kapazität bei HFC (links) und SFC (rechts)¹.

Wie in Abbildung 37 dargestellt, ist bei SFC der Einfluss der Frostbildung auf die Kapazität nach 20 Minuten spürbar, während er bei HFC bereits nach 7 Minuten einsetzt. In Abbildung 38: Blockierungsgrad (BR) im Vergleich zur Vereisungszeit¹ ist zu erkennen, dass der Wärmetauscher bei SFC nach 50 Minuten vollständig blockiert ist, bei HFC hingegen bereits nach 15 Minuten.

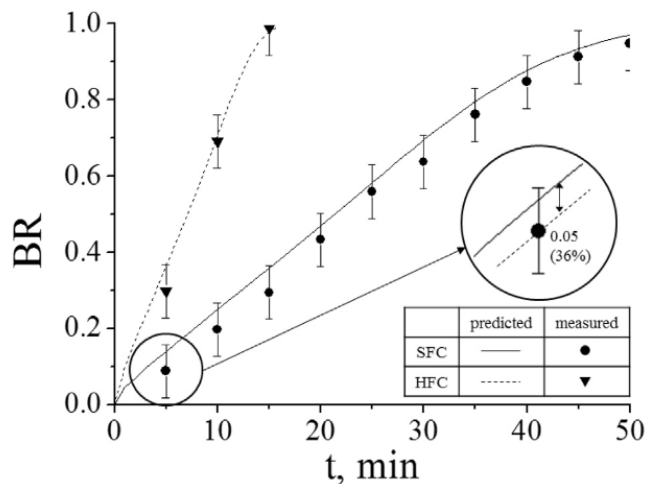


Abbildung 38: Blockierungsgrad (BR) im Vergleich zur Vereisungszeit¹

Basierend auf der Literaturrecherche sind die Hauptmotive für die Entwicklung eines detaillierten numerischen Modells zur Vereisungsbildung und -wachstum:

- Fehlen experimenteller Daten in der Literatur, insbesondere unter erweiterten Betriebsbedingungen.
- Fehlen detaillierter numerischer Modelle in der Literatur, insbesondere für komplexe Verdampferkonfigurationen.
- Die Bedeutung des Phänomens und seine direkten Auswirkungen auf die Leistung von Luft-Wasser-Wärmepumpen.
- Das wachsende Interesse am Ersatz von Gasheizkesseln durch Luft-Wasser-Wärmepumpen, insbesondere im privaten Sektor

¹ J. Hwang and K. Cho, "Numerical prediction of frost properties and performance of fin-tube heat exchanger with plain fin under frosting," International Journal of Refrigeration, vol. 46, pp. 59–68, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2014.04.026.

IMST-ART-Frostsimulation: Ergebnisse und Validierung

Was die luftseitige Analyse betrifft, ist IMST-ART in der Lage, zwischen drei verschiedenen Zuständen für das Rohr und die Lamelle zu unterscheiden: vollständig trocken, vollständig nass (Entfeuchtung) und vollständig vereist. Dies basiert auf der Rohroberflächentemperatur und der fiktiven Frostoberflächentemperatur.

Es ist erwähnenswert, dass das Vereisungsproblem als quasi-stationäres Problem behandelt wird, bei dem die Vereisungseigenschaften für den aktuellen Zeitschritt konstant sind und am Ende der Berechnungen für den nächsten Zeitschritt aktualisiert werden.

Versuchsreihe zu Frostbildung

Für den Test wurde ein handelsübliches ASHP-Gerät mit einer Nennleistung von 8 kW verwendet. Das ASHP besteht aus einem drehzahlgeregelten Doppelrotationskompressor, einem gelöteten Plattenwärmetauscher (BPHX) mit 30 Platten, einem FTHX mit den in Tabelle 9 angegebenen Eigenschaften, einem elektronischen Expansionsventil (EEV), einem 4-Wege-Umschaltventil und einem Akkumulator am Ausgang des Verdampfers. Das Expansionsventil hält die Unterkühlung in allen Versuchen auf einem Wert von 5 K, und die Wärmepumpe arbeitet mit einer Überhitzung von 0 K am Verdampferausgang.

Die Luftwärmepumpe wurde gemäß dem in Abbildung 39 dargestellten Schema instrumentiert. Es zeigt, dass Temperatursensoren am Ein- und Ausgang jeder Komponente installiert wurden, Drucksensoren am Ein- und Ausgang des Kompressors, ein Coriolis-Massendurchflussmesser am Kondensatorausgang und am sekundären Wasserkreislauf sowie Leistungsmesser zur Messung des Ventilator- und Kompressorverbrauchs. Alle diese Messgeräte dienen der Überwachung der Betriebsbedingungen der Wärmepumpe. Um insbesondere die Frostbildung zu überwachen, wurde ein Pitotrohr installiert, um den Luftdruckabfall im FTHX zu messen. Zwei Kameras wurden installiert, um das Frostwachstum im vorderen Bereich auf beiden Seiten des Wärmetauschers aufzuzeichnen, da beobachtet wurde, dass die Frostbildung je nach Betriebsbedingungen in unterschiedlichen Zonen des Wärmetauschers beginnt. Die gesamte Frostmasse wird zudem mit einer Waage gemessen.

Tabelle 9 . Hauptmerkmale des Rippenrohr-Wärmetauschers.

Merkmale [Einheit]	Wert
Rohrabstand [mm]	25
Reihenabstand [mm]	21,65
Reihen/Rohre pro Reihe [-]	3/32
Lamellenabstand [mm]	2,2
Lamellendicke [mm]	0,1
Länge der Lamellen [m]	0,7
Anzahl der Kreisläufe [-]	8
Rohraußendurchmesser/Rohrwandstärke [mm]	7,2/0,43 (geriffelt)
Beschichtung [-]	Hydrophil

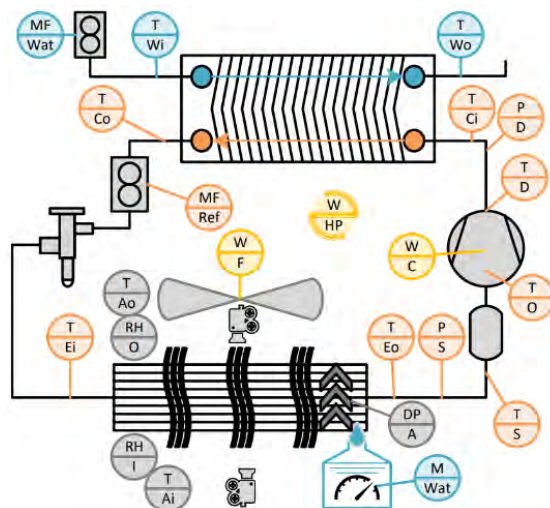


Abbildung 39: Schematische Darstellung der Instrumentierung in der Wärmepumpeneinheit.

Der Mechanismus der Frostbildung in einem Wärmetauscher lässt sich entsprechend dem Phasenwechselprozess des Wassers in zwei Mechanismen einteilen. Beim ersten kondensiert das Wasser zunächst an der Oberfläche des FTHX und gefriert dann. Beim zweiten sublimiert der Dampf direkt zu Frost über der Oberfläche des FTHX. Während aller Tests wurden die Kompressor- und Lüfterdrehzahl konstant gehalten. Abbildung 40 zeigt die Testmatrix mit 16 Betriebsbedingungen, die experimentell getestet wurden, sowie den Frost-/Kondensationsmechanismus für jeden Punkt. Sehr kalte Bedingungen und Bedingungen mit niedriger Luftfeuchtigkeit wurden verworfen, da die Frostbildungsrate sehr gering war.

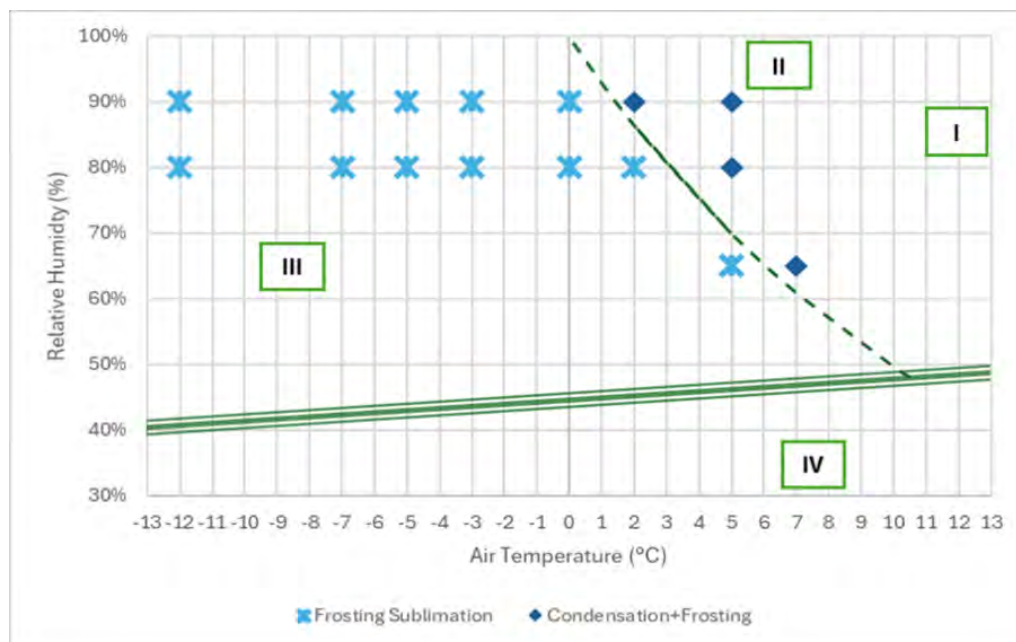


Abbildung 40: Testmatrix der aktuellen Studie (das Diagramm ist in verschiedene Zonen unterteilt: I – Kondensation, II – Kondensation + Vereisung, III – Sublimation, IV – trocken).

2.2.5.1.1 Modellvalidierung zur Frostbildung

Wir möchten betonen, dass die hier gezeigten Ergebnisse nur ein Teil des Validierungsprozesses für das IMST-ART-Model sind. In diesem Ergebnisbericht werden drei verschiedenen Betriebsbedingungen gezeigt welche folgenden Zustände abbilden:

A-3W55: Dabei betrug die relative Luftfeuchtigkeit (RH) 90 %, die Kompressordrehzahl 80 U/s und die Lüfterdrehzahl war auf 620 U/min festgelegt. Die Dauer eines Vereisungszyklus betrug 103 Minuten.

A-5W35: bei einer relativen Luftfeuchtigkeit (RH) von 90 %, einer Kompressordrehzahl von 80 U/s und einer festgelegten Lüfterdrehzahl von 440 U/min. Die Dauer eines Vereisungszyklus betrug 58 Minuten.

A-7W35: Dabei betrug die relative Luftfeuchtigkeit (RH) 80 %, die Kompressordrehzahl 60 U/s und die Lüfterdrehzahl 620 U/min. Die Dauer eines Vereisungszyklus betrug 371 Minuten.

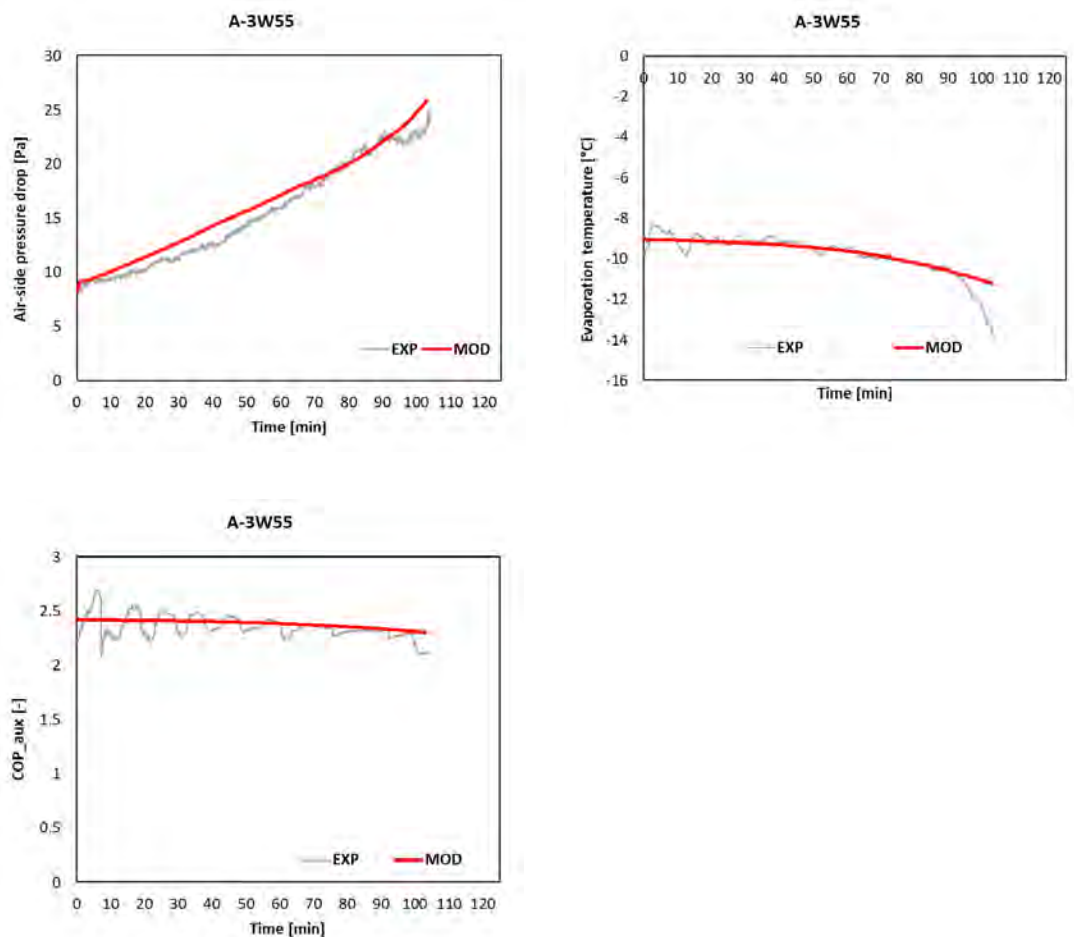


Abbildung 41: Modell (MOD) im Vergleich zu experimentellen (EXP) Werten für den luftseitigen Druckabfall, die Verdampfungstemperatur und den COP unter den Bedingungen von A-3W55.

Abbildung 41 zeigt die Validierung des Modells (MOD) anhand der experimentellen Daten von A-3W55. Im Allgemeinen kann das Modell den Trend des Anstiegs des luftseitigen Druckabfalls und des Rückgangs der Verdampfungstemperatur mit der Zeit perfekt simulieren. Am Ende der Simulationszeit von 103 Minuten betragen die absoluten Abweichungen beim luftseitigen Druckabfall, bei der Verdampfungstemperatur und beim COP 0,9 Pa, 2,8 K bzw. 9 %. Diese Abweichung könnte auf die Veränderung der Beschaffenheit der Frostschrift am Ende der Simulationszeit von einem porösen Medium zu einem festen (Eis) zurückgeführt werden, was zu diesem plötzlichen Abfall der Verdampfungstemperatur und des COP führt. Es wird geschlussfolgert, dass das Modell dieses Phänomen noch nicht erfassen kann oder mehr Zeit benötigt, um es zu erreichen.

Ähnliche Trends und Ergebnisse lassen sich auch im anderen Fall beobachten. Abbildung 42 zeigt die Validierung des Modells anhand von Versuchsdaten für A-5W35. Am Ende der Simulationszeit von 58 Minuten betragen die absoluten Abweichungen beim Luftseitendruckabfall, bei der Verdampfungstemperatur und beim COP 1,2 Pa, 1,2 K bzw. 6 %. Abbildung 43 zeigt die Validierung des Modells anhand von experimentellen Daten für A-7W35. Am Ende der Simulationszeit von 371 Minuten betragen die absoluten Abweichungen beim luftseitigen Druckabfall, bei der Verdampfungstemperatur und beim COP 1,6 Pa, 1,1 K bzw. 3 %.

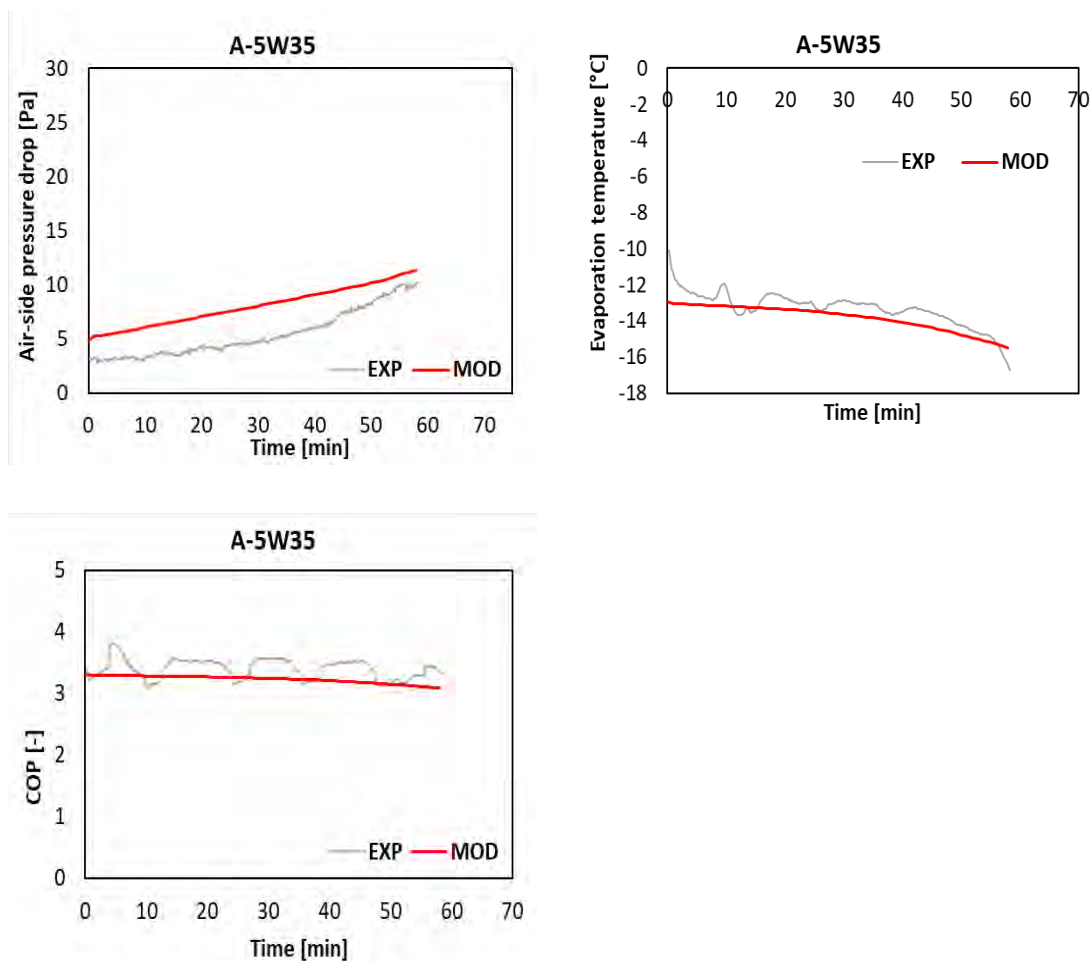


Abbildung 42: Modell (MOD) im Vergleich zu experimentellen (EXP) Werten für den luftseitigen Druckabfall, die Verdampfungstemperatur und den COP unter A-5W35-Bedingungen.

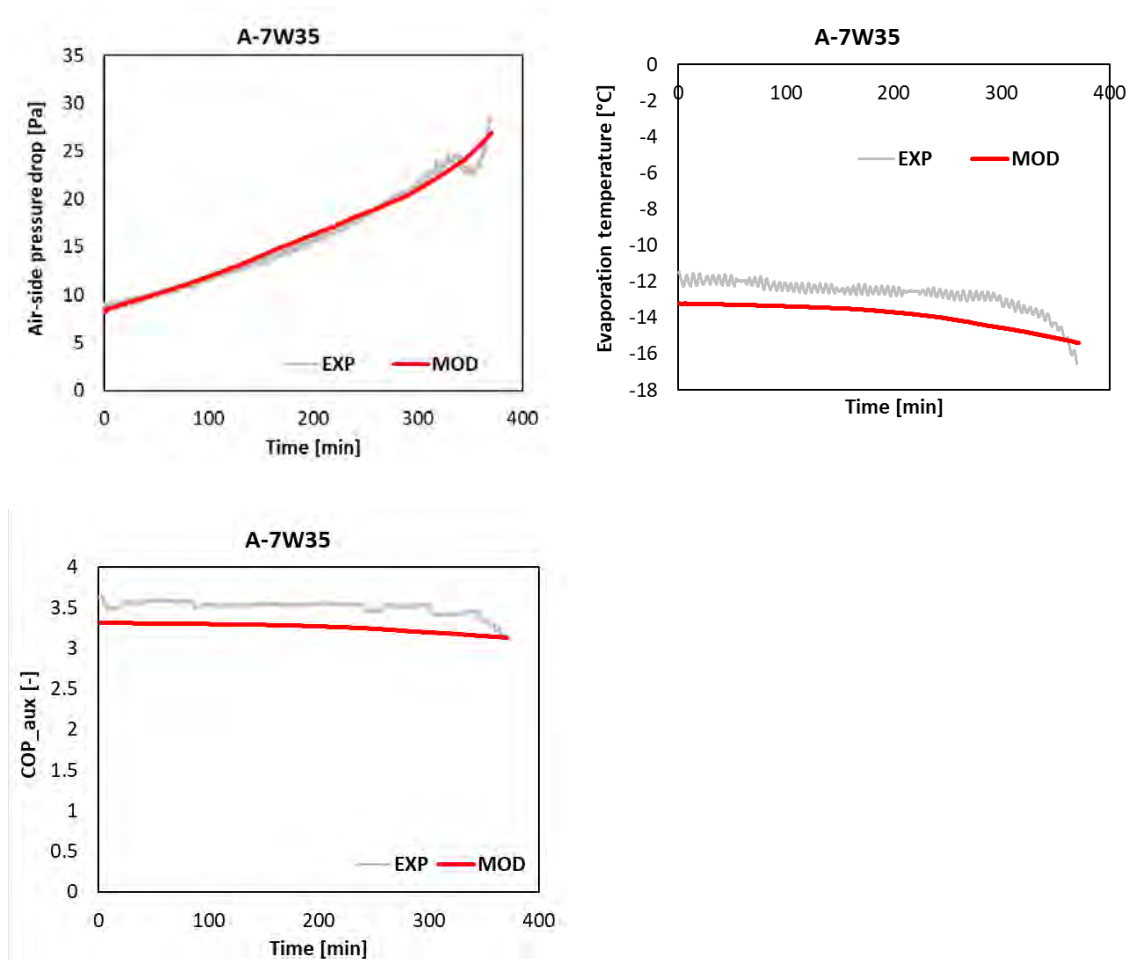


Abbildung 43: Modell (MOD) im Vergleich zu experimentellen (EXP) Werten für den luftseitigen Druckabfall, die Verdampfungstemperatur und den COP unter A-7W35-Bedingungen.

Zusammenfassung

Ein detailliertes Modell zur Frostbildung und Verdichtung für einen FTHX wurde entwickelt und erfolgreich in das Simulationswerkzeug IMST-ART integriert. Das Modell wurde anhand von experimentellen Daten einer handelsüblichen 8-kW-Luft-Wasser-Wärmepumpe validiert. Es kann die Leistungsabnahme der Luft-Wasser-Wärmepumpe aufgrund von Frostbildung im Zeitverlauf im Vergleich zu den experimentellen Daten korrekt abbilden. Die durchschnittlichen Abweichungen bei den wichtigsten Leistungsparametern wie Luftseitiger Druckabfall, Verdampfungstemperatur und COP betragen $\pm 1,2$ Pa, $\pm 1,7$ K bzw. ± 6 %.

2.3 Sicherheitskonzepte für Propan-Wärmepumpen für Mehrfamilienhäuser

2.3.1 Einleitung Sicherheitskonzepte in LCR290

Im Rahmen des LCR290-Projekts wurden drei R290-Wärmepumpentypen aufgebaut (siehe Kapitel 2.2), die den drei Anwendungsbereichen in Tabelle 1 zugeordnet wurden. Insbesondere eine geringe Füllmenge war hierbei ein zentrales Anforderungskriterium für eine sichere Wärmepumpe. Bei den drei Geräten handelt es sich um:

- Eine dezentrale Einheit, die in jeder Wohnung im Innenbereich installiert wird und deren Kältemittelfüllmenge im Bereich von 100 g bis 200 g liegt
- Eine zentrale Einheit, die im Innenbereich installiert wird mit einer Kältemittelfüllmenge von etwa 800 g
- Eine zentrale Einheit, die im Außenbereich installiert wird mit Kältemittelfüllmenge im Bereich von 1000 g bis 2000 g

Von den drei Anwendungsfeldern wurde die im Innenbereich installierte zentrale Einheit als der Gerätetyp mit den dringlichsten Herausforderungen für eine sichere und einfache Anwendung identifiziert und deshalb vorrangig analysiert.

Die verschiedenen Sicherheitsstufen in Bezug auf ein Wärmepumpensystem sind in Abbildung 44 dargestellt.

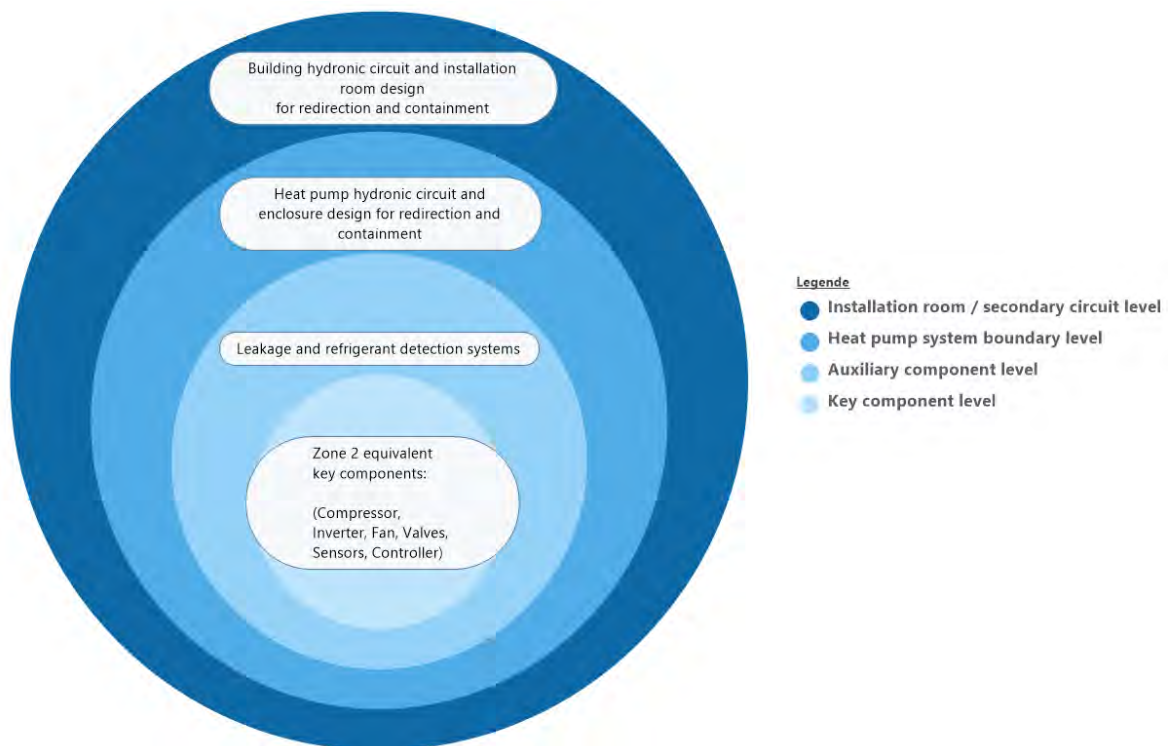


Abbildung 44: Sicherheitsstufen in Wärmepumpensystemen für den Einsatz hochentzündlicher Kältemittel

Während Schlüsselkomponenten, Leckage-/Kältemittel-Erkennungssysteme und Schutzmaßnahmen für Sekundärkreisläufe in Produktsicherheitsnormen abgedeckt oder zumindest erwähnt werden, war dies zu Beginn des LCR290-Projekts nicht für alle möglichen Gehäusedesigns der Fall. Hier wurde hauptsächlich mechanische Belüftung eingesetzt, wodurch der Bedarf an einer umfassenden Neukonstruktion von Wärmepumpengehäusen minimiert wird. Dieses Sicherheitsniveau einer Wärmepumpe spiegelt sich im „Heat pump system boundary level“ wider, wie in Abbildung 44 dargestellt.

2.3.1.1 Motivation und normative Einordnung

In den Normen für die Verwendung von A3-Kältemitteln werden mehrere Konstruktionsprinzipien beschrieben. Zum Beispiel

- Luftströmung zwischen einem Wärmepumpengehäuse und dem Aufstellungsraum
- mechanische Belüftung oder ein belüftetes Gehäuse

Die Erfassung möglicher und zulässiger technischer Konzepte ist jedoch nicht erschöpfend; so sind beispielsweise der Umgang mit und die Anforderungen an die Drainage oder allgemein an Freisetzungsstellen im Außenbereich nicht definiert. Darüber hinaus fehlt es den Unternehmen an Erfahrung mit bestehenden Ansätzen für die Entwicklung praxisnaher Geräte. Hier zielt das Projekt darauf ab, die Wissenslücke bei bestehenden normativen Methoden sowie bei nicht-normativen Sicherheitskonzepten zu verringern und das Verständnis durch experimentelle Tests zu verbessern (siehe Abbildung 45 für einen Überblick über bestehende und nicht bestehende Prinzipien und Anforderungen an Sicherheitsleistungstests). Wie auf dem orangefarbenen Hintergrund zu sehen ist, sind die Sicherheitsthemen im Zusammenhang mit Konzentrationsmessungen bei Tests und Zonentests an Drainage- oder Abblasebereichen noch nicht gut definiert.

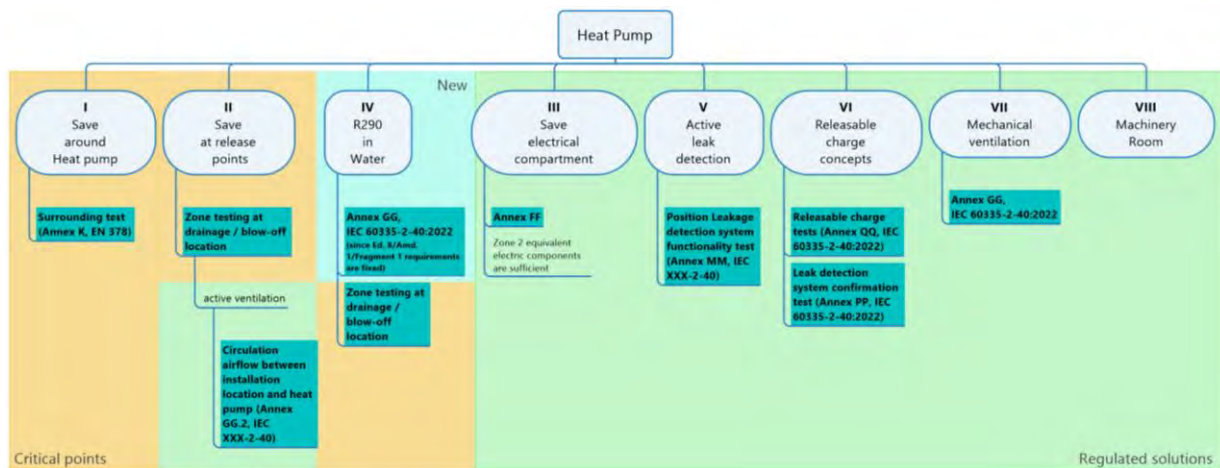


Abbildung 45: Reglementierte vs. nicht reglementierte / kritische Themen für die Sicherheit von Wärmepumpen. Offene Fragen zum Sicherheitsverhalten und zur Prüfung der Sicherheits-Performance, die während der Laufzeit des LCR290-Projekts dank neuer Methoden in Normen gelöst wurden.

In diesem Zusammenhang findet sich eine tabellarische Übersicht über die verfügbaren Konzepte in Tabelle 10.

Tabelle 10: Verfügbare Konzepte in IEC 60335-2-40:2022 (Edition 7) für A3-Kältemittel

Sicherheitskonzept	Zweck / Wirkung	Normative Referenz	Formelverweise	Relevante Konstanten
Begrenzung der Füllmenge in unbelüfteten Bereichen	Begrenzt die zulässige Füllmenge oder schreibt eine Mindestraumfläche vor, basierend auf Annahmen zur Freisetzung in Innenräumen.	Anhang GG (GG.1.2; GG.2)	(GG.1) bis (GG.3); (GG.8), (GG.9)	$CF = 0,5$; h_0 mindestens 0,6 m; Schwellenwerte für Fluchtöffnungen 5 cm ² und 0,1 mm
Fläche verbundener Räume (Durchgang)	Erlaubt eine definierte Zusammenfassung benachbarter Räume auf derselben Etage zur Bestimmung der Raumfläche.	GG.1.3.3		
Belüftete Einhausung	Verhindert das Eindringen in den Raum durch eine separate Einhausung und leitet ausgetretenes Kältemittel über eine überwachte Entlüftung ins Freie	GG.4	(GG.16), (GG.17); Tabelle GG.6; (GG.44), (GG.45)	Unterdruck ≥ 20 Pa; $Q_{\min}$ min. 2 m ³ /h; $CF = 0,25$; für die nicht verstärkte Leckagerate 240 s (4 min) verwendet
Konzept mit separatem Maschinenraum	Konzept mit separatem Maschinenraum gemäß den Lüftungsanforderungen in EN 378-3.	GG.5.13		
Integrierter Umluftstrom (feste Einrichtungen)	Verdünnungsweg auf der Grundlage des integrierten Umluftstroms und der Berechnung des Mindestluftstroms.	GG.2.3 (sowie GG.10.4,)	(GG.13)– (GG.15); (GG.31)	$CF \leq 0,5$ gemäß GG.2.3; Mindestluftdurchsatz $z = 240$ m ³ /h gemäß GG.10.4
Kühlsystem mit erhöhter Dichtheit	Alternativer Weg für Systeme, die 22.125 entsprechen und zulässige Füllmengen-/Raumflächenkriterien unter der Annahme erhöhter Dichtheit ermöglichen.	22.125 und GG.14	(GG.39)– (GG.43); Tabelle GG.6; (GG.44), (GG.45)	$CF = 0,35$
Regelungen des Sekundärkreislaufs	Schränkt Freisetzungswege über Sekundärkreisläufe ein	GG.6		

(Sekundärsystem mit offenem Regelkreis)	und schreibt ein Entlüftungs-/Ablassverfahren vor.			
Bestimmung der freisetzbaren Kältemittelmenge (m_{rl})	Verfahren zur Bestimmung der freisetzbaren Kältemittelmenge (releasable charge) im Rahmen des Anhangs GG.	Anhang QQ	(QQ.1) bis (QQ.7)	
Leckagesimulationstest	Überprüft bei Bedarf das Verhalten des Geräts unter simulierten Leckbedingungen.	Anhang FF	(FF.1)	
Bestätigungstest des Leckageerkennungssystems	Bestätigungstest auf Systemebene, bei dem ein Leckageerkennungssystem die Sicherheitsmaßnahmen gemäß Anhang GG auslöst.	Anhang PP		Die zeitlichen Anforderungen sind in Anhang PP festgelegt (keine Verweise auf Formeln)

CF: Konzentrationsfaktor; h_0 : Installationshöhe Gerät; m_{rl} : maximum releasable charge (maximal freigesetzte Kältemittelmenge)

Neben diesen allgemeinen Konzepten wurde im Rahmen des Projekts LCR290 die Edition 7 der 60335-2-40 auf die Edition 8 aktualisiert. In Tabelle 11 sind einige Änderungen zusammengefasst.

Tabelle 11 : Änderungen zwischen den Editions 7 und 8 sowie den beiden Fragmenten der Änderung 1 (bezogen auf IEC 60335-2-40 für A3-Kältemittel)

Themenbereich	Edition 7.0	Edition 8.0 + Änderung 1	Auswirkung
Luftstrom in belüfteten Gehäusen	Durchflussmenge im Verhältnis zu Q_{min} .	Edition 8: Durchflussrate nach außen bei vollständiger Kanalisierung.	Präzisierung der Prüfkongfiguration.
Kältemittel-Detektionssysteme	Anhang LL normativ.	Edition 8: Anhang LL durch IEC TS 63542 ersetzt.	Externalisierung der Detektionsqualifizierung und deutlich beschleunigte Anforderungsentwicklung
Doppelwandige Wärmetauscher	Grundlegende Anforderungen, Anhang GG-6	Edition 8: Mechanische Festigkeit / Leckageverhütung hinzugefügt (19.106, 21.102 (Anhang EE), 21.135)	Verhindert das Überkreuzen von Kältemitteln.

Gehäusedichtheit und Lüfteraktivierung	Nicht definiert	Edition 8: nn Teil 2 (geplant): Anhang GG.4	Definierte Prüfanforderungen für die Gehäusedichtheit und die Aktivierungszeit zwischen Erkennung und Belüftung
Auslösungen des Sekundärkreises	Anhang GG.6	Edition 8: nn Fragment 1 (geplant): Anhang GG.6	Sichere Freigabe in den Sekundärkreis möglich, definierte Prüfanforderungen
Risikofreier Aufstellungsraum	Anhang GG.4 (geplant)	Edition 8: nn. Fragment 2 (geplant): Anhang GG.4	Der Aufstellungsraum ist sicher, sofern ein vordefinierter Konzentrationsgrenzwert nicht überschritten wird ¹ (gilt nur für Geräte mit mechanischer Belüftung)

2.3.1.2 Angewandte Auswertemethoden

Zur Bewertung der Versuchsergebnisse wurden zwei Ansätze umgesetzt. Zum einen wurden einfache tabellarische Übersichten pro Versuchskampagne angelegt, in der bei definierten Abständen angezeigt wird, mit welcher Dauer ein zündfähiges Gemisch für die variierten Versuchsparameter vorliegt. Die variierbaren Versuchsparameter sind pro Versuchskampagne erläutert.

Zum anderen wurde eine SHAP-Analyse durchgeführt. Die SHAP-Analyse (SHapley Additive exPlanations) ist eine Methode aus der erklärbaren künstlichen Intelligenz, die auf einem Konzept der kooperativen Spieltheorie beruht. Das Konzept dahinter lässt sich anschaulich so beschreiben: man stellt sich vor, die Einflussparameter eines Versuchs (z. B. Massenstrom, Luftaustauschrate, Gehäusedichtheit) seien „Spieler“ in einem Team, deren gemeinsames „Ergebnis“ die vorhergesagte Dauer des Vorhandenseins eines zündfähigen Gemisches ist. Es wird nun für jeden Spieler einzeln berechnet, wie viel er zum Gesamtergebnis beiträgt. Es wird zunächst ein Random-Forest-Modell (ein Ensemble aus 500 Entscheidungsbäumen) auf die Versuchsdaten trainiert, das den Zusammenhang zwischen den variierten Parametern und der gemessenen Nachweisdauer bei 0,5 m Abstand lernt. Anschließend wird für jedes einzelne Experiment und jeden Parameter ein SHAP-Wert berechnet, der angibt, um wie viele Sekunden dieser Parameter die Vorhersage gegenüber dem Durchschnitt aller Versuche nach oben (positiver SHAP-Wert = verlängernd) oder nach unten (negativer SHAP-Wert = verkürzend) verschiebt. Je weiter ein SHAP-Wert von Null abweicht, desto dominanter ist der betreffende Parameter für das jeweilige Versuchsergebnis. Über alle Experimente einer Kampagne betrachtet ergibt sich so ein Ranking: Parameter, deren SHAP-Werte im Mittel am stärksten streuen, sind diejenigen, die das Versuchsergebnis am meisten beeinflussen – sie „entscheiden“ darüber, ob sich eine Schwergasschicht bildet oder nicht.

Da in den einzelnen Kampagnen jeweils nur eine Teilmenge der insgesamt dreizehn untersuchten Einflussgrößen gezielt variiert wurde, während andere auf einem festen Wert verharrten, wurde die SHAP-Analyse vor allem kampagnenübergreifend auf den gesamten Datensatz aller fünf Kampagnen (C1–C5) angewandt. Diese übergeordnete Betrachtung ist aus zwei Gründen notwendig: Erstens ist die Anzahl der Versuche innerhalb einer einzelnen Kampagne (zwischen 13 und 36) für ein belastbares Training eines maschinellen Lernverfahrens gering; das Modell kann bei zu wenigen Datenpunkten zufällige Muster überlernen statt die tatsächlichen physikalischen Zusammenhänge abzubilden. Zweitens können Parameter, die innerhalb einer Kampagne konstant gehalten werden (z. B. die Kältemittelfüllung in Kampagne 3 oder die Ventilatorleistung in Kampagne 1), dort als ein Parameter erkannt werden, der scheinbar keinen erkennbaren Beitrag liefert – obwohl sie physikalisch einen erheblichen Einfluss auf die Schwergasschichtbildung ausüben.

¹ Der Test erfolgt analog zum Umgebungskonzentrationstest, wie er für den logischen Freigabetest gemäß EN 378 (geplant) vorgeschlagen wurde.

Erst in der kampagnenübergreifenden Analyse, in der diese Parameter zwischen den Kampagnen variieren, wird ihr tatsächlicher Stellenwert sichtbar und quantifizierbar.

2.3.1.3 Übersicht über die durchgeführten Arbeiten

Wie oben beschrieben, müssen Sicherheitskonzepte für Wärmepumpen verschiedene Sicherheitsebenen berücksichtigen (siehe Abbildung 44) und unterschiedliche Prinzipien der Sicherheitsleistungsprüfung einbeziehen (siehe Abbildung 45). Dieser Bericht konzentriert sich einerseits auf die Systemgrenze der Wärmepumpe und analysiert verschiedene Sicherheitskonzepte in fünf Messkampagnen; andererseits befasst er sich mit einer allgemeineren Sichtweise auf die Sicherheit von Wärmepumpen, z. B. mittels einer Risikobewertung. Hier ein kurzer Überblick:

Die Kapitel 2.3.2 bis 2.3.3 beschreiben den Wärmepumpen-Demonstrator und die Testinfrastruktur zur Analyse verschiedener Sicherheitskonzepte. Kapitel 2.3.4 beschreibt die Sicherheitskonzepte und die fünf Testkampagnen zur Erprobung der Konzepte. In den Kapiteln 2.3.5, 2.3.6 und 2.3.7 werden die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick sowie Empfehlungen gegeben. Kapitel 2.3.8 beschreibt die Risikobewertung der untersuchten Sicherheitskonzepte.

2.3.2 Prototypenbau für eine zentralisierte Einheit zur Innenaufstellung

Um die Sicherheitskonzepte umzusetzen und die Validität der Messergebnisse zu gewährleisten, ist es unerlässlich, ein dichtes Gehäuse zu konstruieren, das die zu testende Wärmepumpe vollständig umschließt. Um die Anzahl potenzieller Leckagen zu reduzieren, wurde im Projekt ein Tank gefertigt, bei dem die Seitenwände dicht miteinander und mit dem Boden verschweißt sind (die Edelstahlplatten sind 2 mm dick). Die Oberkanten der Seitenwände sind umgebogen, um eine Dichtfläche für den Verschluss mit dem Deckel zu schaffen (Abbildung 46). Eine durchgehende Dichtung wird aufgeklebt und der Deckel verschraubt.

Aus infrastrukturellen Gründen muss das Gehäuse mobil sein und ist daher mit Rollen ausgestattet. Der durch die Rollen unterhalb des Gehäuses entstehende Raum wird durch Verkleidungen verschlossen und lässt kein Gas entweichen (Abbildung 47).

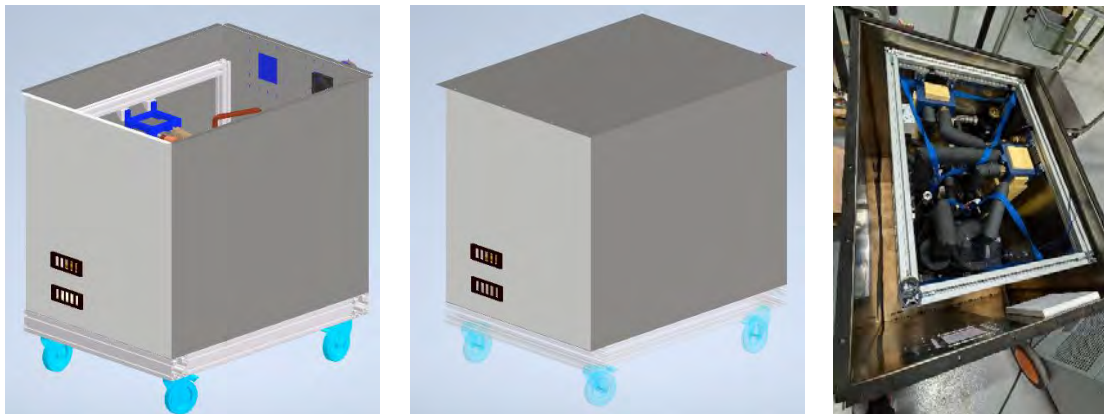


Abbildung 46: CAD-Ansicht des Schweißbehälters mit (links) und ohne (Mitte) Deckel, Dichtfläche des Deckels (rechts)

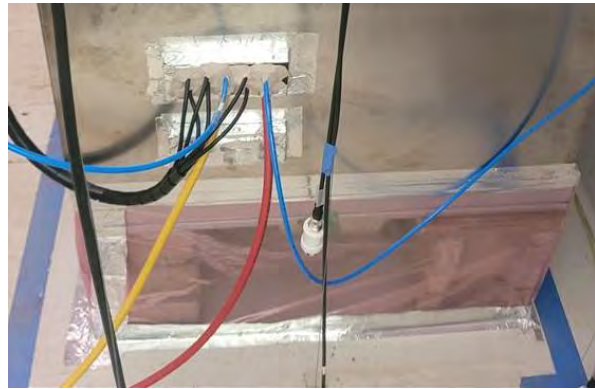


Abbildung 47: Abdichtung des Raums unter dem Schweißtank

Die Wärmepumpe im Schweißtank (im Folgenden als DuT, kurz für engl. „device under test“) dient in den Kampagnen 1–5 lediglich als Platzhalter zur Simulation eines realistischen Füllstands (ca. 40 % des Gehäuseinhalts sind belegt) und wird während der Messkampagnen nicht in Betrieb genommen. Das Propan wird über einen Kältemittelschlauch abgelassen, der durch eine handelsübliche Kabelverschraubung (Gummidichtung) in das Gehäuse geführt wird.

Der Propan-Massenstrom wird über einen Prüfstand konditioniert. Um einen reibungslosen Messbetrieb zu gewährleisten, ist eine zusätzliche Leitung installiert, über die das Gehäuseinnere nach Abschluss einer Messung mit Stickstoff gespült werden kann (Abbildung 48).



Abbildung 48: Schläuche für die Gasversorgung mit Propan (rot) und Stickstoff (gelb), Durchführung durch den Schweißtank (links), Positionierung im DuT (rechts)

Im Gehäuse ist eine Öffnung vorgesehen (an einer der schmalen Seiten im unteren Bereich, siehe Abbildung 49), die es ermöglicht, die Dichtheit des Gehäuses mithilfe eines 3D-gedruckten Adapters aus PETG und austauschbarer Aufsätze mit unterschiedlichen Spaltbreiten (0, 0,5 und 1 mm; Abbildung 50) zu variieren, um die kumulative Querschnittsfläche auf 0, 2,5 oder 5 cm² einzustellen.

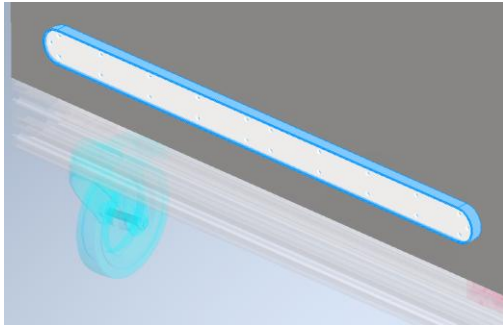


Abbildung 49: Geteilter Adapter in der CAD-Planung des Gehäuses links, physische Umsetzung rechts

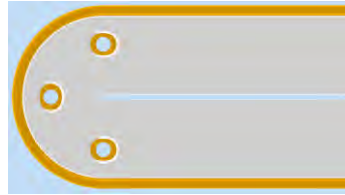
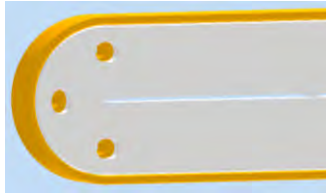
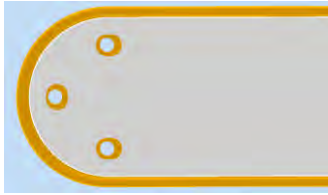


Abbildung 50: Drei verschiedene Aufsätze mit unterschiedlichen Spaltbreiten von links nach rechts – 0 mm (dichte Kappe); 0,5 mm; 1 mm

Da Propan schwerer als Luft ist, ist die Lage des Gehäuse-Lecks im Verhältnis zur Grundplatte oder zum DuT von Bedeutung. In der Praxis sind Lecks in Wärmepumpengehäusen meist linear und befinden sich genau an den Rändern des Gehäuses. Wie bereits erwähnt entsteht der Spalt auf einer Seite mit minimalem Aufwand. Das DuT wird innerhalb des Gehäuses auf einer 45-mm-Schicht angehoben, sodass der Spaltausgang 41,6 mm unterhalb der Oberfläche der Schwungradplatte des DuT liegt (Abbildung 51).

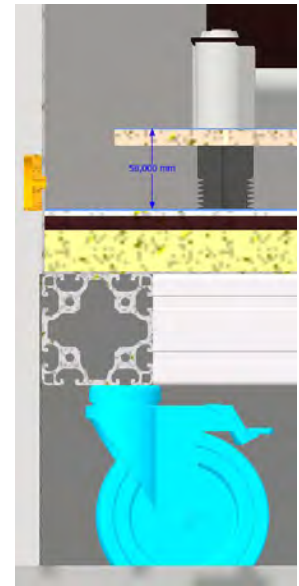
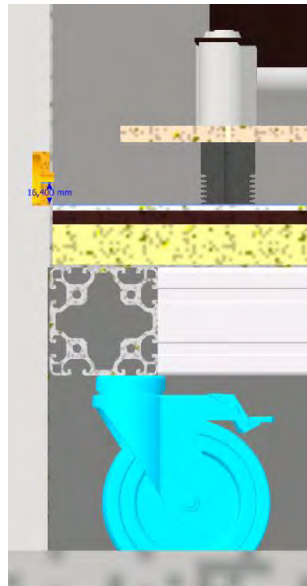
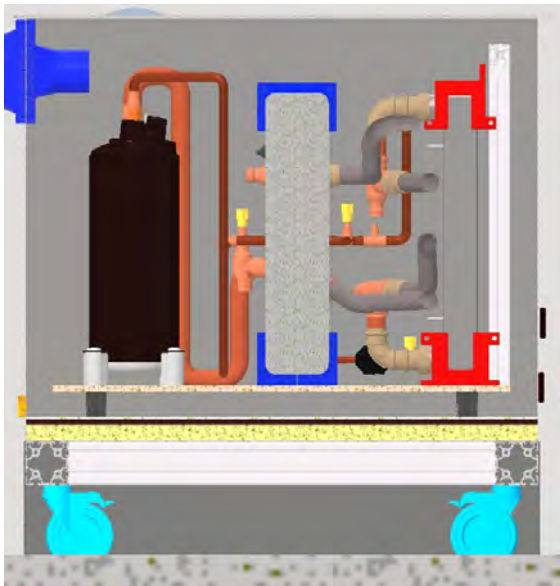


Abbildung 51: Höhenunterschied zwischen der Unterkante des Spaltes und der Oberfläche der Schwungradplatte

Dieser Spalt wird auch in Messkampagne 5 zur Verbindung des Drainageadapters verwendet.

Die Sicherheitskonzepte in den Messkampagnen 2–4 erfordern einen Zugang zum Schweißcontainer für Ab- und Zuluft. Zu diesem Zweck werden geeignete Öffnungen in den Schweißcontainer geschnitten, um ein handelsübliches Koaxial-Lüftungsrohr anzuschließen, und Löcher für die Befestigung des Adapters gebohrt. Die zweite Öffnung dient lediglich als Reserve. Beide Öffnungen können bei Bedarf mit abgedichteten Verschlusskappen verschlossen werden. In das Abluftrohr des Koaxialadapters kann ein explosionsgeschützter Ventilator integriert werden. Die Zuluft strömt in den Ringspalt (Abbildung 52).

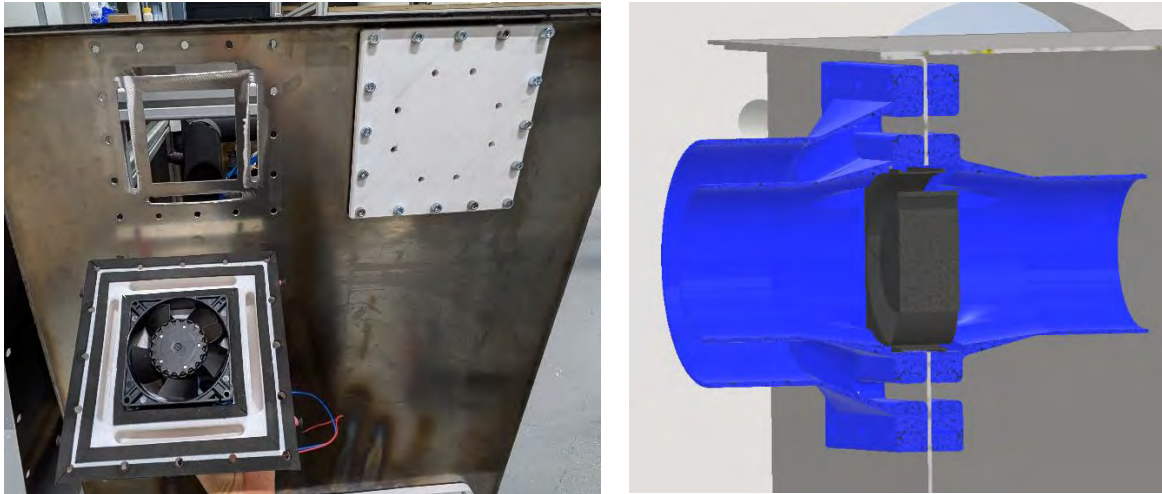


Abbildung 52: Gehäusedurchführung für Koaxialkabel, Integration eines Ex-Ventilators in die Abluft

2.3.3 Einbau einer Sicherheits-Einhausung in den Prüfraum

Für Innenraum-Wärmepumpen verfügt das Fraunhofer ISE über eine Prüfkammer, in der Leckagen simuliert und die dreidimensionale Verteilung und Konzentration des Kältemittels R290 gemessen werden können. Der austretende Leckagemassenstrom wird konditioniert und kann zwischen 0,1 und 12 g/s liegen. Die Prüfkammer selbst hat ein Volumen von 21,5 m³ und eine Grundfläche von 8,5 m² bei einer Höhe von 2,5 m. Sie ist mit einer großen Anzahl von Propankonzentrationsensoren ausgestattet, die an der Decke aufgehängt sind. Darüber hinaus sind 6 Konzentrationssensoren im Prüfobjekt positioniert, um die zeitliche Entwicklung der Propankonzentration im Prüfobjekt in 3 verschiedenen Höhen zu messen. Außerdem stehen 4 Differenzdrucksensoren und 4 Thermistoren zur Verfügung – alle entsprechen den Anforderungen für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen. Die gewonnenen Daten können zum Vergleich und zur Bewertung der verschiedenen Sicherheitskonzepte herangezogen werden. In diesem Raum ist die Wärmepumpe mit dem Sicherheitsgehäuse und den Außenabmessungen L/B/H 110x70x100 cm aufgestellt. Die Positionierung der Konzentrationssensoren ist für alle Kampagnen gleich, die im Folgenden einzeln besprochen werden (Abbildung 53). Die bodennahen Sensoren sind in einem Abstand von 1 cm aufgehängt. In der Nähe des Gehäuses befinden sich zusätzlich Sensoren in 45 cm und 85 cm Höhe um das DuT herum. Die Kammer verfügt über ein Belüftungssystem, das einen Unterdruck von bis zu 75 Pa erzeugt und einen Volumenstrom von über 650 m³/h bzw. eine Luftwechselrate (AER) von 30/h erzeugt. Es kann auf beliebige Werte eingestellt werden, beginnend bei 0,3 m³/h bzw. einer AER von 0,015/h.

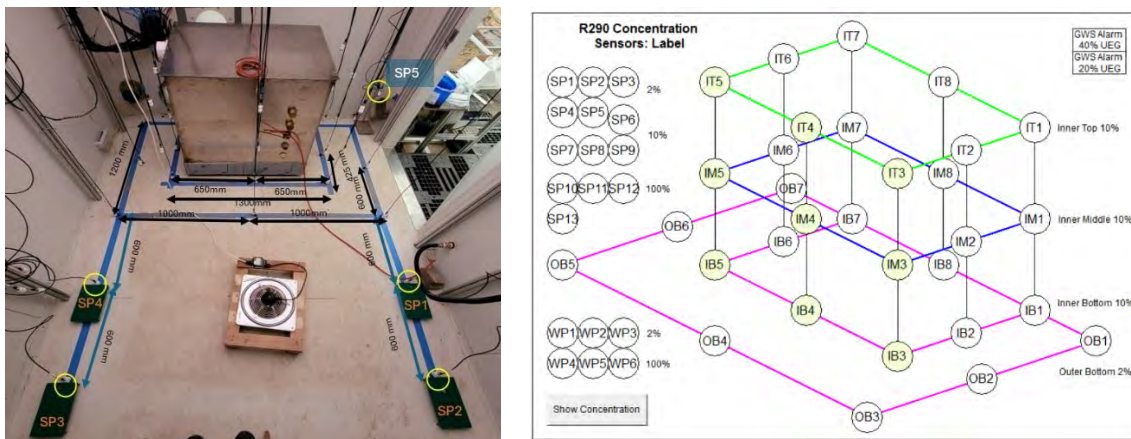


Abbildung 53: Übersicht über die Sensorpositionen im Prüfstand für Innenraum-Wärmepumpen

Alle Messkampagnen zur Freisetzung in die Außenluft finden auf einem weiteren Freisetzungsprüfstand für Außenwärmepumpen statt (Abbildung 54).



Abbildung 54: Verbindung zwischen den zwei Prüfständen für die Freisetzung – für die Innen- und Außenaufstellung von Wärmepumpen, Abstandsmessungen (rechts)

An dieser Abluftstelle im Außenbereich sind zudem mehrere Konzentrationssensoren installiert, um den Abluftstrom zu überwachen. Die Konzentrationssensoren sind radial angeordnet (Abbildung 55).



Abbildung 55: Übersicht über die Sensorpositionen im Prüfstand für Außenwärmepumpen

2.3.4 Beschreibung der getesteten Sicherheitskonzepte

In den folgenden Abschnitten werden die fünf Messkampagnen, die auf den realisierbarsten und vielversprechendsten Sicherheitskonzepten basieren, näher beschrieben und Messergebnisse gezeigt und interpretiert.

Die fünf Kampagnen sind:

- Referenzfall (Kampagne 1), siehe Abschnitt 2.3.4.1
- Konzept mit Zirkulationsluftstrom (Kampagne 2), siehe Abschnitt 2.3.4.2
- Standard-Sicherheitskonzept: externe Belüftung (Kampagne 3), siehe Abschnitt 2.3.4.3
- Schornsteinkonzept (Kampagne 4), siehe Abschnitt 2.3.4.4
- Drainage-Konzept (Kampagne 5), siehe Abschnitt 2.3.4.5

2.3.4.1 Referenzfall (Kampagne 1)

Die Versuche der Kampagne 1 dienen einer Referenzuntersuchung. Es wurden keine Sicherheitsmaßnahmen ergriffen. Ergebnisse eignen sich als Benchmark für die Beurteilung von effektiven Sicherheitsmaßnahmen, um die Effizienz der Absicherung zu bewerten.

2.3.4.1.1 Ziel

In der Kampagne 1 wird das Verhalten einer dichten Gasfreisetzung (R290/Propan) in das Gehäuse einer Wärmepumpe untersucht, von wo aus das Gas anschließend in den Raum gelangt. Die Versuche wurden ohne Sicherheitsmaßnahmen (wie eine aktive Belüftung nach außen) durchgeführt. Ziel ist es, die Gasschichtung, die Bildung brennbarer Atmosphären, die Wirksamkeit mechanischer Lüftung und baulicher Maßnahmen zu bewerten sowie Referenzfälle zu erstellen, die im Vergleich zu den anderen Kampagnen leichter mit CFD-Simulationen verglichen werden können. Die Versuche basieren auf den Anforderungen der EN 378, Anhang P (K1a: unbelüfteter oder schwach belüfteter Raum) und der IEC 60335-2-40, Anhang GG.3 (K1b: mechanisch belüfteter Raum).

2.3.4.1.2 Versuchsaufbau

Die Leckage in den Raum wurde über zwei unterschiedliche Schlitzöffnungen (0,5 oder 1 mm Höhe und 500mm Breite, was 2,5 oder 5 cm² entspricht; beide Werte gelten als typische kumulative Spaltflächen, wie in Abbildung GG.3 der IEC 60335-2-40, Anhang GG, dargestellt) in einer Höhe von 275 mm im Inneren des Wärmepumpengehäuses simuliert. Die Massenströme betrugen typischerweise 0,15 g/s, 1 g/s oder 3,3 g/s. Getestet wurde jeweils mit einer Füllmenge von bis zu 800 g. Die Luftwechselrate (AER) im Raum wurde systematisch variiert:

- 0 m³/h (keine Belüftung)
- 2,15 m³/h oder AER = 0,1/h (niedriger Wert – Neubauten)
- 10,75 m³/h oder AER = 0,5/h (Mindestwert gemäß TRGI-Anforderungen für zentrale Gasheizungen)
- 17,2 m³/h oder AER = 0,8/h (mechanische Lüftung, Anhang GG.3)

Ein wesentliches konstruktives Element war ein 16-mm-Spalt, der alle internen Komponenten voneinander trennte und die in modernen Wärmepumpen verwendete „schwimmende Bodenplatte“ simulierte. Der Raum unterhalb des Gehäuses wies aufgrund der zusätzlichen Rad- und Rahmenkonstruktion, die zur optimierten Handhabung zwischen verschiedenen Testaufbauten hinzugefügt wurde, einen großen Freiraum auf. Um den Einfluss auf die freie Konvektion des das Prüfobjekt (DuT) umgebenden Gases zu verringern, wurde eine leitfähige Folie hinzugefügt, um eine realistische Anordnung in einem Keller mit wenig Platz unterhalb der Wärmepumpe nachzubilden.

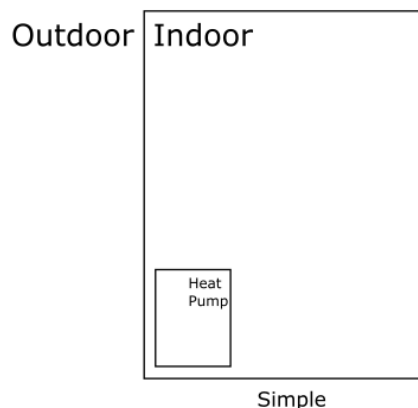


Abbildung 56: Links: LCR290-Demonstrator in seinem „dichten“ Gehäuse; oben am Demonstrator ist der interne Raumventilator zu sehen. Dieser wird für eine ideale Durchmischung im Aufstellungsraum eingesetzt, um eine Bilanzierung der aus dem Gehäuse freigesetzten Mengen zu bestimmen. Rechts: Schema zur Kampagne 1.

2.3.4.1.3 Versuchsanordnung

- K1a – Einfaches Leck in ruhender Luft: Ziel war es, die Gasschichtung und die Bildung brennbarer Atmosphären bei minimaler oder keiner Belüftung zu beobachten. (Luftwechselrate von 0,5 m³/h in Abbildung 57)
- K1b – Mechanisch belüfteter Raum: Hier wurde der Einfluss unterschiedlicher Luftwechselraten auf die Konzentrationsverteilung und die Sicherheit untersucht. (Luftwechselrate von ~10 und ~17 m³/h in Abbildung 57)

Die Versuche wurden beendet, sobald keine Schichtung und kein brennbares Gemisch mehr festgestellt werden konnten. Dies wurde durch Konzentrationsmessung und Differenzdrucküberwachung (dP) kontrolliert. Die Füllmenge wurde auf 300 g reduziert, um IEC 60335-2-40 Anhang GG.2 Formular GG.8 oder GG.14 Formular GG.39 zu erfüllen.

2.3.4.1.4 Versuchsablauf

- Systemvorbereitung: Einrichtung des Testraums und der Wärmepumpe, Anbringen der Lücke, Installation der Sensoren, Kalibrierung.
- Lecksimulation: Einleitung R290 in das Wärmepumpengehäuse gemäß den jeweiligen Parametern.
- Lüftungsvariation: Durchführung von Versuchen mit unterschiedlichen AER-Werten im Raum.
- Messung: Aufzeichnung von Konzentrationsprofilen, insbesondere im bodennahen Bereich des Raums.
- Nachbeobachtung: Analyse der Konzentrationsentwicklung nach Beendigung der Freisetzung.

2.3.4.1.5 Ergebnisse

Experiment	Air exchange ratio m³/h	Refrigerant charge g	Leakage mass flow g/s	Slot width mm	Risk	Time in seconds > 100% LFL					
						Distance 0,1m	0,3m	0,5m	1,0m	1,5m	
						2	3	4	5	6	
C1.23.unit	17,2	800	1	1	Shrinking risk	3752	3752	3752	3642	3518	
C1.08.unit	0,5	300	0,15	1		3615	3615	3615	3388	3061	
C1.14.unit	0,5	300	1	1		3372	3372	3372	3345	1397	
C1.05.unit	17,2	300	0,15	0,5		3019	3019	3019	2617	1959	
C1.09.unit	10,75	300	0,15	1		2980	2980	2980	2704	1981	
C1.21.unit	10,75	300	0,15	1		2980	2980	2980	2704	1981	
C1.04.unit	0,5	300	0,15	0,5		2959	2959	2959	2756	2372	
C1.10.unit	17,2	300	0,15	1		2838	2838	2838	2590	2062	
C1.06.unit	10,75	300	0,15	0,5		2600	2600	2600	2331	1756	
C1.07.unit	0,5	300	0,15	1		1702	1702	1702	1427	1070	
C1.24.unit	10,75	300	3,3	0		1325	1316	1316	589	585	
C1.15.unit	10,75	300	1	1		1313	1313	1313	1100	802	
C1.11.unit	0,5	300	1	0,5		1103	1103	1103	1101	909	
C1.16.unit	17,2	300	1	1		1049	1049	1049	833	729	
C1.13.unit	17,2	300	1	0,5		1001	1001	1001	733	435	
C1.12.unit	10,75	300	1	0,5		870	870	870	830	645	
C1.22.unit	17,2	300	3,3	1		613	603	603	453	330	
C1.20.unit	0,5	300	3,3	1		536	511	511	408	328	
C1.18.unit	10,75	800	3,3	0,5		304	275	275	231	143	
C1.19.unit	17,2	300	3,3	0,5		296	266	266	135	107	
C1.17.unit	0,5	800	3,3	0,5		281	261	261	218	213	

Abbildung 57: Messungen zu Kampagne 1 mit jeweiliger Darstellung der Zeiten mit Konzentrationen über 100% untere Explosionsgrenze (LFL), abhängig vom Abstand zum DuT.

Die erreichten Reynolds-Zahlen für die drei getesteten Leckraten liegen für 0,15g/s zwischen 30-70, für 1g/s zwischen 220-430 und für 3,3g/s zwischen 725 und 1400 und somit alle im laminaren bis anfänglichen Übergangsbereich zwischen laminar und turbulent. Jede Form der Wirbelbildung sorgt für einen zusätzlichen Stofftransport und eine Durchmischung mit der umgebenden Raumluft. Der verwendete Schlitz im Gehäuse zur Simulation kumulierter Querschnitte, die in typischen Gehäusen von Wärmepumpen insgesamt zu finden sind, wurde senkrecht in die Gehäusewand eingebracht. Ein direktes Herabströmen an der Wandung (Coanda-Effekt) ist dadurch eher unwahrscheinlich. Nichtsdestotrotz fließt die Mischung aus Propan und Luft nahezu ungestört heraus, sinkt zu Boden und erfährt nur geringe Durchmischung, was zu einer stabilen, höher konzentrierten Schwergasschicht in Bodennähe führt. Der Einfluss ist auch deutlich stärker als der Einfluss der Luftwechselrate im Aufstellungsraum.

2.3.4.1.6 Zusammenfassung

Die Kampagne 1 liefert grundlegende Erkenntnisse über das Verhalten von Freisetzungen dichter Gase (R290) über die Wärmepumpe in Räumen mit und ohne mechanische Lüftung. Die Ergebnisse zeigen, wie sich Luftwechselrate, Schlitzgeometrie, Kältemittelfüllmenge und konstruktive Maßnahmen auf die Schichtung und die Bildung brennbarer Atmosphären auswirken. Die Versuche mit höheren AER-Werten und größeren Füllmengen erweitern den Umfang der Kampagne und unterstützen die Sicherheitsbewertung moderner Wärmepumpensysteme.

Grundsätzlich lässt sich ohne Schutzmaßnahmen in einem Aufstellungsraum darstellen, dass eine langsame Strömung bei kleinen Leckageraten im laminaren bis gering turbulenten Bereich aus dem Schlitz einen größeren Einfluss auf das Erreichen eines zündfähigen Gemisches aufweist als eine voll turbulente Ausströmung, die direkt nach dem Austritt aus dem Gehäuse (Schlitz) eine gute Durchmischung mit der Raumluft erfährt, so dass das Zeitfenster zündfähiger Gemische geringer ausfällt. Der Effekt hat auch einen deutlich höheren Einfluss als die Anwendung einer besseren Luftwechselrate im Aufstellungsraum. Für Wärmepumpenhersteller ist somit die kontrollierte Bauweise von Gehäusen und deren Dichtheit ein maßgeblicher Einflussfaktor, um die Gefährdungen im Aufstellungsraum schon durch intrinsische, passiv wirkende Maßnahmen zu verringern.

2.3.4.2 Konzept mit Zirkulationsluftstrom (Kampagne 2)

2.3.4.2.1 Ziel

In einem geschlossenen Raum kann eine Wärmepumpe mit einem ausreichend starken integrierten Zirkulationsluftstrom im Umluftbetrieb ebenfalls die Sicherheitsanforderungen gemäß IEC 60335-2-40 Anhang GG.2.3 erfüllen. In diesem Fall begrenzt die Größe des Raums die zulässige Propangasmenge und damit die Größe der Wärmepumpe. Daher wurde getestet, inwieweit diese Grenze ausgereizt werden kann. Gemäß der Norm ist im Raum nur eine Menge von 350 g zulässig. Es wurden jedoch auch Fälle mit bis zu 800 g getestet, um die gewünschte Füllmenge für die thermischen Leistungsmessungen abzubilden.

2.3.4.2.2 Versuchsaufbau

Das Konzept basiert auf der Idee, dass ein starker Luftstromimpuls, der durch einen am Gehäuse montierten Ventilator erzeugt wird, das Propan ausreichend mit der Raumluft vermischt, um die Konzentration in der unmittelbaren Umgebung des DuT und im Raum dauerhaft unter der UEG zu halten. Der dafür erforderliche Volumenstrom beträgt 140 m³/h (siehe Formel GG.15 in IEC 60335-2-40, Edition 8). Zum Vergleich wurden auch 0, 40 und 75 m³/h getestet.

Da die Einlass- und Auslassöffnungen des 3D-gedruckten Adapterverbindungsrohrs und des Gehäuses nicht ausreichend voneinander getrennt sind, ist zusätzlich ein Schlauch an die innere Abluftöffnung angeschlossen, der zum inneren Gehäuseboden/unteren Volumen führt (Abbildung 58 (rechts)). Bei einem ausreichend dichten Gehäuse wäre es jedoch vorteilhaft, diesen Teil wegzulassen, um das Propan langsamer in den Raum abzugeben. Dies würde die Konzentration am Auslass weiter verringern.

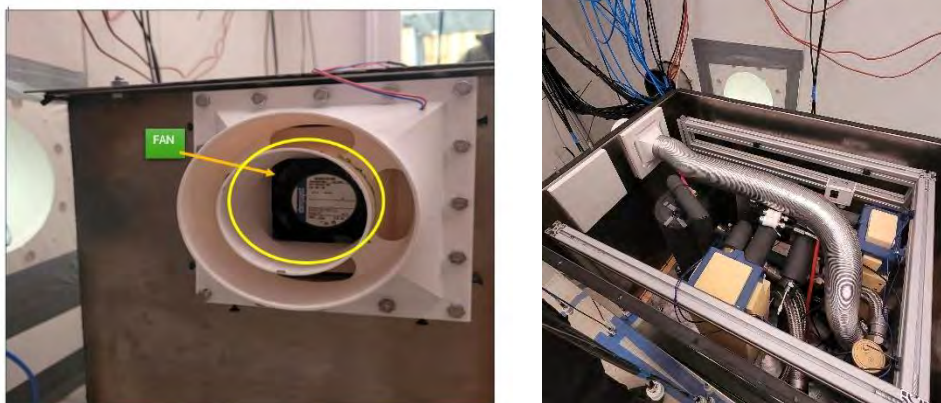


Abbildung 58: Einbauort des Umwälzventilators (links) Schlauchverlängerung nach unten (rechts)

Mit einem der verfügbaren ATEX-zertifizierten Ventilatoren konnte ein Volumenstrom von nur 75 m³/h realisiert werden. Daher wurde ein zweiter Ventilator parallel integriert (siehe Abbildung 59).

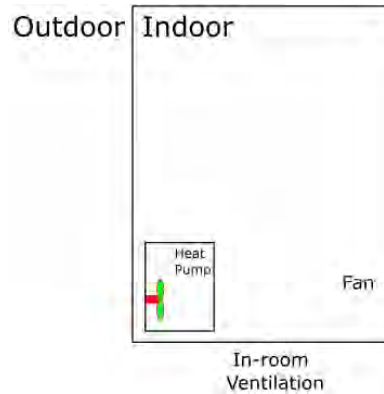
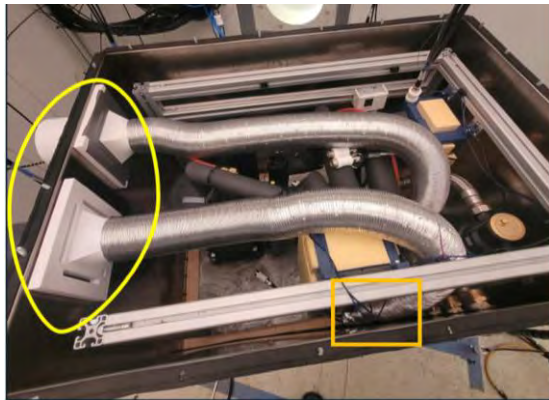


Abbildung 59: Links: Parallelbetrieb der Ventilatoren. Rechts: Schema der Kampagne 2.

Weitere Testparameter:

- Entlüftungsbohrung 0 oder 7 mm²
- Durchflussrate: 0,15 oder 1 oder 3,3 g/s
- Schlitz: 0,5 mm
- Volumenstrom der Raumlüftung: 0 oder 2,15 oder 10,75 oder 17,2 m³/h

2.3.4.2.3 Ergebnisse

Experiment	Air exchange ratio	Refrigerant charge	Leakage mass flow	Slot width	Air flow fan (mixing, external)	Bleed hole	Time in seconds > 100% LFL					
	m ³ /h	g	g/s	mm	m ³ /h	mm	0,1m	0,3m	0,5m	1,0m	1,5m	
C2.27.unit	2,15	800	3,3	0,5	140	0	3908	3902	3881	3880	3872	Shrinking risk
C2.26.unit	0	800	3,3	0,5	140	0	3896	3896	3858	3849	3808	
C2.22.unit	2,15	800	3,3	0,5	140	7	3888	3888	3877	3876	3856	
C2.36.unit	2,15	800	1	0,5	0	0	3852	3768	3760	3669	3629	
C2.13.unit	0	800	1	0,5	40	0	3808	3756	3756	3741	3691	
C2.12.unit	2,15	800	1	0,5	0	0	3806	3806	3735	3735	3660	
C2.16.unit	2,15	800	1	0,5	75	0	3764	3764	3764	3764	3696	
C2.32.unit	2,15	800	1	0,5	75	0	3718	3718	3679	3665	3544	
C2.02.unit	0	800	0,15	0,5	0	0	3386	2593	2486	2400	2117	
C2.11.unit	0	800	1	0,5	0	0	2993	2983	2938	2930	2863	
C2.03.unit	2,15	800	0,15	0,5	0	0	2817	2817	2536	2449	2251	
C2.05.unit	2,15	800	0,15	0,5	40	0	2714	2187	2058	2058	1698	
C2.14.unit	2,15	800	1	0,5	40	0	2580	2551	2551	2539	2466	
C2.35.unit	2,15	800	1	0,5	40	0	2475	2475	2467	2456	2366	
C2.18.unit	0	800	1	0,5	140	0	2472	2451	2431	2404	2361	
C2.20.unit	10,75	800	1	0,5	140	0	2461	2401	2376	2371	2320	
C2.17.unit	10,75	800	1	0,5	75	0	2440	2440	2440	2431	2370	
C2.33.unit	10,75	800	1	0,5	75	0	2440	2440	2398	2389	2291	
C2.19.unit	2,15	800	1	0,5	140	0	2433	2392	2346	2344	2295	
C2.08.unit	0	800	0,15	0,5	75	0	2393	1891	1817	1817	1548	
C2.15.unit	0	800	1	0,5	75	0	2318	2318	2302	2292	2234	
C2.28.unit	10,75	800	3,3	0,5	140	0	2297	2297	2263	2255	2207	
C2.09.unit	2,15	800	0,15	0,5	75	0	2146	1793	1721	1721	1278	
C2.01.unit	0	800	0,15	0	0	0	1969	1969	1969	1969	1480	
C2.23.unit	10,75	800	3,3	0,5	140	7	1643	1641	1616	1612	1585	
C2.34.unit	10,75	800	0,15	0,5	75	0	833	823	823	823	0	
C2.24.unit	2,15	300	3,3	0,5	140	7	2171	945	922	559	213	
C2.25.unit	10,75	300	3,3	0,5	140	7	1348	1172	1003	970	283	
C2.21.unit	10,75	300	0,15	0,5	140	7	982	0	0	0	0	
C2.06.unit	0	300	0,15	0,5	140	0	962	0	0	0	0	
C2.07.unit	2,15	300	0,15	0,5	140	0	0	0	0	0	0	
C2.10.unit	10,75	300	0,15	0,5	140	0	0	0	0	0	0	

Abbildung 60: Messungen zu Kampagne 2 mit jeweiliger Darstellung der Zeiten mit Konzentrationen über 100% untere Explosionsgrenze (LFL), abhängig vom Abstand zum DuT.

Die Versuche der Kampagne 2 untersuchen das Sicherheitskonzept „Zirkulationsluftstrom“ nach IEC 60335-2-40 Anhang GG.2.3, bei dem ein integrierter Ventilator das Gehäuseinnere aktiv mit der Raumluft des Aufstellungsraums durchmischt. Anders als in Kampagne 1 wurden hier gezielt unterschiedliche Füllmengen (300 g, 800 g), Leckageraten (0,15 / 1 / 3,3 g/s) und Umluftvolumenströme (0, 40, 75 und 140 m³/h) kombiniert.

Ein grundsätzlicher Hinweis zur Einordnung der Füllmenge: gemäß IEC 60335-2-40 GG.2.3 gilt für den vorliegenden Raum ($A = 8,5 \text{ m}^2$) mit einem Konzentrationsfaktor von $CF = 0,5$ und der Unteren Explosionsgrenze für R290 von $0,038 \text{ kg/m}^3$ eine zulässige Höchstfüllmenge von maximal 355 g.

Die verwendete Wärmepumpe benötigt betriebsbedingt 800 g, was in einem Raum dieser Größe unter dem Konzept GG.2.3 grundsätzlich nicht zulässig wäre. Da nur ein einziger Demonstrator zur Verfügung stand, wurde – abweichend von der ansonsten fixen Betrachtung mit 800 g – zusätzlich mit 300 g getestet, also innerhalb der nach GG.2.3 für diesen Raum tatsächlich zulässigen Grenze. Die 800-g-Versuche sind daher als bewusste Überlast-/Worst-Case-Betrachtung außerhalb des zulässigen Anwendungsbereichs zu lesen, während die 300-g-Versuche die eigentliche Konzeptprüfung darstellen.

Innerhalb dieses zulässigen Bereichs zeigt sich das Konzept als wirksam: Bei 300 g, geringer, praxisnaher Leckagerate von 0,15 g/s und ausreichendem Umluftvolumenstrom von 140 m³/h (C2.07, C2.10, s. letzte zwei Zeilen in Abbildung 60) liegt die Konzentration an allen Sensoren rund um die Wärmepumpe über die gesamte Distanz von 0,1 bis 1,5 m dauerhaft unterhalb der UEG (Zeit = 0 s). Diese Parameterkombinationen sind damit als „sicher“ einzustufen. Bei fehlendem Raumlufthauswechsel ($AER = 0$, C2.06) bzw. mit zusätzlicher Bleed-Hole-Öffnung (C2.21) verbleibt lediglich unmittelbar am Gehäuse im Abstand von 0,1 m eine kurzzeitige UEG-Überschreitung von ca. 15 min Dauer, während im übrigen Nahfeld keine zündfähige Atmosphäre nachweisbar ist. Der ordnungsgemäße Betrieb des Sicherheitssystems – Ansaugung im Gehäuse, Erzeugung eines Unterdrucks und Ausblasen des verdünnten Gemischs – konnte damit nachgewiesen werden. Der Einfluss der übrigen Öffnungen (Bleed Hole, Schlitz) tritt gegenüber dem vom Ventilator erzeugten Unterdruck in den Hintergrund.

Die 800-g-Versuche bestätigen dagegen die Erwartung: Das nach GG.4 für eine 800-g-Maschine anzusetzende Worst-Case-Leck von 3,3 g/s (z. B. C2.26–C2.28) sowie bereits die 1-g/s-Fälle führen zu ausgeprägten und lang anhaltenden UEG-Überschreitungen im Bereich von etwa 2 200 bis über 3 900 s über nahezu alle Distanzen. Konsequenterweise würde die zur Einhaltung von GG.2.3 notwendige Reduktion auf ca. 355 g auch nur noch ein Worst-Case-Leck von rund 1,5 g/s zulassen; höhere Leckraten liegen außerhalb des zulässigen Anwendungsrahmens.

Setzt man den Volumenstrom durch die Leckrate und den Volumenstrom durch den Betrieb des Ventilators ins Verhältnis lassen sich aufgrund der Unterschiede in diesen Volumenströmen Annahmen zu einer idealen Durchmischung treffen. Sowohl bei 1 g/s Leckrate und 140 m³/h Volumenstrom als auch bei 0,15 g/s Leckrate und 75 % Volumenstrom sollte bei einer idealen Durchmischung das Erreichen der Unteren Explosionsgrenze unmöglich sein. Davon sind die Versuchsergebnisse jedoch weit entfernt:

- **1 g/s bei 140 m³/h:** (C2.18–C2.20): die Untere Explosionsgrenze wird bis > 2400 s überschritten in allen Abständen um das aufgestellte Gerät herum.
- **0,15 g/s bei 75 m³/h** (C2.08, C2.09, C2.34): zündfähige Gemische werden bis zu 820 s bis in 1,0 m (C2.34) Abstand gemessen.

Der Grund liegt in Totzonen und einer bodennahen, vom Ventilatorkreislauf nicht vollständig erfassten Restschicht: Der Freistrahle mischt lokal gut ein, der Ventilator dominiert die Massenbilanz mühelos – aber nur ein Teil des Gehäusevolumens nimmt real am Austausch teil. Durch den weiterhin offenen Bodenschlitz kann dabei ein nicht gut durchmisches Propan-Luft-Gemisch durch den Schlitz austreten und sich laminar höher konzentriert um das Gerät herum ausbreiten.

Sicherheit ist nicht nur allein durch veränderte Druckverhältnisse und das Beimischen von Luft gegeben, sondern allein durch ein hinreichend kleines Verdünnungsverhältnis unter Berücksichtigung einer kontrolliert eingestellten, aktiven Verdünnung im Gehäuse und über das Gehäuse hinaus.

2.3.4.2.4 Zusammenfassung

Für die nach GG.2.3 tatsächlich zulässige Füllmenge von 300 g konnte der wirksame Betrieb des Sicherheitskonzepts „Zirkulationsluftstrom“ in Teilen nachgewiesen werden: Bei 140 m³/h Umluftvolumenstrom und praxisnaher Leckagerate von 0,15 g/s wurde im gesamten Nahfeld keine zündfähige Atmosphäre festgestellt (Dauer der Überschreitung eines zündfähigen Gemisches: Zeit = 0 s); lediglich unmittelbar unter der Gehäusedurchführung trat bei fehlendem Raumlufthauswechsel bzw. geöffnetem Bleed Hole eine kurzzeitige, lokal begrenzte UEG-Überschreitung von bis zu ca. 15 min auf. Die bewusst mit 800 g durchgeführten Versuche liegen außerhalb des zulässigen Anwendungsbereichs und führen bei 1 g/s und 3,3 g/s erwartungsgemäß zu deutlichen, dauerhaften Überschreitungen. Dies bestätigt die in der Norm mit massiven Voruntersuchungen definierten Randbedingungen, die als Anwendungsbereich dieses Konzepts des „circulation airflow“ gelten.

Physikalische Kernaussagen:

- Die Leckage tritt als Freistrahle mit hohem Impuls in das Gehäuse ein und mischt sich dort ab Beginn turbulent mit der Innenluft.
- Der Ventilator wirkt dem Druckaufbau entgegen, kann jedoch den Impuls des Freistrahls nicht abbauen, so dass eine Verteilung im Gehäuseinneren maßgeblich durch den Freistrahle beeinflusst wird.
- Die Absaugung aus dem Gehäuseinneren ist im Bodenbereich nicht ideal. Dies führt zu einer höher konzentrierten Schwergasschicht, die über den Schlitz, der sich auf Höhe des Gehäusebodens befindet, austreten kann.
- Eine Durchmischung des Raumvolumens erfolgt nur bei hoher Luftwechselrate in einem Maße, dass die Schwergasschicht im Raum abgebaut wird.

Die Daten zeigen, dass sichere Bedingungen im Aufstellungsraum bei Leckagen mit 0,15 g/s bei 140 m³/h festgestellt werden konnten.

Im Vergleich zur Kampagne 1 ist das Konzept der Luftumwälzung in Kampagne 2 nur sicherer, wenn der normativ notwendige Umwälzvolumenstrom von 140 m³/h und die erlaubte Füllmenge von unter 350 g (im getesteten Fall 300 g) eingehalten werden.

Praktische Bewertung: Das Konzept nach GG.2.3 ist für R290-Wärmepumpen tragfähig, jedoch strikt gebunden an

(a) die Einhaltung der zulässigen Füllmenge (hier ~355 g bzw. korrespondierend max. ~1,5 g/s Worst-Case-Leck) und

(b) einen ausreichend dimensionierten, sicher überwachten Umluftvolumenstrom.

Konstruktiv sollten Totzonen im Gehäuse und eine bodennahe Ansaugung adressiert werden, um die Durchmischung zu verbessern.

2.3.4.3 Standard-Sicherheitskonzept: externe Belüftung (Kampagne 3)

Diese Kampagne 3 widmet sich der Untersuchung der aktiven Belüftung eines Gehäuses mit Ventilator. Details zu den getesteten Varianten, siehe Abschnitt 2.3.4.3.3 zu den Belüftungskonzepten A, B und C.

2.3.4.3.1 Ziel

Die Kampagne 3 hatte zum Ziel, den Einfluss verschiedener Belüftungskonzepte auf die Verteilung und den Abbau von R290-Konzentrationen (Propan) nach einem Leckageereignis in einem geschlossenen Testobjekt zu untersuchen. Die Konzepte A, B und C unterscheiden sich in ihrem Belüftungsansatz und ihren Sicherheitsmechanismen. Diese Versuche wurden konzipiert, um Maßnahmen zur Minderung der Bildung explosionsfähiger Atmosphären durch Belüftung und den in den Anhängen PP und GG der IEC 60335-2-40 dargelegten technischen Anforderungen zu bewerten.

2.3.4.3.2 Versuchsaufbau

Das Testobjekt wies eine definierte Leckstelle auf, die sich am U-Bogen der Saug- oder Druckleitung befand („niedrige Leckposition“). R290 wurde mit einem konstanten Massenstrom von 3,3 g/s und einer typischen Schlitzbreite von 0,5 mm freigesetzt. In ausgewählten Versuchen wurde eine zusätzliche Entlüftungsöffnung mit einer Fläche von bis zu 7 mm² eingebaut. Die Luftwechselrate (AER) im Prüfraum variierte zwischen 0 m³/h (keine externe Belüftung) und 10,75 m³/h. Die interne Belüftung (vom Gehäuse zum Prüfraum) erfolgte über einen Ventilator, der je nach Testkonfiguration mit 9 m³/h oder 27 m³/h betrieben wurde.

Die Abluft wurde über einen Koaxialkanal abgeleitet, wobei der innere Kanal für die R290-Ableitung und der äußere Kanal für die Frischluftzufuhr genutzt wurde. Die Konzentrationsmessungen wurden mit den zuvor erwähnten Propan-Konzentrationsensoren durchgeführt, die sowohl im Kanal als auch um das Testobjekt herum positioniert waren, wie zuvor angegeben. Schematisch ist der Aufbau in Abbildung 61 dargestellt.

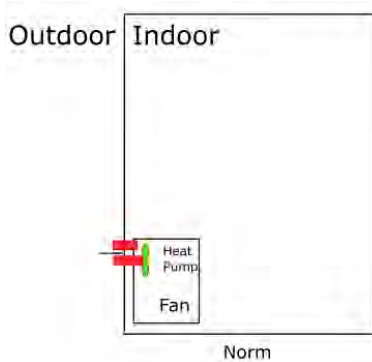


Abbildung 61: Schema zu Sicherheitskonzept Kampagne 3

Konzept C ist eine Abwandlung von A, bei der anstelle des Schlitzes lediglich eine Sicherheitsklappe verwendet wird, um den Luftwiderstand beim Schließen im Falle eines Bruchlecks zu verringern, bei dem der Innendruck vorübergehend höher ist.



Abbildung 62: Lufteinlass und Bypass-Sperring

Der Einlasspunkt für die Zuluft (weißer Koaxialstecker mit Wabenstruktur, siehe linkes Bild in Abbildung 62) befindet sich unterhalb des Auslasspunkts. Ein Kurzschluss wird durch einen nach oben gerichteten Kragen verhindert, der als Auffangbecken für das entweichende Gas dient (siehe rechtes Bild Abbildung 62).

2.3.4.3.3 Belüftungskonzepte

- Konzept A – Kontinuierliche Belüftung: Das Testobjekt wurde während und nach dem Freisetzungseignis kontinuierlich belüftet. Ziel war es, die Konzentrationsverteilung und den Abbau des Kältemittels bis zu 30 Minuten nach der Freisetzung zu überwachen, wobei besonderes Augenmerk darauf gelegt wurde, Werte unterhalb der unteren Entzündbarkeitsgrenze (LFL) zu erreichen.
- Konzept B – Durch Leckageerkennungssystem (LDS) gesteuerte Belüftung: Die Wirksamkeit eines LDS bei der Steuerung der Belüftungsaktivierung nach einer Leckage wurde bewertet. Der Ventilator wurde bei Erreichen eines Schwellenwerts für die Konzentration ausgelöst, wobei die Aktivierungszeiten auf Anhang PP der IEC 60335-2-40 basierten.
- Konzept C – Kontinuierliche Belüftung mit Rückschlagventil: Die kontinuierliche Belüftung wurde mit dem Einbau eines Rückschlagventils (Dalap DN80, grün, geringe magnetische Haltekraft) kombiniert, um einen Rückfluss des Gases zu verhindern und die Systemsicherheit zu erhöhen.

2.3.4.3.4 Versuchsablauf

- Systemvorbereitung: Aufbau des Testaufbaus, Installation der Sensoren und Kalibrierung.
- Lecksimulation: Einleitung von R290 gemäß den definierten Parametern.
- Aktivierung des Lüftungskonzepts: Je nach Konzept (kontinuierlich, LDS-gesteuert oder mit Rückschlagventil).
- Messung: Aufzeichnung der Konzentrationsprofile im Testobjekt, im Abluftkanal und in der Umgebung.
- Nachbeobachtung: Überwachung des Konzentrationsabfalls bis zu 30 Minuten nach der Freisetzung oder bis die UEG unterschritten wurde.

2.3.4.3.5 Ergebnisse

Experiment	Air exchange ratio	Refrigerant charge	Leakage mass flow	Slot width	Air flow fan (mixing, external)	Bleed hole	Venturi scrubber	Drain check valve	Shrinking risk	Time in seconds > 100% LFL					
	m³/h	g	g/s	mm	m³/h	mm	-	-		0,1m	0,3m	0,5m	1,0m	1,5m	6
C3.17.unit	2,15	800	3,3	0,5	9	0	0 (continuous)	No		2	3	4	5		6
C3.02.unit	10,75	800	3,3	0,5	9	0	0 (continuous)	No		439	439	298	174	135	
C3.03.unit	2,15	800	3,3	0,5	9	0	0 (continuous)	No		324	296	226	112	78	
C3.01.unit	0	800	3,3	0,5	9	0	0 (continuous)	No		219	219	135	44	0	
C3.22.unit	2,15	800	3,3	0,5	9	0	0 (continuous)	No		214	204	81	0	0	
C3.04.unit	0	800	1	0,5	27	0	15	No		185	185	107	52	0	
C3.05.unit	10,75	800	1	0,5	27	0	0 (continuous)	No		0	0	0	0	0	
C3.06.unit	2,15	800	1	0,5	27	0	0 (continuous)	No		0	0	0	0	0	
C3.07.unit	0	800	1	0	27	0	0 (continuous)	No		0	0	0	0	0	
C3.08.unit	10,75	800	1	0	27	0	0 (continuous)	No		0	0	0	0	0	
C3.09.unit	2,15	800	1	0	27	0	0 (continuous)	No		0	0	0	0	0	
C3.10.unit	0	800	3,3	0	27	0	0 (continuous)	No		0	0	0	0	0	
C3.11.unit	10,75	800	3,3	0	27	0	0 (continuous)	No		0	0	0	0	0	
C3.12.unit	2,15	800	3,3	0	27	0	0 (continuous)	No		0	0	0	0	0	
C3.13.unit	0	800	0,15	0,5	27	0	0 (continuous)	No		0	0	0	0	0	
C3.14.unit	0	800	3,3	0,5	27	0	0 (continuous)	No		0	0	0	0	0	
C3.15.unit	10,75	800	3,3	0,5	27	0	0 (continuous)	No		0	0	0	0	0	
C3.16.unit	2,15	800	3,3	0,5	27	0	0 (continuous)	No		0	0	0	0	0	
C3.18.unit	2,15	800	3,3	0,5	27	0	0 (continuous)	No		0	0	0	0	0	
C3.19.unit	0	800	3,3	0,5	27	7	0 (continuous)	No		0	0	0	0	0	
C3.20.unit	2,15	800	3,3	0,5	27	7	0 (continuous)	No		0	0	0	0	0	
C3.21.unit	2,15	800	3,3	0,5	27	0	15	No		0	0	0	0	0	
C3.23.unit	2,15	800	3,3	0,5	27	0	30	No		0	0	0	0	0	
C3.24.unit	2,15	800	3,3	0,5	27	0	60	No		0	0	0	0	0	
C3.25.unit	0	800	3,3	0	27	0	0 (continuous)	Yes		0	0	0	0	0	
C3.26.unit	2,15	800	3,3	0	27	0	0 (continuous)	Yes		0	0	0	0	0	
C3.27.unit	0	800	3,3	0	9	0	0 (continuous)	Yes		0	0	0	0	0	
C3.28.unit	0	800	3,3	0	9	0	0 (continuous)	Yes		0	0	0	0	0	
C3.29.unit	2,15	800	3,3	0	27	0	0 (continuous)	Yes		0	0	0	0	0	

Abbildung 63: Messungen zu Kampagne 3 mit jeweiliger Darstellung der Zeiten mit Konzentrationen über 100% untere Explosionsgrenze (LFL), abhängig vom Abstand zum DuT.

Die Kampagne 3 untersucht das klassische, in der Praxis am häufigsten angewandte Sicherheitskonzept: das belüftete Gehäuse mit Abluft ins Freie nach IEC 60335-2-40, Anhang GG.4 („mechanical ventilation within the

appliance enclosure"). Anders als in der Kampagne 1 (passiv) und der Kampagne 2 (aktive Umwälzung im Raum, GG.2.3) wird das ausgetretene R290 hier nicht im Raum verdünnt, sondern über einen Koaxialkanal aus dem Gehäuse abgesaugt und an der Fassade freigesetzt. Alle Versuche wurden mit 800 g Füllung durchgeführt; variiert wurden Leckrate (0,15 / 1 / 3,3 g/s), Schlitzbreite (0 / 0,5 mm), interner Ventilator-Durchsatz (9 / 27 m³/h), Raumlftwechsel (0 / 2,15 / 10,75 m³/h) sowie in Einzelfällen ein einzelnes Bleed Hole (7 mm²), dass das Leerströmen des Gehäuses über längere Zeiträume sicherstellen soll.

Der Ventilator erzeugt im Gehäuse einen Unterdruck (nach IEC 60335-2-40, Anhang GG.4 ist mindestens ≥ 20 Pa gefordert). Raumlft wird deshalb bei vorhandenen kumulierten Querschnittsöffnungen des Gehäuses angesaugt. Das bodennah austretende, Propan wird direkt am Gehäuseboden von den angeschlossenen Luftkanälen erfasst und über den inneren Kanal ins Freie abgeführt. Außen ist eine Rückströmung konstruktiv vermieden.

Das freistrahlabedingte Impuls-Entrainment (choked flow) wirkt zwar weiterhin im Gehäuse, ist hier für die Raumsicherheit aber unerheblich, da praktisch die gesamte freigesetzte Masse abgesaugt wird. Sicherheit wird bei diesem Versuchskonzept nicht hauptsächlich durch eine gute Durchmischung erreicht, sondern durch die Bedingung, dass der Absaugvolumenstrom Q die freigesetzte Kältemittelmenge sicher abtransportiert, bevor sie den Schlitz nach außen (in den Raum) überwinden kann.

Der erforderliche Mindest-Absaugvolumenstrom ergibt sich aus Formel (GG.16) mit dem Konzentrationsfaktor $CF = 0,25$.

Tabelle 12: Geltende Bedingungen für den Absaugvolumenstrom eines belüfteten Gehäuses.

mleak	Qmin nach GG.4	Ventilator 9 m³/h	Ventilator 27 m³/h
0,15 g/s	~2 m³/h (Untergrenze)	erfüllt	Erfüllt
1 g/s	~8,0 m³/h	knapp erfüllt	Erfüllt
3,3 g/s	~26,4 m³/h	nicht erfüllt	knapp erfüllt

Die Messungen bestätigen das GG.4-Kriterium:

- **27 m³/h Absaugung:** in allen Versuchen wurde unabhängig von Leckrate, Schlitzbreite, Raumlftwechsel und Bleed Hole keinerlei Überschreitung der UEG festgestellt (Zeit = 0 s über alle Distanzen; z. B. C3.04–C3.16, C3.18–C3.29). Dies deckt sich selbst mit einer Entlüftung von nur 26,4 m³/h, welche nur knapp oberhalb der Anforderung liegt.
- **9 m³/h Absaugung:** Hier liegt der Durchsatz weit unter dem erforderlichen Q_{min} . Erwartungsgemäß treten Überschreitungen auf – im Nahfeld (0,1 m) 185–439 s (C3.01, C3.02, C3.03, C3.17, C3.22), mit rascher Abnahme über die Distanz. Die Absaugung reicht nicht aus, ein Teil des Freistrahls kann sich aufgrund des vorhandenen Impulses über Gehäuseöffnungen im Aufstellungsraum zündfähige Gemische ausbilden.

2.3.4.3.6 Zusammenfassung

Die Kampagne 3 liefert Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit verschiedener Lüftungsstrategien für die sichere Ableitung von R290 nach einem Leck. Die Variation der Parameter – darunter Luftwechselrate, Schlitzbreite, Leckrate, interne Belüftung und Integration eines Rückschlagventils – ermöglicht eine detaillierte Bewertung der Sicherheitsrelevanz und Eignung jedes Konzepts für unterschiedliche Anwendungsszenarien.

Die Kombination aus Unterdruck-Extraktion und GG.4-Volumenstrom ist robust sicher, sobald $Q \geq Q_{min}$ ausgelegt wird. Darunter kippt es proportional zur Leckrate. Bei den getesteten Gehäuseöffnungen konnte keine zusätzliche Gefährdung festgestellt werden.

IEC 60335-2-40, Anhang GG.4 bildet die Grundlage dieser Kampagne. Konzept A ist aufgrund ihrer Einfachheit und Wirksamkeit ein bereits häufig angewandtes Sicherheitskonzept, dessen Sicherheit nochmals bestätigt

werden konnte. Das Fraunhofer ISE implementierte ein einziges koaxiales Rohr in Form eines LAS (Luft/Abgas-System), das die Luft aus dem Raum in den Schlitz saugt und im Innenrohr potenziall kontaminierte Luft abbläst. Die Ausführung wurde dabei in Edelstahl anstelle des häufig auch eingesetzten Polypropylen gewählt, um bei kontinuierlicher Belüftung eine Wärmerückgewinnung zu ermöglichen. Im Falle von Leckagen wurde das ausgetretene Propan vom Gehäuseboden direkt an einem Fassadensimulator ausgeblasen, wo es freigesetzt wurde. Die Freisetzung an der Fassade ergab stets unkritische Ergebnisse, da das Gas bereits gründlich mit Luft vermischt war, was jedoch auch durch eine Ausblasstelle in knapp 3,5 m Höhe erreicht wurde. Eine getrennte Rohrführung könnte ebenfalls implementiert werden. Dies würde jedoch aufgrund fehlender Wärmerückgewinnung den Energieverlust bedeuten und nicht unbedingt einfacher in der Montage. Konzept B wird für maximale Effizienz empfohlen, erfordert jedoch zusätzlich ein Leckageerkennungssystem. Das Leckageerkennungssystem muss gemäß IEC TS 63542 ausgelegt und hergestellt sein sowie die Anforderungen gemäß IEC 60335-2-40, Anhang MM und Anhang PP erfüllen. In dem untersuchten Fall wurde lediglich der Einfluss einer Aktivierung des Sicherheitsventilators mit einer geringfügigen simulierten Reaktionszeit (die ebenfalls variiert wurde) getestet ohne ein derart freigegebenes Leckageerkennungssystem.

2.3.4.4 Schornsteinkonzept (Kampagne 4)

Diese Kampagne 4 ist der Auftakt zur Untersuchung neuartiger intrinsisch sicherer, passiver Sicherheitskonzepte für innen aufgestellte Wärmepumpen. Es werden zwei unterschiedliche Kamine getestet (Schornstein mit Lamellenhaube/Ventitop und normal verschlossener Schornstein).

2.3.4.4.1 Ziel

Die Kampagne 4 untersuchte den Einfluss eines Schornsteins mit Lamellenhaube (Ventitop) und einer normalen Haube (die lediglich vor Regen schützt und große Öffnungsflächen für die Vermischung mit Wind bietet) auf das Freisetzungsverhalten von R290 (Propan) nach einem Leck im Gehäuse einer Wärmepumpe, siehe Abbildung 64. Diese Kampagne ist ein passives Sicherheitskonzept. Besonderes Augenmerk wurde auf die Wirkung der Lamellenhaube in Kombination mit einem externen Ventilator gelegt, der speziell zur Unterstützung der Absaugung eingesetzt wurde. Dabei wurden auch verschiedene Gehäusedichtheitsgrade, Luftwechselraten und Windverhältnisse berücksichtigt.



Abbildung 64 : Getestete Kaminabdeckungen: Ausführung mit rotierendem Ventilator (links) und Ausführung mit feststehender Regenhaube (mittig). Schema der Kampagne 4 (rechts)

2.3.4.4.2 Versuchsaufbau

Die Leckage wurde am U-Bogen der Ansaug- oder Abluftleitung („Position mit geringer Leckage“) simuliert. Die Massendurchflussraten variierten je nach Test zwischen 0,1 g/s und 3,3 g/s. Die Schlitzbreite war zunächst offen und lag zwischen 0 und 0,5 mm; es wurden keine zusätzlichen Entlüftungslöcher (0 mm²) verwendet. Die Luftwechselrate (AER) wurde variiert (z. B. 0 m³/h, 2,15 m³/h, 10,75 m³/h).

Die Lamellenkappe (Ventitop) wurde auf dem Schornstein installiert. In ausgewählten Versuchen wurde ein externer Ventilator eingesetzt, um den Luftstrom gezielt zu beeinflussen, entweder als Saug- oder als Druckventilator. Die Versuche umfassten zudem unterschiedliche Dichtheitsgrade der Gebäudehülle („alt“ und verbesserte Abdichtung) sowie verschiedene Betriebsmodi des Ventilators.

2.3.4.4.3 Testvarianten und Besonderheiten

- Mit und ohne Ventilator: Einige Tests wurden ohne Ventilator durchgeführt, andere mit einem kleinen Ventilator, der auf die Ansaugöffnung gerichtet war oder zur Erzeugung eines Sogeffekts diente. Damit sollte der Wind im Normalbetrieb simuliert werden; die getesteten Windbedingungen waren Seitenwind, Gegenwind und Windstille.
- Dichtheit des Gehäuses: Die Tests wurden sowohl mit „alter“ (schlechterer) als auch mit verbesserter Gehäusedichtheit durchgeführt. Einige Tests wurden wiederholt, um die Dichtheit und Reproduzierbarkeit zu überprüfen.
- Luftwechselrate und Windbedingungen: Die Luftwechselrate (AER) wurde variiert, um ihren Einfluss auf die Ausblasseodynamik zu untersuchen. In einigen Tests wurde die Windgeschwindigkeit am Kamin bewusst erhöht (z. B. Ventilator auf Stufe 2 oder 3 eingestellt).
- Ausstoßdauer und Nachlaufzeit: Die Ausstoßdauer reichte von etwa 242 s bis 800 s, mit Nachlaufzeiten von bis zu 2600 s (bzw. 2042 s bei kürzeren Versuchen).

2.3.4.4.4 Versuchsablauf

- Systemvorbereitung: Aufbau des Testsystems, Installation des Schornsteins mit Lamellenhaube, ggf. Installation des Ventilators, Einrichtung und Kalibrierung der Sensoren.
- Lecksimulation: Einleitung von R290 gemäß den jeweiligen Parametern (Massenstrom, Schlitzbreite, AER).
- Durchführung der Tests: Variation der Gehäusedichtheit, der Luftwechselrate, des Ventilatorbetriebs und der Windbedingungen.
- Messung: Aufzeichnung der Konzentrationsprofile im Gehäuse, im Kamin und in der Umgebung.
- Nachbeobachtung: Analyse der Konzentrationsentwicklung nach Beendigung der Freisetzung (Nachlaufzeit).

2.3.4.4.5 Ergebnisse

Experiment	Air exchange ratio	Leakage mass flow	Wind speed	Tightness	Chimney head	Time in seconds > 100% LFL					
	m³/h	g/s	m/s	-	-	0,1m	0,3m	0,5m	1,0m	1,5m	
C4.04.unit	2,15	3,3	1	bad	cowl	3923	3923	3858	3820	3648	Shrinking risk ↓
C4.02.unit	2,15	3,3	0,2	bad	cowl	3919	3919	3862	3824	3701	
C4.07.unit	10,75	3,3	1	bad	cowl	3896	3896	3870	3843	3796	
C4.05.unit	2,15	3,3	1	bad	cowl	3880	3880	3829	3800	3503	
C4.01.unit	2,15	3,3	0,2	bad	cowl	3008	3008	2904	2880	2850	
C4.10.unit	2,15	3,3	0,2	medium	open	2947	2947	754	361	317	
C4.03.unit	10,75	3,3	0,2	bad	cowl	2935	2935	2874	2856	2789	
C4.12.unit	2,15	3,3	0,2	good	open	2423	2423	0	0	0	
C4.13.unit	2,15	1	0,2	good	open	543	543	0	0	0	
C4.09.unit	2,15	3,3	0,2	medium	open	496	496	421	233	196	
C4.11.unit	2,15	3,3	0,2	good	open	490	490	0	0	0	
C4.16.unit	2,15	1	0,2	good	open	96	96	0	0	0	
C4.14.unit	0	3,3	0,2	good	open	0	0	0	0	0	
C4.15.unit	0	3,3	0,2	good	open	0	0	0	0	0	
C4.17.unit	0	1	0,2	good	open	0	0	0	0	0	
C4.18.unit	0	1	0,2	good	lamella hat	0	0	0	0	0	
C4.19.unit	0	3,3	1	good	lamella hat	0	0	0	0	0	
C4.20.unit	0	3,3	1	good	lamella hat	0	0	0	0	0	
C4.21.unit	0	3,3	1	good	lamella hat	0	0	0	0	0	
C4.22.unit	2,15	3,3	1	good	lamella hat	0	0	0	0	0	

Abbildung 65: Messungen zu Kampagne 4 mit jeweiliger Darstellung der Zeiten mit Konzentrationen über 100% untere Explosionsgrenze (LFL), abhängig vom Abstand zum DuT.

Kampagne 4 untersucht ein rein passives Sicherheitskonzept: die Ableitung des ausgetretenen R290 über einen Schornstein ins Freie. Im Gegensatz zu Kampagne 3 (ventilatorbetriebene Belüftung nach IEC 60335-2-40, Annex GG.4) steht hier keine aktiv erzeugter Unterdruck zur Verfügung, der den Abtransport bei einer Freisetzung garantiert. Der Gasabtransport wird ausschließlich durch den am Schornsteinkopf anliegenden Auftriebs- und Windsog getragen. Als treibende Randbedingungen wurden daher die Kopfausführung (feste Regenhaube „cowl“, offener Kopf „open“, Lamellenhaube/Ventitop „lamella hat“), die Gehäusedichtheit („bad“ / „medium“ / „good“) und die simulierte Windgeschwindigkeit (0,2 bzw. 1 m/s) variiert, ergänzt um variierte Luftwechselraten (0 / 2,15 / 10,75 m³/h). Alle Versuche liefen mit 800 g Füllung und einer Leckrate von 3,3 g/s (in Einzelfällen 1 g/s).

Das dichte, bodennah austretende Propan muss durch die Kombination aus Eigenauftrieb der leichteren, mit Luft vermischten Fahne im Kaminzug und dem windinduzierten Sog am Kopf nach oben abgeführt werden. Damit ist die Wirksamkeit an zwei notwendige Bedingungen gekoppelt, die beide gleichzeitig erfüllt sein müssen:

- Die Gehäusedichtheit muss so hoch sein, dass der Kamin den einzigen Strömungsweg als Austrittspfad der Propan-Luft-Mischung zur Verfügung steht. Undichtigkeiten am Gehäuse stellen für das schwere, bodennah stehende Gas einen konkurrierenden, tiefer gelegenen Austrittsweg in den Raum dar und untergraben den gerichteten Zug vollständig.
- Am Austritt der Ausblasestelle muss ein ausreichender Sog anliegen, damit der Volumenstrom den Auftriebswiderstand und den Strömungswiderstand der Rohrführung überwindet.

Die Daten belegen mit großer Deutlichkeit, dass die Gehäusedichtheit ein dominierender Faktor ist. Sämtliche Versuche mit zu geringer Dichtheit („bad“, Versuche C4.01-C4.07) zeigen unabhängig von der Windgeschwindigkeit und der Luftwechselrate eine dauerhafte Gefährdung im Aufstellungsraum. Die Untere Explosionsgrenze wird für große Zeiträume 2800-3900 s überschritten. Das Gas nimmt den Weg des geringsten Widerstands durch die Gehäuseleckagen in den Raum, statt den Kamin zu passieren. Bemerkenswert ist, dass diese Fälle mit der festen Regenhaube („cowl“) kombiniert waren – die relativ große, offene Haubengeometrie liefert zwar geringen Strömungswiderstand, kann den fehlenden Zug bei undichtem Gehäuse aber nicht kompensieren. Die in einem worst-case Fall verfügbaren Windgeschwindigkeiten in der Höhe des Kamins (0,2-1 m/s) vermögen es nicht einen Sogeffekt aufzubauen, um die Konzentrationen im Gehäuse abzubauen.

Mit verbesserter Dichtheit treten UEG-Überschreitungen nur noch im Nahfeld des Gehäuses auf, während ab 0,5 m Abstand kein zündfähiges Gemisch mehr gemessen werden kann. Dies ist jedoch nur auf die erhöhte Dichtheit und nicht die Entlüftung des Gehäuses über den Kamin zurückzuführen. Der mittlere Dichtheitsgrad des Gehäuses („medium“, Versuche C4.09/C4.10) liegt erwartungsgemäß dazwischen und zeigt starke Streuung (496 s gegenüber 2947 s im Nahfeld), was die Empfindlichkeit des passiven Konzepts gegenüber kleinen Änderungen der Leckpfade unterstreicht.

Der Raumluchtwechsel wirkt nicht als primärer Sicherheitsmechanismus. Bei guter Dichtheit des Gehäuses sinkt die Interaktion und Schnittstelle zwischen Aufstellungsraum und Gehäuse/Anlage stark ab. Wenn sich ein für den Aufstellungsraum sicheres Ergebnis ergab (kein zündfähiges Gemisch im Nahfeld der Anlage), war dies nicht auf einen Konzentrationsabbau im Raum zurückzuführen.

2.3.4.4.6 Zusammenfassung

Die Kampagne 4 bewertet das Schornsteinkonzept als passives, intrinsisch sicheres Verfahren, bei dem das austretende R290 ohne Hilfsenergie allein durch Auftriebs- und Windsog über einen Kamin ins Freie geführt wird. Für Zu- und Abluft wird dieselbe Rohrführung wie in Kampagne 3 verwendet. Das Gas wird dabei kontrolliert, aber angewiesen auf das Vorhandensein von Wind, nach außen geführt und erst im Freien unterhalb der UEG verdünnt.

Zentral für das Verständnis der Kampagne ist die Frage, worin die Gefährdung tatsächlich besteht. Ist es bei diesem Konzept zulässig, dass innerhalb des Gehäuses und im Kaminzug dauerhaft hohe, über der UEG liegende Konzentrationen bestehen?

Eine zündfähige Mischung ist für sich genommen in einem für Zone 2 zugelassenem Umfeld unkritisch, solange dort keine Zündquelle vorhanden ist, eine zeitliche Begrenzung vorliegt und das zündfähige Gemisch nicht in den genutzten Aufstellraum gelangt.

Die Wirksamkeit des Konzepts ist somit an zwei Bedingungen geknüpft: eine hohe Gehäusedichtheit und ein ausreichender Sog am Kaminkopf, von denen die Dichtheit direkt im Anschluss an ein Leckageereignis und später die Dauer des Vorhandenseins einer zündfähigen Mischung in einem Gehäuse der limitierende Faktor ist.

Im Vergleich der Konzepte ist Kampagne 4 damit bisher dasjenige Konzept mit der stärksten Abhängigkeit von der Ausführungsqualität. Während Kampagne 3 (aktive Gehäuseabsaugung nach GG.4) die Trennung durch einen definierten, überwachten Unterdruck und Volumenstrom aktiv erzwingt und überwacht, beruht Kampagne 4 vollständig auf der passiven Kombination aus dauerhaft dichtem Gehäuse und sogförderndem Kaminkopf.

Eine im Betrieb nachlassende Dichtheit (Alterung, Wartung, mechanische Beschädigung) kann die schützende Trennung jedoch unbemerkt aufheben und die zündfähige Mischung in den Raum verlagern. Für die praktische Umsetzung folgt daraus, dass das Schornsteinkonzept nur mit dauerhaft dichtem Gehäuse und einer definitiv sogfördernden Kopfausführung (Lamellenhaube) als sicher gelten kann, und wegen unklarer Zuverlässigkeit der Dichtheit über die Lebenszeit nur durch geeignete Prüf- und Wartungsvorgaben eine dauerhaft sichere Lösung erreichbar ist.

Die größere Gefährdung geht jedoch von dem Mangel an zeitnaher oder zeitlich begrenzter Entlüftung aus. Sie verletzt das Prinzip der „zeitlichen Minimierung einer Gefährdung“, siehe auch EN 12100 oder EN 1127-1.

Somit konnte für den geprüften Prozessbereich mittels Sogeffekten über Cows bzw. Lamellenhaute keine sichere Lösung aufgezeigt werden, die eine Entlüftung und Minimierung der Gefährdungspotenziale erreichen konnte.

2.3.4.5 Drainage-Konzept (Kampagne 5)

Diese Kampagne 5 untersucht das zweite vielversprechende passive, intrinsisch sichere Sicherheitskonzept der Drainage aus dem Gehäuse der Wärmepumpe. Details zu den getesteten Varianten dieses Konzepts sind in Abschnitt 0 benannt.

2.3.4.5.1 Ziel

Die Kampagne 5 diente der Untersuchung des Austrittsverhaltens von R290 (Propan) aus dem Gehäuse einer Wärmepumpe über die Drainage-Öffnung. Bei dieser Kampagne handelt es sich um ein passives Sicherheitskonzept. Der Schwerpunkt lag auf der Entleerung des Gehäuses, der Ausbreitung des Kältemittels am Auslass sowie dem Einfluss baulicher Maßnahmen wie einer Venturi-Düse und eines Rückschlagventils. Die Versuche wurden unter verschiedenen Windbedingungen durchgeführt.

2.3.4.5.2 Versuchsaufbau

Das Leck wurde am U-Bogen der Saug- oder Druckleitung simuliert („Low-Leak-Position“). Die Massendurchflussraten betrugen entweder 1 g/s oder 3,3 g/s. Es wurden keine zusätzlichen Schlitzöffnungen (Schlitzbreite = 0 mm) oder Entlüftungslöcher (0 mm²) verwendet. Die Luftwechselrate (AER) betrug in allen Versuchen 0 m³/h, d. h., es gab keine aktive Belüftung. Die Windbedingungen variierten je nach Konzept. Aufgrund der zertifizierten Testinfrastruktur ist das Freisetzen brennbarer Gase nur an bestimmten Standorten zulässig. Dies machte die Installation eines etwa 6 m langen Abluftkanalsystems erforderlich, was zu hohen Druckverlusten zwischen dem Gehäuse des Geräts und der Außenumgebung führte.

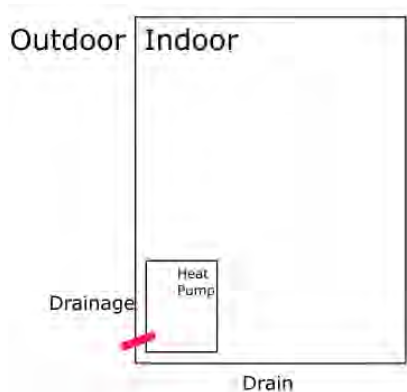


Abbildung 66: Schema zu Sicherheitskonzept Kampagne 5

Für die Kampagne 5 (Drainage) wird das Gerät um 260 mm angehoben, um einen Potential-/Höhenunterschied zwischen der Position der Wärmepumpe und dem Drainageauslass außerhalb des Testraums zu schaffen. Der entstehende Raum unter dem Gehäuse wird mit Platten ausgefüllt und mit Folie und Klebeband abgedichtet (siehe Abbildung 67: Abgedichteter Raum unter dem erhöhten Demonstrator HP), um das Eindringen von Propan zu verhindern.



Abbildung 67: Abgedichteter Raum unter dem erhöhten Demonstrator HP

2.3.4.5.3 Testkonzepte

- Konzept A – Einfluss der Gehäuseneigung und der Windverhältnisse: Untersucht wurden die Entleerung des Wärmepumpengehäuses aufgrund einer Neigung sowie die Ausbreitung von R290 am Auslass unter verschiedenen Windverhältnissen (Seitenwind, Frontalwind, Windstille).
- Konzept B – Einfluss einer Venturi-Düse: Am Auslass des Drainagerohrs wurde eine Venturi-Düse installiert. Die Tests wurden bei Windstille durchgeführt, um den aerodynamischen Effekt der Düse auf die Ausstoßrichtung und die Konzentrationsverteilung zu untersuchen.
- Konzept C – Einfluss eines Rückschlagventils: Am Auslass wurde ein Rückschlagventil mit schwacher Magnetkraft installiert. Diese Versuche wurden ebenfalls ohne Wind durchgeführt, um den Einfluss des Rückschlagventils auf den Rückfluss und die Sicherheit während der Freisetzung von R290 zu bewerten.

2.3.4.5.4 Versuchsablauf

- Systemvorbereitung: Aufbau des Testsystems, Installation und Kalibrierung der Sensoren.
- Lecksimulation: Einleitung von R290 gemäß den jeweiligen Parametern.
- Durchführung der Versuche: Umsetzung der baulichen Maßnahme (Gefälle, Venturi-Düse, Rückschlagventil) und Variation der Windbedingungen.
- Messung: Erfassung der Konzentrationsverläufe am Auslass und in der Umgebung.
- Nachbeobachtung: Analyse der Konzentrationsentwicklung nach Beendigung der Freisetzung.

2.3.4.5.5 Ergebnisse

Experiment	Leakage mass flow	Wind speed	Ideal Mixing	Wind scenario	Venturi scrubber	Drain check valve	100% UEG			
	g/s	m/s	-	-	-	-	0,1m	0,3m	0,5m	1,0m
C5.07.unit	3,3	0	No	ZER	Yes	No	2	3	4	5
C5.10.unit	3,3	0	No	VIR	Yes	No	1708	1708	1708	1598
C5.01.unit	1	0	No	ZER	No	No	43	43	43	0
C5.02.unit	1	0,2	No	VBO	No	No	0	0	0	0
C5.03.unit	3,3	0,2	No	VBO	No	No	0	0	0	0
C5.04.unit	3,3	0	No	ZER	No	No	0	0	0	0
C5.05.unit	3,3	0	No	VIR	No	No	0	0	0	0
C5.06.unit	3,3	0,2	No	VBO	No	No	0	0	0	0
C5.08.unit	1	0	No	ZER	Yes	No	0	0	0	0
C5.09.unit	1	0	No	ZER	Yes	No	0	0	0	0
C5.11.unit	3,3	0	No	ZER	No	Yes	0	0	0	0
C5.12.unit	3,3	0	No	ZER	No	Yes	0	0	0	0
C5.13.unit	3,3	0,2	Yes	ZER	No	Yes	0	0	0	0

Shrinking risk

Abbildung 68: Messungen zu Kampagne 4 mit jeweiliger Darstellung der Zeiten mit Konzentrationen über 100% untere Explosionsgrenze (LFL), abhängig vom Abstand zum DuT.

Das im Gehäuse freigesetzte, gegenüber Luft deutlich schwerere R290 wird ausschließlich schwerkraftgetrieben über die tiefliegende Ablauföffnung nach außen abgeführt. Als passivem Sicherheitskonzept steht keine aktive Entlüftung zur Verfügung, und der Raumlufthwechsel ist in allen Versuchen null ($AER = 0$). Alle Versuche liefen mit 800 g Füllung und Leckraten von 1 oder 3,3 g/s bei Schlitzbreite 0 mm (hohe Dichtheit). Konstruktiv ist das Gerät um 260 mm angehoben, und der darunterliegende Raum ist mit Platten, Folie und Klebeband abgedichtet. Diese Höhen- und Dichtheitsmaßnahme ist die tragende Randbedingung des Konzepts: Sie erzeugt das für den gravitativen Abfluss notwendige Höhengefälle zwischen Gehäuse und Ablaufauslass und verhindert zugleich, dass das schwere Gas über den Bodenspalt in den Aufstellraum zurückströmt.

Anders als bei dem zweiten intrinsisch sicheren Konzept des Kamins aus der Kampagne 4 nutzt Kampagne 5 gerade die hohe Dichte des Propan als treibende Größe. Das Gas sammelt sich bodennah im Gehäuse und fließt im Idealfall bei ausreichendem Gefälle wie eine Flüssigkeit über den tiefsten Punkt – die Drainage – nach außen ab. Entscheidend für die Sicherheitsbewertung ist die Dauer des Vorhandenseins einer zündfähigen

Mischung im Gehäuse und ob die zündfähige Mischung den Aufstellungsraum erreicht. In diesem Fall ist der einzige strömungsoptimierte Weg für das schwere Gas nach außen über die Drainageleitung ins Freie.

Im Konzept A wurde die reine Gravitationsdrainage mit Gefälle (Versuche C5.01–C5.06) untersucht. Analog wie bei Kampagne 4 konnte aufgrund der hohen Dichtheiten keine Überschreitung der UEG im Aufstellungsraum nachgewiesen werden. Ein Abtransport des R290 und eine Entlüftung aus dem Gehäuse fand allerdings nicht durch den Dichteunterschied statt. Ein maßgeblicher Grund dafür war die notwendige Länge der Drainageleitung, um die im Testbereich erlaubten Freisetzungszonen nutzen zu können. Die Länge der Drainageleitung betrug ca. 8 m.

Im Konzept B wurde zusätzlich eine Venturi-Düse am Auslass (Versuche C5.07–C5.10). Die zur Sog-/Ausstoßunterstützung gedachte Venturi-Düse verschlechtert das Verhalten bei Windstille und hoher Leckrate deutlich. In C5.07 (3,3 g/s, Windstille) traten über alle Distanzen lange Überschreitungen des zündfähigen Gemisches auf. Erklärbar ist dies dadurch, dass die Düsenverengung ohne anströmenden Wind einen zusätzlichen Staudruck im Gehäuse erzeugt. Diesem zusätzlichen Innendruck halten die eingesetzten Dichtungsmaßnahmen nicht stand. Zudem kann der gravitativ getriebene Abfluss diesen zusätzlichen Widerstand noch schlechter überwinden. Bei der geringeren Leckrate von 1 g/s (C5.08/C5.09) entsteht dagegen keine zündfähige Atmosphäre im Nahfeld des Aufstellungsraums. Die Venturi-Düse wirkt also nur bei anliegender Anströmung günstig; im auslegungsrelevanten Fall (Windstille, hohe Leckrate) hebt sie den Vorteil des einfachen Gravitationsabflusses auf und ist damit kontraproduktiv.

Im Konzept C wurde eine Rückschlagklappe am Gehäuse montiert (Versuche C5.11–C5.13). Diese Klappe wurde mit schwacher Magnetkraft geschlossen gehalten, um die Klappe bei schwachen Differenzdrücken gering zu halten. Das Konzept sieht vor, dass die Klappe unter geringen Überdruck des abfließenden Gases öffnet. In allen durchgeführten Tests wurde über sämtliche Distanzen keine UEG-Überschreitung gemessen. Das Ventil verhält sich somit in seiner Dichtheit wie der Rest des gut abgedichteten Gehäuses. Eine Unterstützung der Drainage in Form verringerter Verweilzeiten eines zündfähigen Gemisches konnte über die Rückschlagklappe jedoch nicht festgestellt werden.

2.3.4.5.6 Zusammenfassung

Die Kampagne 5 bewertet das Drainage-Konzept als passives, intrinsisch sicheres Verfahren, bei dem das freigesetzte R290 ohne Hilfsenergie allein schwerkraftgetrieben über eine tiefliegende Ablauföffnung ins Freie abgeführt wird. Grundvoraussetzung ist ein Aufstellungsraum oberhalb der Erdgleiche: Das Gerät wird um 260 mm angehoben, um das für den Abfluss nötige Höhengefälle zwischen Wärmepumpe und Drainageauslass zu schaffen. Ohne ausreichendes Gefälle und ohne dichten Unterbau ist das Verfahren somit nicht anwendbar.

Wie schon in den Versuchen in Kampagne 4 zuvor sorgte die hohe Dichtheit der Anlage maßgeblich dafür, dass jede UEG-Überschreitung im Nahfeld der Anlage vermieden wurde. Ein Abtransport des Propan, ausgelöst durch einen Dichteunterschied (Gravitationsgefälle) in Konzept A, konnte allerdings nicht in zufriedenstellend kurzen Zeitfenstern erreicht werden. Im Vergleich zu Kampagne 4 ist das Konzept jedoch prinzipiell unempfindlich gegenüber fehlender Anströmung oder dem Erzeugen von Sogeffekten. Eine Venturi-Düse (Konzept B) erwies sich als kontraproduktiv: diese erzeugte mangels Anströmung keinen Sog, sondern einen zusätzlichen Strömungswiderstand, der den impulsarmen Gravitationsabfluss zurückstaute und zu langen Überschreitungen über alle Distanzen führte und selbst einer langsamen Entlüftung durch den Auftrieb entgegenwirkte.

Eine Rückschlagklappe (Konzept C) konnte als dicht bewertet werden, ohne den Aufstellungsraum zu gefährden. Doch die Idee nach dem Ende der Leckage den Auftrieb bzw. den schwerkraftgetriebenen Abfall des Schwergases aus dem Gehäuse zu unterstützen, dadurch dass leichtere Raumluft in den oberen Teil des Gehäuses nachströmt, ließ sich nicht nachweisen.

Somit entstand analog zu der Kampagne 4 ein System, das nur im Falle lang andauernder Zeiträume auch eine Entlüftung im Gehäuse erreichte. Jedoch mit dem grundsätzlichen Potenzial sich durch weniger Abhängigkeit von Windverhältnissen auch selbst entleeren zu können.

Kampagne 5 kann zwar ein einfach umzusetzendes, hilfensenergiefreies und – innerhalb seiner Aufstellungsvoraussetzungen (kurze Drainagelängen, geringe Staudrücke durch große Nennweiten) – robustes

Verfahren sein. Sein Vorteil gegenüber Kampagne 4 ist die Unabhängigkeit vom Wind, sein Vorteil gegenüber Kampagne 3 wäre der Verzicht auf Ventilatorleistung, Überwachung und Wärmeverlust. Sein Nachteil und seine bestimmende Randbedingung ist die zwingende Aufstellung über Erdgleiche mit gesichertem Gefälle sowie ein dauerhaft dichter Gehäusekörper. Entfällt eine dieser Bedingungen, verliert der gravitative Ableitweg seine Wirkung. Aerodynamische Zusatzmaßnahmen sind nur mit Bedacht einzusetzen: Ein Rückschlagventil erhöht die Sicherheit, während eine Venturi-Düse den Grundmechanismus im ungünstigsten Betriebsfall gerade aushebeln kann. Für die praktische Umsetzung folgt daraus die Empfehlung, das Konzept auf den einfachen, gefällegeführten Abfluss – optional ergänzt um ein leichtgängiges Rückschlagventil – zu stützen und auf strömungsverengende Elemente am Auslass zu verzichten. Da es sich um ein passives Konzept ohne Eigenüberwachung handelt, sind Gefälle, Dichtheit des Gehäuses und Freigängigkeit der Ablauföffnung über die Lebensdauer sicherzustellen.

2.3.5 Schlussfolgerung zur sicheren Nutzung der untersuchten Konzepte

Es wurden fünf verschiedene Konzepte getestet. Hinsichtlich des sicheren Parameterraums, der eine Null-Abstands-Sicherheit erreicht, sind die Anwendungsergebnisse in den Übersichten der Kampagnen 1 bis 5 dargestellt (siehe Abschnitt 2.3.4).

Die während der Tests behandelten Konzepte decken die in Abbildung 69 dargestellten Sicherheitstests ab. Die Zonentests umfassten den Drainage- und Abblase-Bereich der Kampagnen 4 und 5.

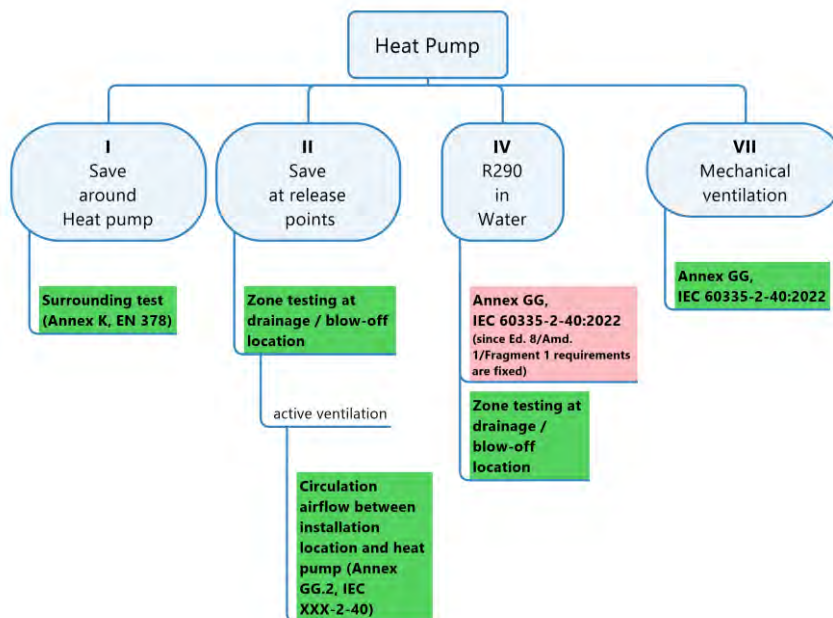


Abbildung 69: Getestete Sicherheitskonzepte in LCR290 und deren Einordnung analog der Kategorisierung aus Abbildung 45

Aus der Analyse des Anteils der Null-Sicherheitsabstände in den Versuchsergebnissen geht hervor, dass jede Kampagne einen Anteil an Null-Sicherheitsabstandstests aufweist, was bedeutet, dass überhaupt ein Parameterraum zur Verfügung steht. Doch selbst wenn dies in Bezug auf die Nicht-Wolkenbildung zutrifft, gibt es andere Parameter, die jede Entscheidung erschweren, eine dieser Kampagnen als Sicherheitskonzept der Wahl für eine Wärmepumpenentwicklung auszuwählen:

- Überschreitung der zulässigen Freisetzungsgrenzen für die Füllmenge (150 g) (Kampagne 1),
- Überschreitung der 100 %-LFL-Grenzwerte in der Nähe von Auslässen (Kampagne 2) sowie
- langfristig vorhandene brennbare Gemische innerhalb des Geräts (wie in den Kampagnen 4 und 5)

Die Überschreitung der unteren Freisetzungsgrenze könnte durch Anwendung des Konzepts der „releasable charge“ gelöst werden, sodass ein Konzept-Design grundsätzlich sicher sein könnte, wenn die Freisetzung begrenzt ist und unter dem Grenzwert von 150 g bleibt.

Daneben würden jedoch langfristig vorhandene Gemische innerhalb eines Gehäuses tagelang, wenn nicht sogar wochenlang stabil und oberhalb der Entzündungsgrenze verbleiben. Edition 8 der 60335-2-40 legt keine generelle „maximale Verweildauer“ für ein brennbares Gemisch innerhalb eines Gehäuses fest; stattdessen steuert die Norm das Risiko über konzentrations- und funktionsbasierte Maßnahmen mit expliziter Zeitvorgabe (z. B. Anhang GG: RDS-Auslösung vor 25 % UEG mit ≤ 30 s Ansprechzeit, Spülung nach Rückstellung ≥ 5 min und Maßnahme bei Luftverlust ≤ 10 s). Darüber hinaus sind elektrische Komponenten in Wärmepumpen nach

einer „Zone 2“-ähnlichen Definition so ausgelegt, dass sie brennbaren Gemischen standhalten, deren Vorhandensein im Normalbetrieb unwahrscheinlich ist und die, falls sie auftreten, nur für kurze Zeit bestehen bleiben. Ein sehr dichtes und somit abgedichtetes Gehäuse, in dem sich ein Gemisch im UEG-Bereich tagelang halten kann, würde daher als Zone 1 oder sogar Zone 0 behandelt werden. Die einzige Möglichkeit, dies anders zu handhaben, wäre eine Verkürzung der Verdünnungszeit innerhalb des Gehäuses auf eine Dauer von Stunden. ATEX/IEC ziehen keine strenge Grenze zwischen „Stunden“ und „Tagen“; sowohl die ATEX-Arbeitsstättenrichtlinie 1999/92/EG als auch IEC 60079-10-1 definieren Zone 2 qualitativ als eine explosionsfähige Atmosphäre, die im Normalbetrieb unwahrscheinlich ist und, falls sie auftritt, nur für kurze Zeit besteht, ohne eine universelle numerische Grenze.

In der Praxis quantifizieren einige weit verbreitete Leitlinien „kurz“ anhand der Gesamtzeit pro Jahr (häufig zitiert: Zone 2 < 10 h/Jahr), sodass ein seltenes Ereignis, das einige Stunden andauert, auf der Grundlage der kumulativen Stunden immer noch als Zone 2 eingestuft werden könnte.

Bei einem geschlossenen/sehr schlecht belüfteten Innenraum mit einer internen Freisetzungsquelle werden die Methoden zur Bereichsklassifizierung jedoch in der Regel konservativer, da die Persistenz durch schlechte Ausbreitung bedingt ist (d. h. „Dauer der Freisetzung + Zeit bis zur Ausbreitung“), sodass selbst bei einem seltenen Ereignis die „Stunden im LFL-Bereich“ oft darauf hindeuten, den Innenraum als risikoreicher als Zone 2 einzustufen, es sei denn, man kann (durch Auslegung und Nachweis) eine schnelle Verdünnung/Spülung nachweisen oder dass zündfähige Stromkreise während des Gefahrenzeitraums nicht mit Energie versorgt werden können (oder die internen Komponenten über ein geeignetes EPL-/Schutzkonzept wie Spülung/Druckbeaufschlagung gemäß IEC 60079-2 verfügen).

Darauf basierend müsste jedes passive Konzept wie Kampagne 4 oder 5 (Schornstein und Drainage) die internen brennbaren Gemische innerhalb eines Zeitraums von Minuten bis zu 1 oder 2 Stunden verdünnen. Sich lediglich auf die Umgebungswindverhältnisse zu verlassen ermöglicht kein kontrolliertes Verfahren, das eine Verdünnung in diesem Zeitrahmen bewirken würde, und ist daher schwer umsetzbar, um geforderte – auch zeitliche – Maßnahmen zur Minimierung der Risiken zu erreichen. Für Kampagne 5 mit der Drainage wären die Verdünnungszeit und das Erreichen risikofreier Volumina innerhalb der Einhausung möglich, jedoch nur für Einheiten mit kurzen Kanälen, wodurch die Einschränkung hinsichtlich der Aufstellungsorte zum Tragen kommt.

Akzeptable Anwendungsfälle wären nur Aufstellungsorte über dem Boden, die an Bereiche angrenzen, in denen das Ausblasen des brennbaren Gemischs zu keiner weiteren Gefahr führt.

Somit sind die Kampagnen, die einen sicheren Parameterraum aufweisen, die Konzepte mit Raumluftdurchmischung (Kampagne 2) und die externen Gehäusebelüftung (Kampagne 3).

Wie bei den anderen Kampagnen müssen auch für Versuche in Kampagne 2, die einen Sicherheitsabstand von Null ergaben, die oben aufgeführten weiteren Einschränkungen berücksichtigt werden. Unter den aktuellen Bedingungen würde nur eine Kombination aus Umwälzluftstrom und dem Konzept der „releasable charge“ dieses Belüftungs-/Verdünnungskonzept ermöglichen.

Dies führt dazu, dass nur der klassische Ansatz der externen Belüftung aus Kampagne 3 als Methode unter den im Projekt untersuchten Konzepten verbleibt, um einen Aufstellungsraum unter vielen Bedingungen sicher und frei von brennbaren Gemischen zu halten. Hier führte selbst ein großer Unterschied in der Dichtheit des Gehäuses zu sicheren Bedingungen in Szenarien, in denen die Wärmepumpe und ihr Lüftungssystem mit Strom versorgt und aktiv betrieben werden.

2.3.6 Ergebnisse der SHAP-Analyse

Die kampagnenübergreifende SHAP-Analyse in Abbildung 76 zeigt, dass die Bildung und Persistenz einer bodennahen Schwergasschicht im Wesentlichen von drei Einflussfaktoren bestimmt wird: dem Volumenstrom der Gehäuseentlüftung, der Gehäusedichtheit und der Kältemittelfüllmenge. Diese drei Parameter allein erklären den überwiegenden Anteil der beobachteten Varianz in der Nachweisdauer. Der Volumenstrom der Gehäuseentlüftung wirkt dabei als aktive Gegenmaßnahme: Bereits moderate Ventilatorleistungen (ab 27 m³/h) zerstören eine vorhandene Schichtung zuverlässig, sofern die freigesetzte Gasmenge nicht zu groß ist. Die Gehäusedichtheit bestimmt, ob und wie schnell das freigesetzte Kältemittel aus dem Gehäuse in die Umgebung gelangen kann.

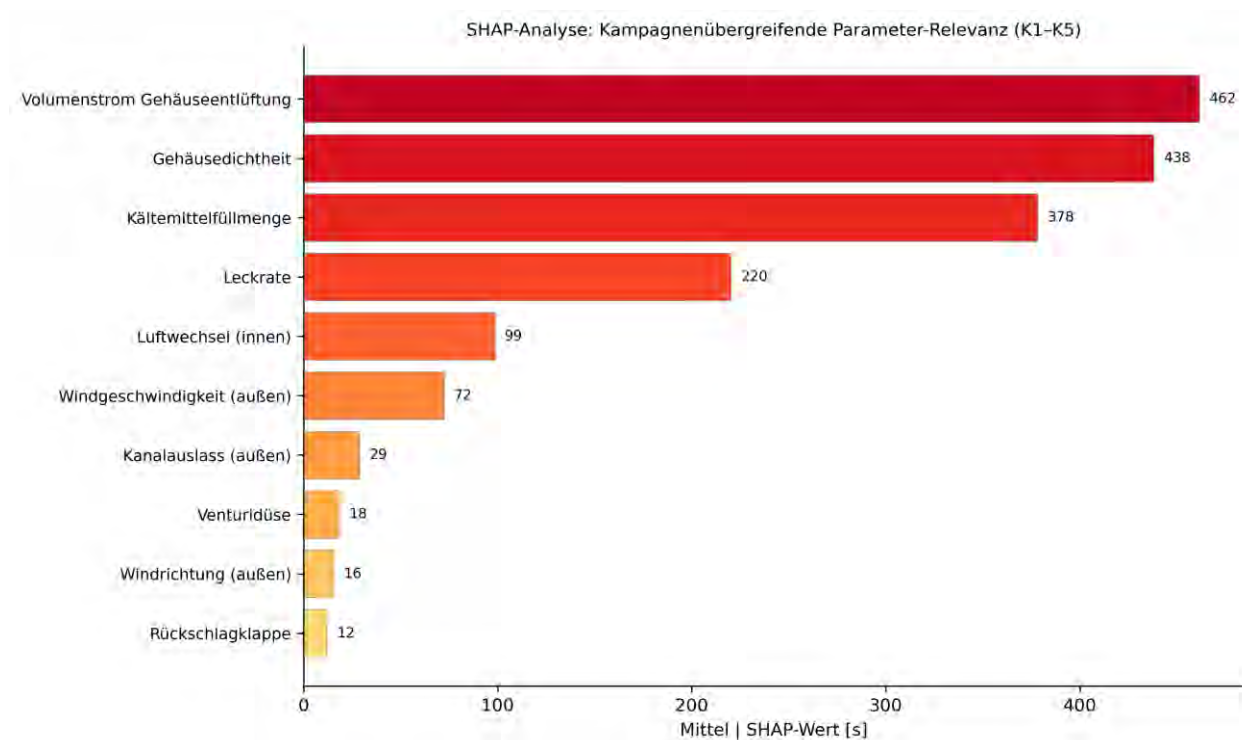


Abbildung 70: SHAP-Analyse zur Ermittlung der Relevanz variiert Parameter in der Gesamtheit untersuchter Kampagnen

Die Leckagerate folgt auf Rang vier und beeinflusst primär die Dynamik der Freisetzung – langsame Leckagen (0,15 g/s) führen zu langen Freisetzungsdauern und damit potenziell längerer Schichtpersistenz, während schnelle Leckagen (3,3 g/s) das gesamte Kältemittel rasch freisetzen und der anschließende Abbau früher einsetzen kann. Der natürliche Luftwechsel und die Windgeschwindigkeit spielen eine untergeordnete Rolle. Die verbleibenden Parameter – Kanalauslass, Venturidüse, Windrichtung und Rückschlagklappe – haben nur eine geringe Relevanz.

2.3.7 Nicht-regulierte Sicherheitsuntersuchungen

Die in LCR290 getesteten Konzepte deckten einen großen Teil der in Normen zugelassenen Sicherheitskonzepte für innen aufgestellte Geräte ab (siehe den vorangegangenen Abschnitt). Als fehlender, nicht regulierter Aspekt von Wärmepumpen kam im Projekt hinzu, dass die Außenbereiche mit geprüft worden sind. Diese wurden in allen Kampagnen umfassend parallel geprüft. Dies gilt für die Installationsorte im Freien, aber auch für die Abblasezone bei Inneninstallationen.

2.3.8 Risikobewertung der untersuchten Sicherheitskonzepte

Produktbezogene Risiken werden zwischen Herstellern, Installateuren, Planern, Eigentümern, Betreibern, Servicetechnikern und Technikern für die Stilllegung und Entsorgung geteilt. Dies führt zu unterschiedlichen Haftungsbereichen.

Für die zunehmend in Massenproduktion hergestellten Geräte übernimmt die Produktsicherheitsnormenreihe IEC 60335 Teile der Behandlung von Sicherheitsthemen bei Kälteanlagen, die in Europa in der Vergangenheit hauptsächlich durch die Normenreihe EN 378 geregelt wurden und davor vor allem durch nationale Vorschriften. Die Normenreihe EN 378 verweist für einen qualitativen Ansatz zur Risikobewertung auf die EN ISO 12100. Diese verfolgt jedoch eine inhärente Sicherheit (technisch) als primäres Ziel sowie weitere

technische, organisatorische und personelle Maßnahmen, um sichere (individuelle) industrielle Maschinen zu gewährleisten.

Abbildung 71 visualisiert alle Lebenszyklusphasen eines Produkts wie einer Wärmepumpe. Aufgrund der unterschiedlichen Verantwortlichkeiten von Herstellern, Logistikunternehmen, Planern, Installateuren, Eigentümern und Servicetechnikern können die Ansätze zur Risikobewertung stark variieren. Um die Situation bei der Standardisierung der Risikobewertung zu verbessern, wurden verschiedene Methoden analysiert; darunter die Fehlerbaumanalyse (FTA) und eine statische Sensitivitätsanalyse.

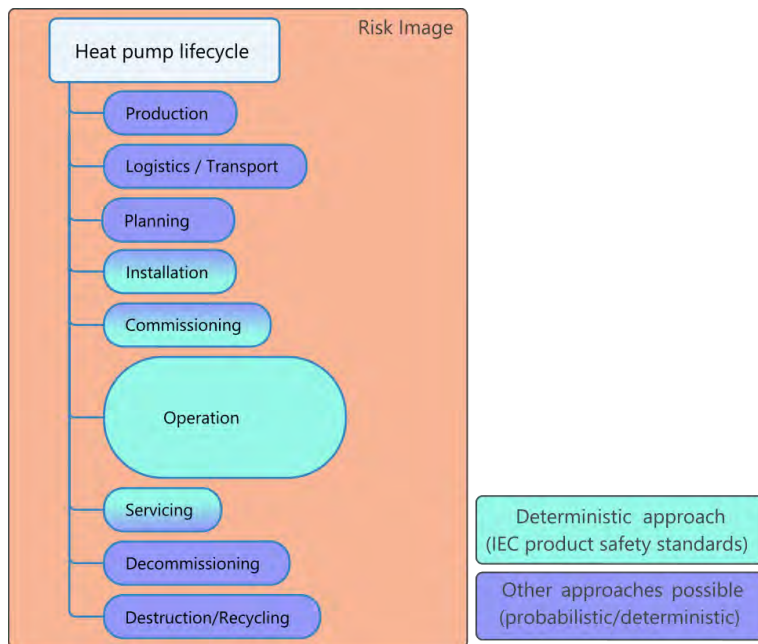


Abbildung 71: Visualisierung des Zusammenspiels zwischen dem Lebenszyklus von Geräten (z. B. Wärmepumpen) und der zur Risikobewältigung angewandten Sicherheitsphilosophie.

In einer ersten Masterarbeit¹ wurde ein FTA-Konzept entwickelt, das für das gesamte Lebenszyklus-Risikobild einer Wärmepumpe angewendet und weiterentwickelt wurde, sowie FTA-Modelle für die Installation, den Betrieb und die Wartung. Der Hauptteil dieser Arbeit befasste sich mit einer Literaturstudie, um Wissenslücken auf der Grundlage dieser umfassenden Literaturrecherche zu schließen. Es wurde eine statische Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Eine zweite Masterarbeit² konzentrierte sich auf die Datenaufbereitung, um Daten aus den Testkampagnen für die Betriebs-FTA nutzen zu können, sowie auf die Entwicklung eines automatisierten FTA-Ansatzes, der eine umfassende Risikobewertung auf Basis von Python-Skripten mit einer implementierten Anbindung an das Monaco³-Modul in Python beinhaltet. Die FTA ist vollständig auf jede Größe skalierbar und ihre Struktur zur Visualisierung der Fehlerbäume wird mittels YAML konfiguriert.

Die Sensitivitätsanalyse spielt eine zentrale Rolle bei der Weiterentwicklung von Risikobewertungsmethoden, indem sie systematisch quantifiziert, wie sich Unsicherheiten in den Eingabeparametern auf die Ergebnisse auf

¹ Patel, D. Quantitative Risk Assessments for Heat Pumps: Database Improvement, Implementation, and Usage for an Exemplary QRA of a Heat Pump Prototype. Master Thesis, University of Applied Sciences Nordhausen, 2025.

² Baranwal, A. Data-Driven Risk Assessment from Propane Cloud Experiments: A Hybrid Framework Based on Post-Processing with Kriging, Machine Learning, Stochastic Sampling, and Bayesian Fault Tree Analysis. Master Thesis, University of Freiburg, 2025.

³ Siehe auch <https://pypi.org/project/monaco/>.

Systemebene auswirken. Im Kontext der Fehlerbaumanalyse (FTA) ermöglicht dieser Ansatz ein tieferes Verständnis dafür, wie Schwankungen in den Grundereigniswahrscheinlichkeiten die Wahrscheinlichkeit des obersten Fehlerereignisses beeinflussen. Durch die Einbettung der Sensitivitätsanalyse in ein Monte-Carlo-Simulationsframework, das mit dem Monaco-Paket¹ implementiert wurde, wird der Risikobewertungsprozess über die deterministische Bewertung hinaus auf eine probabilistische und unsicherheitsbewusste Perspektive erweitert. Die Wahrscheinlichkeiten der Basisereignisse werden über viele Iterationen hinweg aus vordefinierten Verteilungen entnommen, und die Fehlerbaumlogik wird für jede Realisierung ausgewertet, um die entsprechende Wahrscheinlichkeit des obersten Ereignisses zu schätzen.

Um die relative Bedeutung einzelner Basisereignisse zu bewerten, werden statistische Korrelationen zwischen den erfassten Eingangswahrscheinlichkeiten und den resultierenden Top-Ereignisergebnissen berechnet. Die resultierende Korrelationsmatrix liefert ein quantitatives Maß für die Sensitivität und gibt sowohl die Stärke als auch die Richtung des Einflusses jedes Basisereignisses auf das Gesamtsystemrisiko an. Ereignisse mit hohen absoluten Korrelationswerten werden als dominante Risikofaktoren identifiziert und unterstützen so gezielte Risikominderungsstrategien sowie eine evidenzbasierte Priorisierung von Sicherheitsmaßnahmen innerhalb des Wärmepumpensystems.

Mit Blick auf die Zukunft bietet das vollautomatisierte und modulare Design der FTA-Pipeline eine robuste Grundlage für eine skalierbare und adaptive Risikobewertung. Die Struktur und Logik des Fehlerbaums werden extern über eine menschenlesbare YAML-Konfiguration definiert, sodass Benutzer Systemkonfigurationen, Fehlerlogik oder Komponentendefinitionen ändern können, ohne den zugrunde liegenden Code zu verändern. Dieses Design ermöglicht eine schnelle Neukonfiguration für Szenarioanalysen, Technologievergleiche oder zukünftige Erweiterungen auf alternative Wärmepumpenarchitekturen oder Kältemitteltypen. Jede Aktualisierung der YAML-Konfiguration löst eine automatische Rekonstruktion des Fehlerbaums aus, gefolgt von einer Monte-Carlo-Simulation und einer Sensitivitätsanalyse, wodurch Konsistenz und Reproduzierbarkeit über Studien hinweg gewährleistet werden.

Darüber hinaus erhöht die Integration gezielter Rauschinjektionsmechanismen den Realismus und die Robustheit der Risikobewertung. Durch die Möglichkeit, Gaußsches, exponentielles oder konstantes Rauschen selektiv auf einzelne Basisereignisse anzuwenden, erfasst das Framework vielfältige Unsicherheitsquellen wie Messschwankungen, Degradations- und Ausfallzeit-Effekte oder Verzerrungen durch Expertenurteile. Die Wiederholung der Monte-Carlo-basierten Sensitivitätsanalyse unter diesen gestörten Bedingungen ermöglicht eine systematische Stressprüfung des FTA-Modells und liefert Einblicke in die Robustheit von Risikofolgeschlüssen unter Unsicherheit. Insgesamt positionieren diese Fähigkeiten das Framework als flexibles und zukunftsorientiertes Werkzeug für die probabilistische Risikobewertung, das eine fundierte Entscheidungsfindung in komplexen und sicherheitskritischen Energiesystemen unterstützt.

Eine ausführlichere methodische Beschreibung sowie eine erweiterte Analyse des Konzepts eines automatisierten, auf YAML basierenden FTA-Tools findet sich in der Masterarbeit von Arpit Baranwal².

2.3.9 Fazit

Insgesamt sind fünf Versuchskampagnen mit ca. 125 Versuchen durchgeführt worden. Dabei wurden Versuche ohne jegliche Sicherheitsmaßnahmen, mit bekannten Sicherheitsmaßnahmen bzw. neuen, bisher nicht untersuchten Sicherheitsmaßnahmen durchgeführt.

¹ Shambaugh, W.S. Monaco: A Monte Carlo Library for Performing Uncertainty and Sensitivity Analyses. SciPy Conference. <https://doi.org/10.25080/majora-212e5952-024>, July 2022.

² Baranwal, A. Data-Driven Risk Assessment from Propane Cloud Experiments: A Hybrid Framework Based on Post-Processing with Kriging, Machine Learning, Stochastic Sampling, and Bayesian Fault Tree Analysis. Master Thesis, University of Freiburg, 2025.

2.3.9.1 *Baseline ohne Sicherheitsmaßnahmen (Kampagne 1)*

Die Versuchskampagne 1 entsprach vom Aufbau her einer innen aufgestellten Anlage ohne jegliches Sicherheitskonzept. Die Ergebnisse dienten als Referenz, um bei einer Anlage ohne Versuche die Gefahrenpotenziale zu verstehen und um diese für Vergleiche mit anderen Sicherheitskonzepten nutzen zu können.

Wie zu erwarten, zeigen sich ohne Sicherheitskonzept hohe Konzentrationen zündfähiger Gemische, lange Verweilzeiten von flüchtigen Gemischen und somit ein hohes Gefahrenpotenzial. Für einen sicheren Betrieb kann nicht auf ein Sicherheitskonzept verzichtet werden.

2.3.9.2 *Durchmischung/Umwälzung der Raumlufte (Kampagne 2)*

Durch kontinuierliche Belüftung konnte die Konzentration von R 290 im Versuchsraum unter bestimmten Voraussetzungen zuverlässig niedrig gehalten werden. Bedingung dafür war, dass ein ausreichendes Mindestvolumen des Aufstellungsraumes und eine ausreichend hohe Ventilatorleistung vorhanden ist, die das Volumen in 1–2 min vollständig mischen kann. Das Verfahren ist also nur für Räume mit genug Volumen oder bei gut dimensionierten Ventilatoren praktikabel und bietet weniger Flexibilität als das belüftete Gehäuse. Die Installation in einem ausreichend großen Raum lässt sich von Herstellerseite nicht direkt kontrollieren.

2.3.9.3 *Aktiv belüftetes Gehäuse (Kampagne 3)*

Das belüftete Gehäuse demonstriert die robusteste und bislang am besten dokumentierte Sicherheitsmethode. Die Sicherheit dieses Konzepts und Freiheitsgrade zu deren Anwendung konnten umfangreich untersucht und bestätigt werden. So könnten z.B. auch vorhandene Schornsteine als Infrastruktur in Gebäuden wiederverwendet werden. Es kombiniert eine gute Abdichtung des Gehäuses mit einer kontrollierten Belüftung bzw. Absaugung. Die Ergebnisse bestätigen diesen Ansatz und zeigen, dass dieses Sicherheitskonzept die größte Gestaltungsfreiheit hinsichtlich Herstellung, Planung, Installation und Betrieb bietet. Nur bei ungünstigster Kombination einer großen Undichtigkeit des Gehäuses und einem zu gering ausgelegten Volumenstrom zur Belüftung des Gehäuses wurde mit diesem Konzept ein gefährlicher Zustand im Nahfeld der Anlage erzielt.

2.3.9.4 *Passive Belüftung mittels Schornstein (Kampagne 4)*

Diese Kampagne untersuchte Schornsteine mit dem Ziel in Bestandsgebäuden vorhandene Infrastruktur für Schornsteine auch mit einem passiven (intrinsisch sicherem) Sicherheitskonzept wiederzuverwenden. In einem Schornstein konnte die notwendige Verdrängung des Gemisches erreicht werden. Jedoch sind die Verweilzeiten von zündfähigen Gemischen in einem gut abgedichtetem Gehäuse mit den untersuchten Ansätzen noch zu langwierig. Für gut abgedichtete Gehäuse konnte für den Aufstellungsraum zwar die Gefahrenfreiheit nachgewiesen werden (keine Entstehung eines zündfähigen Gemisches). Doch sind lange Verweilzeiten zündfähiger Gemische lang andauernde Gefahren und diese sind in der Sicherheitstechnik stets zu vermeiden. Das Konzept ist daher noch nicht einsatzfähig und erfordert weitere Optimierungen – etwa eine verbesserte Methode für einen gezielten Windfang auf dem Auslass des Schornsteins.

2.3.9.5 *Passive Entlüftung mittels Drainage (Kampagne 5)*

Ähnlich wie für die Untersuchungen mit Schornsteinen eröffnet die Verwendung einer Drainage neue Möglichkeiten freigesetztes Kältemittel gefahrenfrei zu verdünnen. Jedoch ist die Installation zwingend oberhalb der Erdgleiche notwendig und setzt einen ausreichenden Dichteunterschied voraus. Die experimentellen Ergebnisse zeigen, dass unter bestimmten Wind und Neigungsbedingungen die Gefahr reduziert werden kann. Doch analog zu den Versuchen mit Schornstein sind die Verweilzeiten zündfähiger Gemische in der Anlage zu lang. Auch hier bedarf es weiterer Untersuchungen für einen robusten und gefahrenfreien Einsatz.

2.4 Systemkonzepte für Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern

2.4.1 Grundlegende Bewertung unterschiedlicher Wärmepumpenlösungen

Wärmepumpensysteme für Mehrfamilienhäuser sind unter unterschiedlichen Aspekten zu bewerten. Nachfolgend werden typische Grundkonfigurationen für den Ersatz zentraler oder dezentraler fossiler Erzeuger in einem ersten Schritt qualitativ bewertet.

2.4.1.1 Definition Systemvarianten

Nachfolgend sind alle untersuchten Systemvarianten zusammengestellt. Es wurden ausschließlich monoenergetische Lösungen berücksichtigt.

Zentrale Wärmeversorgung

Tabelle 13 fasst die berücksichtigten Wärmepumpenlösungen für die zentrale Wärmeversorgung zusammen. Die Varianten mit elektrischen Durchlauferhitzern (DLE) in den Wohnungen kommen ohne Warmwasserzirkulation mit den entsprechenden Verlusten aus. Wohnungsübergabestationen erwärmen das Warmwasser dezentral, direkt in den Wohnungen. Demnach fallen diese Systeme unter die Kleinanlagenregelung nach DVGW-Blatt 551 und ermöglichen eine reduzierte Temperatur von 50 bis 55°C im Gebäudenetz und Speicher¹.

In Variante 4 versorgt eine Luft-Sole-Außeneinheit die Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Niedertemperaturwärme. Da der Verdichter somit im Gebäude sitzt, ist von geringeren Geräuschemissionen der Außeneinheit auszugehen. Ebenso sind bei der Aufstellung der Außeneinheit keine R290-bedingten sicherheitstechnischen Anforderungen einzuhalten.

Tabelle 13: Untersuchte Systemvarianten für die zentrale Wärmeversorgung

Nr.	Beheizung durch	BWW-Bereitung durch
1	Sole-Wasser-WP (Erdreich)	el. Durchlauferhitzer
2	Sole-Wasser-WP (Erdreich)	WP
3	Sole-Wasser-WP (Erdreich)	WP + Wohnungsübergabestation
4	Sole-Wasser-WP (Luft)	WP
5	Luft-Wasser-WP (außen aufgestellt)	el. Durchlauferhitzer
6	Luft-Wasser-WP (außen aufgestellt)	WP
7	Luft-Wasser-WP (außen aufgestellt)	WP + Wohnungsübergabestation

Wohnungsweise (dezentrale) Wärmeversorgung

Tabelle 14 gibt eine Übersicht über die untersuchten Wärmepumpenlösungen zur dezentralen Wärmeversorgung. In den Varianten 1 bis 6 verteilt ein fassadenverlegtes Quellnetz die Niedertemperaturwärme an die Wärmepumpen in den Wohnungen.

¹ DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. - Technisch-wissenschaftlicher Verein. DVGW W 551: *Drinking water heating and drinking water piping systems - Technical measures to reduce Legionella growth - Design, construction, operation and rehabilitation of drinking water installations*; DVGW, 2004.

In Varianten 7 und 8 verfügt jede Wohnung über ein Sole-Split-System. Damit unterliegt die Positionierung der Außeneinheit keinen externen sicherheitstechnischen Einschränkungen und die Wärmepumpe kann als eigensicheres Gerät mit einer R290-Füllmenge unter 152g ausgeführt werden.

Die unterschiedlichen Varianten der Brauchwarmwasser-Bereitung (BWW) sind dem knappen Platzangebot in den Wohnungen geschuldet (s. Abbildung 1 bzw. 2). DLE lassen sich i.d.R. problemlos unterbringen. Speicher bis 60l sind im Baumaß von Gasthermen realisierbar, 120l lassen sich in Weißgeräte-Dimensionen unterbringen.

Tabelle 14: Untersuchte Systemvarianten für die dezentrale (wohnungsweise) Wärmeversorgung

Nr.	Beheizung durch	BWW-Bereitung durch (Speichervolumen)
1	Sole-Wasser-WP (Quellnetz; Erdreich)	el. Durchlauferhitzer (-)
2	Sole-Wasser-WP (Quellnetz; Luft)	el. Durchlauferhitzer (-)
3	Sole-Wasser-WP (Quellnetz; Erdreich)	WP (60l)
4	Sole-Wasser-WP (Quellnetz; Luft)	WP (60l)
5	Sole-Wasser-WP (Quellnetz; Erdreich)	WP (120l)
6	Sole-Wasser-WP (Quellnetz; Luft)	WP (120l)
7	Sole-Wasser-WP (dezentraler Luft-Sole-WÜ)	WP (60l)
8	Sole-Wasser-WP (dezentraler Luft-Sole-WÜ)	WP (120l)
9	Luft-Wasser WP (Monoblock)	WP (60l)
10	Luft-Wasser WP (Monoblock)	WP (120l)
11	Luft-Luft-WP*	el. Durchlauferhitzer (-)

2.4.1.2 Datengrundlage für die Bewertung

Im Folgenden ist für unterschiedliche Kriterien, die bei der Bewertung von Wärmepumpenlösungen für bestehende Mehrfamiliengebäude relevant sind, die Datengrundlage erläutert. Zur vergleichenden Darstellung werden die Ergebnisse jeweils auf eine Skala von 1 (schlechtestes Ergebnis) bis 5 (bestes Ergebnis) normiert. Einzelne Kriterien sind nur für die dezentralen Lösungen relevant und werden dementsprechend nur für diese bewertet.

Effizienz

Die Jahresarbeitszahl (JAZ) der wasserführenden Wärmepumpensysteme wird mithilfe des am Fraunhofer ISE entwickelten Simulationswerkzeugs HEBAP (Heating Energy Balancing Program) dynamisch über ein Jahr berechnet¹. Dabei werden Lastprofile für Gebäudeheizlast und Brauchwarmwasserzapfung als Zeitreihen eingelesen. Die Wärmepumpen werden durch Kennfelder der drei im Projekt entwickelten Prototypen abgebildet, welche mit der Kältekreissoftware IMST-ART erstellt wurden². Für die Wärmeübergabe wird im Auslegungspunkt eine Temperaturspreizung von 55/45°C angesetzt, die ggf. durch partiellen Heizkörperaustausch erreicht wird.

¹ Bongs, C.; Wapler, J.; Dinkel, A.; Miara, M.; Auerswald, S.; Lämmle, M.; Hess, S.; Kropp, M.; Eberle, R.; Rodenbücher, B.; et al. *LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden („LowEx-Bestand Analyse“)*. Abschlussbericht, 2023

² IMST-ART v4.10 Release @ IMST-ART. Available online: <http://www.imst-art.com/?p=612>.

Sofern für einzelne Systemlösungen nicht anders angegeben, erfolgt die Dimensionierung der Komponenten entsprechend VDI4645 und für einen Bivalenzpunkt von -5°C . Für die direktelektrische Brauchwarmwassererwärmung wird ein Durchlauferhitzer mit 98% Wirkungsgrad angenommen.

Luft-Luft-Systeme können mit dem bestehenden Programm nicht berechnet werden. Daher wird deren Effizienz folgendermaßen abgeschätzt: Aus allen von der BAFA als förderfähig gelisteten Wärmepumpen wird jeweils für Luft-Wasser-Geräte mit dem Kältemittel R290 (bei 55°C) und Luft-Luft-Wärmepumpen mit Heizleistungen zwischen 3 und 12kW die mittlere jahreszeitbedingte Raumheizeffizienz ermittelt und in den SCOP umgerechnet¹. Für die 511 gelisteten R290-Geräte in diesem Leistungsbereich ergibt sich dabei ein mittlerer SCOP von 3.54, für die 135 Luft-Luft-Geräte ist der Mittelwert 4.64. Die Differenz (1.09) wird auf die dynamisch simulierte JAZ der Luft-Wasserwärmepumpe aufgeschlagen und das Ergebnis als JAZ des Luft-Luft-Systems angesetzt. Da sich Luft-Luft-Systeme nicht zur Beheizung von Badezimmern eignen, wird für dieses flächenanteilig mit einer direktelektrischen Heizung gerechnet.

Platzbedarf (innen)

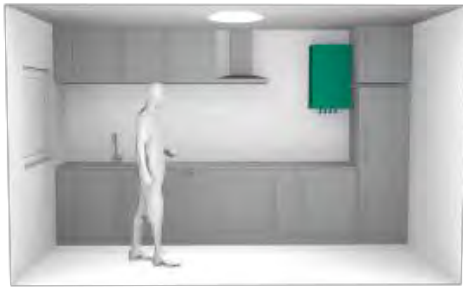
Bei den zentralen Systemen definiert sich Platzbedarf als Summe der Aufstellfläche für Speicher und Wärmepumpe. Grundlage ist die Komponentenauslegung für die dynamischen Simulationen (s. Kapitel 2.3.1). Da die einbringbare Größe von Komponenten im Bestand durch bestehende Durchgänge, Türmaße und Deckenhöhen limitiert ist, wird das maximale Volumen einzelner Speicher auf 800l begrenzt. Größere Volumina müssen auf mehrere Einheiten aufgeteilt werden. Um die Dämmung und hydraulische Anbindung zu berücksichtigen, wird vereinfachend für jeden Speicher eine Aufstellfläche von 1 m^2 angesetzt.

Die Grundfläche der innenaufgestellten Wärmepumpen wird von dem im Projekt entwickelten Prototypen abgeleitet. Diese benötigen rund $0,5\text{m}^2$ bei 30kW Nennleistung. Um die Zugänglichkeit zu berücksichtigen, wird jedoch ebenfalls eine Fläche von 1m^2 angesetzt. Es können bis zu 2 Wärmepumpen übereinander angeordnet werden.

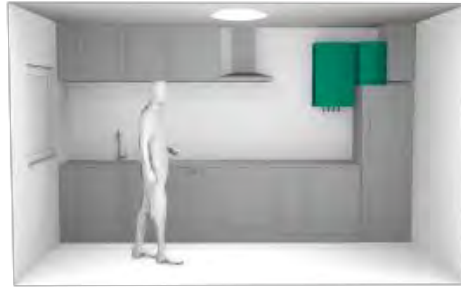
Bei den dezentralen Systemen ist das Bauvolumen (Summe aus Wärmepumpe und Speicher) ausschlaggebend. Aufgrund des idR knappen Platzangebots werden die in Abbildung 72 dargestellten Varianten berücksichtigt. Ausgangspunkt ist das Bauvolumen der bestehenden Gastherme (typischerweise rund $450\text{mm} \times 350\text{mm} \times 750\text{mm}$, BxTxH). Wärmepumpenlösungen, die keinen zusätzlichen Bauraum erfordern (V0), erhalten die bestmögliche Bewertung von 5. Der Platzbedarf für elektrische Durchlauferhitzer wird dabei nicht berücksichtigt. Bei V1 wird das Bauvolumen der Gastherme für einen Speicher mit 60l genutzt, die Wärmepumpe wird dabei in einem kleinen Zusatzgerät umgesetzt. V2 beinhaltet einen 120l Speicher, der sich in Weißgeräte-Dimensionen ($600 \times 600 \times 850\text{mm}$) umsetzen lässt, das Bauvolumen der Gastherme wird dabei frei. In V3 wird die Wärmepumpen anstelle der Gastherme positioniert und der Speicher wie in V2 ausgeführt.

¹ Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle. *Liste der förderfähigen Wärmepumpen mit Prüf-/Effizienznachweis*, Eschborn, 2024

V0 – wandhängend; Bauvolumen 118 l, max. Speichervolumen 60 l



V1 – Speicher wandhängend; Bauvolumen 118 + 40 l, max. Speichervolumen 60 l



V2 – Speicher bodenstehend; Bauvolumen 306 + 40 l, max. Speichervolumen 120 l



V3 – Speicher bodenstehend; Bauvolumen 306 + 118 l, max. Speichervolumen 120 l

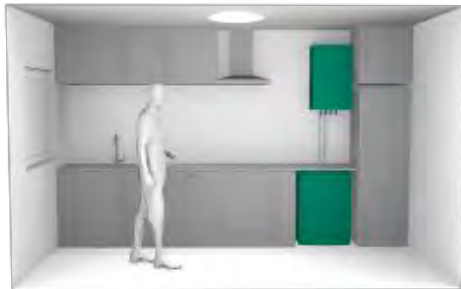


Abbildung 72: Berücksichtigte Varianten für dezentrale Wärmepumpenlösungen

El. Anschlussleistung

Die elektrische Anschlussleistung wird als Maximalwert der elektrischen Bezugsleistung bei der dynamischen Simulation (Kapitel 2.3.1) definiert und beinhaltet den Bezug durch die Wärmepumpe(n) und direktelektrische Heizeinheiten.

Komfort innen (nur dezentrale Systeme)

Der thermische Komfort der Wärmeübergabesysteme (Radiator bzw. Heizkonvektor) wird durch Literaturquellen gegeneinander bewertet^{1 2}. Ergänzend werden Angaben zum Schallleistungspegel aus von marktverfügbaren Geräten aus der Eurovent Datenbank herangezogen.

Außenwirkung (akustisch/optisch)

Die Bewertung der Außenwirkung beinhaltet die Anzahl sichtbarer Komponenten (Außeneinheiten) sowie die zu erwartende Schallemissionen. Eine größere Zahl sichtbarer Komponenten beeinträchtigt das optische Erscheinungsbild des Gebäudes und erhöhen die Wahrscheinlichkeit von Lärmbelastung, somit wirkt sie sich negativ auf die Bewertung aus. Gerade bei hohen Leistungen sind in aller Regel die Verdichter für den

¹ Wu X., Fang L., Olesen B.W., Zhao J., Wang F.: Comparison of indoor air distribution and thermal environment for different combinations of radiant heating systems with mechanical ventilation Systems; Building Services Engineering Research and Technology, 39 (1), pp. 81 - 97, DOI: 10.1177/0143624417710105

² Oravec J., Šikula O., Krajčík M., Arıcı M., Mohapl M.; A comparative study on the applicability of six radiant floor, wall, and ceiling heating systems based on thermal performance Analysis (2021) Journal of Building Engineering, 36, art. no. 102133, DOI: 10.1016/j.jobee.2020.102133

Gesamtschalleistungspegel von Luft-Wärmepumpen ausschlaggebend¹. Daher erhalten Monoblock-Außeneinheiten, die sowohl Verdichter als auch Ventilator(en) enthalten, eine geringere Bewertung als reine Luft-Sole-Außeneinheiten.

Flexibilitätpotenzial

Voraussetzung für Flexibilitätpotenzial ist Speicherkapazität. Speicher für die BWW-Bereitung sind ganzjährig genutzt und bieten daher das höchste Potenzial. Heizungs-Pufferspeicher können nur während der Heizperiode zur Lastverschiebung genutzt werden. Daher wird die Kapazität der BWW-Speicher gegenüber den Heizungspuffern doppelt gewichtet. Die Kapazität des Gebäudes ist in den betrachteten Varianten jeweils identisch und fließt daher nicht in die Bewertung ein.

Zeitlich gestaffelte Renovierung möglich (nur dezentrale Systeme)

Bei der wohnungsweisen Umrüstung auf Wärmepumpen kann es von Vorteil sein, wenn dies unabhängig voneinander erfolgen kann. So kann bspw. eine Wohnung bei defekter Therme bereits umgerüstet werden, während funktionierende Gasthermen in anderen Wohnungen weiterbetrieben werden können. Die Lösungen, bei denen auch die Umgebungswärmequelle (Luft) dezentral erschlossen wird, erhalten hier die höchste Bewertung (5). Im Fall von Quellnetzen werden zumindest diese einmal verlegt, wobei nicht alle Wohnungen gleichzeitig angeschlossen werden müssen. Zentrale Luftaußeneinheiten können grundsätzlich kaskadiert und somit gestaffelt errichtet werden. Aufgrund des hohen Aufwands für die Errichtung von Erdsonden ist diese Variante hier nicht realistisch. Varianten mit elektrischem Durchlauferhitzer erfordern ggf. eine aufwändige Ertüchtigung der Elektrik, daher werden diese Varianten einen Punkt schlechter bewertet als solche mit BWW-Bereitung durch Wärmepumpen.

Investitionskosten

Grundlage für die Berechnung der Investitionskosten sind die Tabellen des Technikkatalogs zur Kommunalen Wärmeplanung der Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH². Die Kostenfunktionen für die Wärmepumpen, Erdsonden sowie Speicher wurden diesen entnommen und mittels Baukostenindex von 2022 auf das heutige Preisniveau hochgerechnet (Faktor 1,11). Für die nicht enthaltenen Komponenten Durchlauferhitzer und direktelektrischer Badheizkörper wurden durch Internetrecherchen typische Kosten ermittelt. Für Luft-Sole-Außeneinheiten wurde auf Basis von Produkten im Leistungsbereich zwischen 3 und 100 kW bei 3K Spreizung im Solekreis und 4K Differenz zur Umgebungstemperatur eine Kostenkurve generiert³. Die Baukosten für ein fassadenverlegtes Quellnetz wurde in Anlehnung an aktuelle Planungswerte ermittelt⁴.

Aufwand Sicherheit

Der Aspekt Sicherheit bewertet, welcher Aufwand nach EN 308 bzw. IEC 60335 für einen sicheren Betrieb der Wärmepumpen erforderlich ist. Lösungen, die keine externen Maßnahmen benötigen, werden mit 5 bewertet. Hohe zusätzliche Anforderungen führen zur Bewertung 1.

¹ Braungardt, S.; Gindre, T.; Oltersdorf, T.; Troll, A. Testing campaign on the energetical and acoustical behaviour of a heat pump - part 2. Montreal, Quebec, August 24th-30st

² Peters, M.; Bartenstein, B.; Hebisch, H.; Kaiser, C.; Anders, F. *Kommunale Wärmeplanung Einführung in den Technikkatalog*, Stuttgart, 2023

³ myGüntner. Available online: <https://www.myguentner.com/#/login?redirectFrom=/gpc>

⁴ BKI. BKI Positionen 12. Available online: <https://bki.de/bki-positionen>

Zukunftssicherheit Kältemittel

Bei den dezentralen Lösungen werden neben wasserführenden R290-Wärmepumpen auch Luft-Luft-Geräte mit R32 als Variante zur Dekarbonisierung einbezogen. Die Zukunftssicherheit beider Kältemittel wird unter Berücksichtigung der F-Gase-Verordnung sowie der aktuell überarbeiteten REACH-Verordnung bewertet.

2.4.1.3 Ergebnisse für zentrale Wärmeversorgung

Abbildung 73 vergleicht drei zentrale Wärmeversorgungsvarianten jeweils mit zentraler BWB-Bereitung über Frischwasserstation: Sole-WP mit Erdsonden, Sole-WP mit Luft-Außeneinheit als Quelle („Sole-Split“) sowie eine außenaufgestellte Luft-WP (Monoblock). In Puncto Effizienz liegt die Erd-Wärmepumpe aufgrund der höheren Quelltemperaturen vor den Luftvarianten, wobei das Sole-Split-System aufgrund eines zusätzlichen Wärmeübertragers am schlechtesten abschneidet. Der Platzbedarf im Keller ist bei allen Varianten gleich, da das Monoblockgerät zwar außenaufgestellt ist, aufgrund der höheren Nennleistung aber einen zusätzlichen Pufferspeicher erfordert.

Da der Verdichter beim Sole-Split-System im Gebäude liegt, fällt die Außenwirkung hier etwas besser als bei Monoblock-System aus. Aufgrund der hohen Erschließungskosten liegen die Investitionskosten für Erdsonden-Systeme deutlich über denen von Varianten mit Luft als Quelle, daher erhält dieses die geringste Bewertung. Das Sole-Split-System ist aufgrund der zusätzlichen Komponente etwas teurer als ein reiner Monoblock und liegt daher in der Bewertung einen Punkt tiefer. Die Sicherheitsanforderungen lassen sich dagegen beim außenaufgestellten Monoblock mit vergleichsweise geringem Aufwand erfüllen.

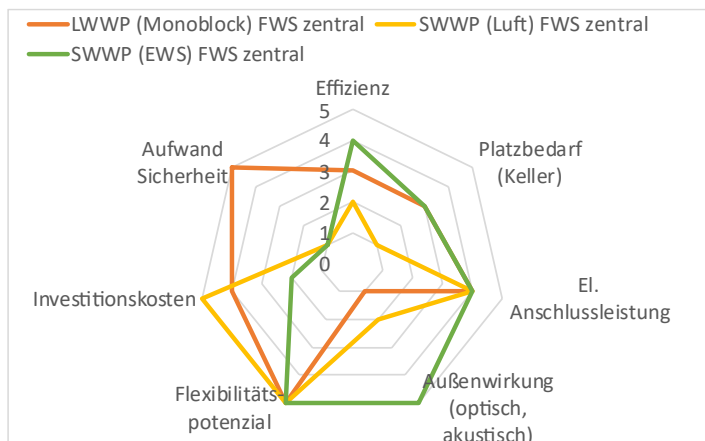


Abbildung 73: Einfluss des Wärmepumpensystems bei zentraler Wärmeversorgung auf die Kriterien; LWWP: Luft-Wasser-WP, SWWP: Sole-Wasser-WP, EWS: Erdwärmesonde, FWS: Frischwasserstation; 5: höchste Bewertung, 1: geringste Bewertung

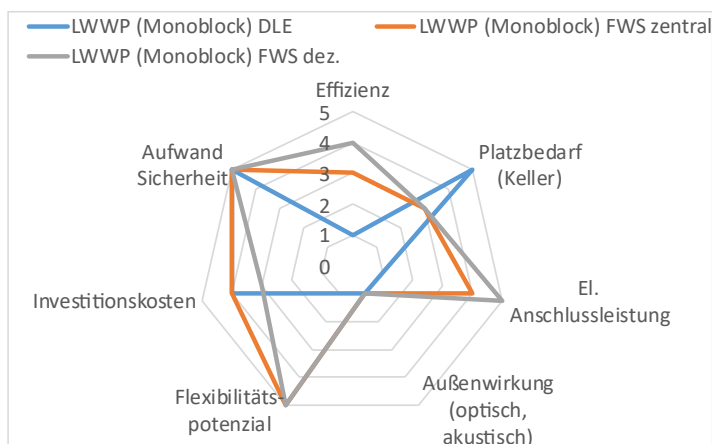


Abbildung 74: Einfluss der Art der Brauchwarmwassererwärmung bei zentraler Wärmeversorgung auf die Kriterien; LWWP: Luft-Wasser-WP, DLE: Durchlauferhitzer; 5: höchste Bewertung, 1: geringste Bewertung

In Abbildung 74 sind die unterschiedlichen Varianten der Brauchwarmwasserbereitung in Kombination mit einer Luft-Wärmepumpe einander gegenübergestellt. Die Lösung mit dezentralen Durchlauferhitzern (DLE) stellt sich hinsichtlich Platzbedarf im Keller positiv dar. Trotz der wegfallenden Zirkulationsverluste, die in gleicher Höhe wie der eigentliche Warmwasserverbrauch liegen, ist diese Variante die ineffizienteste. Zudem erfordert sie die höchste elektrische Anschlussleistung. Dem gegenüber lassen sich mit dezentralen Frischwasserstationen aufgrund der reduzierten Zirkulationstemperatur die höchste Effizienz bei niedrigster Anschlussleistung erzielen. Jedoch fallen dadurch höhere Investitionskosten an. Die Investitionskosten für eine zentrale Frischwasserstation mit Pufferspeicher liegen in gleicher Größenordnung wie für die dezentralen Durchlauferhitzer.

2.4.1.4 Ergebnisse für wohnungsweise (dezentrale) Wärmeversorgung

Einen Überblick über die Eigenschaften unterschiedlicher Wärmepumpen-Lösungen zum dezentralen Ersatz von Gasetagenheizungen gibt Abbildung 75. Hinsichtlich Effizienz liegen Multi-Split-Systeme in Kombination mit Durchlauferhitzern für die BWB-Bereitung gleichauf mit Sole-Wärmepumpe, die über ein Quellnetz Energie aus dem Erdreich beziehen. Auch auf den Platzbedarf in der Wohnung wirken sich Durchlauferhitzer positiv aus – auf Kosten der elektrischen Anschlussleistung.

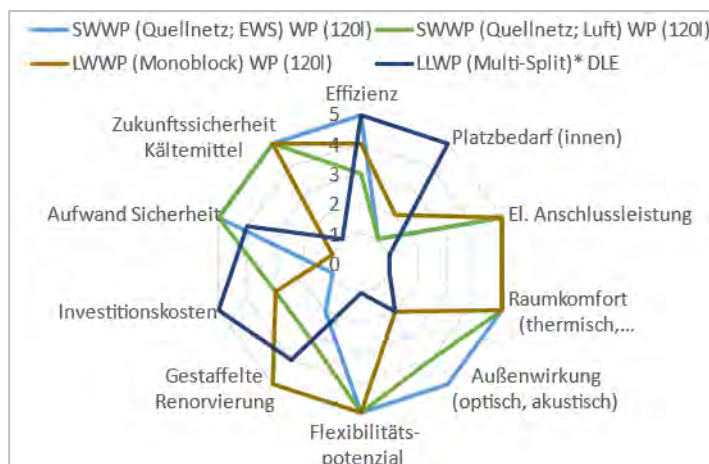


Abbildung 75: Einfluss des Wärmepumpensystems bei dezentraler Wärmeversorgung auf die Kriterien; LWWP: Luft-Wasser-WP, SWWP: Sole-Wasser-WP, LLWP: Luft-Luft-Wärmepumpe, EWS: Erdwärmesonde, FWS: Frischwasserstation; 5: höchste Bewertung, 1: geringste Bewertung

In experimentellen und theoretischen Studien wurde nachgewiesen, dass passive Radiatorheizungen aufgrund der geringeren Strömungsgeschwindigkeiten und des höheren Strahlungsanteils in der Regel höheren thermischen Komfort gegenüber Konvektoren ermöglichen¹. Auch wenn neue Inneneinheiten auf kleiner Stufe sehr leise arbeiten können (z.B. [16], ist davon auszugehen, dass an kalten Tagen bei höheren Schallleistungspegeln arbeiten. Unter den 606 von Eurovent getesteten reversiblen Multi-Split-Geräte mit Nennleistung <12kW liegen die Norm-Schallleistungspegel der Inneneinheiten zwischen 48 und 65 dB(A)². Daher erhält die Luft-Luft-WP in der Kategorie Raumkomfort die niedrigste Bewertung, während die übrigen Systeme wasserführendem Radiatorheizsystem die Maximalbewertung erzielen.

¹ Olesen, B.W.; Mortensen, E.; Thorshauge, J.; Berg-Munch, B. Thermal comfort in a room heated by different methods. *ASHRAE Transactions* **1980**, *86*, 34–48.

² Suchergebnisse im Verzeichnis der zertifizierten Produkte | Eurovent Certita Certification: Air Conditioner - Air to Air - Multisplit - reversible). Available online [https://www.eurovent-certification.com/de/advancedsearch/result?program=AC&product_type=AC 1/A/M/R&keyword=#access-results](https://www.eurovent-certification.com/de/advancedsearch/result?program=AC&product_type=AC%201/A/M/R&keyword=#access-results)

Die Außenwirkung ist bei den Lösungen mit wohnungsweiser Erschließung aufgrund der Vielzahl von Außeneinheiten und dem damit einhergehenden Risiko von Lärmbelastung am negativsten. Dafür bieten diese Systeme mehr Freiheit bzgl. zeitlich versetzter (gestaffelter) Renovierung der einzelnen Wohneinheiten.

Die Anfangskosten sind bei den Luft-Luft-Systemen am geringsten, da diese in großen Stückzahlen in Fernost hergestellt werden. Die Luftsysteme erfordern unabhängig von der Position der Quelle eine ähnliche Investition.

Hermetische geschlossene Kältekreisläufe mit einer R290-Füllmenge unter 152g erfordern gemäß geltender Normen keine externen Sicherheitsvorkehrungen und erhalten die Bewertung 5. Die Sicherheitsanforderungen von Multi-Split-Systemen mit R32 lassen sich trotz Brennbarkeit idR ebenfalls gut erfüllen, daher wird diesen die Bewertung 4 erteilt. Luft-Wasser-WP haben üblicherweise Füllmengen >500g und erfordern mit R290 Sicherheitsabstände (z.B. zu Balkonen und darunterliegenden Fenstern), die sich gerade im vorliegenden Gebäude schlecht einhalten lassen. Daher erhalten diese Varianten die Bewertung 1.

Wie anfangs dargestellt, unterliegt R290 aufgrund des geringen GWP und der Nicht-Toxizität keinen umweltbezogenen Einschränkungen und wird somit hinsichtlich Zukunftssicherheit mit 5 Punkten bewertet. R32 dagegen hat ein GWP >150. Gemäß der F-Gas-Verordnung darf es ab dem 1.1.2027 nur noch in Ausnahmefällen in neuen Split-Anlagen bis 12kW eingesetzt werden. Somit erhält es in diesem Punkt die geringste Bewertung.

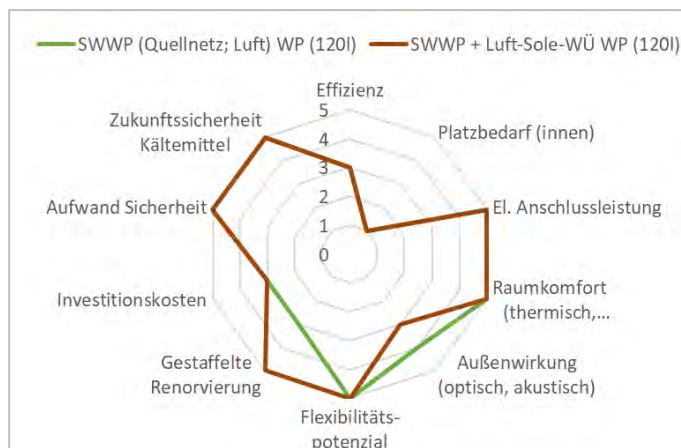


Abbildung 76: Einfluss der Position der Außeneinheit von Sole-Split-Geräten bei dezentraler Wärmeversorgung auf die Kriterien; SWWP: Sole-Wasser-WP, WÜ: Wärmeübertrager; 5: höchste Bewertung, 1: geringste Bewertung

Abbildung 76 stellt zwei Sole-Split-Varianten einander gegenüber: eine zentrale Außeneinheit und Verteilung über ein Quellnetz an der Fassade sowie eine wohnungsweise Außeneinheit (Luft-Sole-Wärmeübertrager). Das grundsätzliche Verhalten beider Systeme ist identisch. Sie unterscheiden sich aufgrund der Anzahl der erforderlichen Außeneinheiten in der Außenwirkung, sowie in der Möglichkeit der gestaffelten Renovierung. Die Investitionskosten liegen in vergleichbarer Höhe: bei der zentralen Variante werden die geringeren spezifischen Kosten für eine größere Quelle Außeneinheit gegenüber mehreren kleinen durch das erforderliche Quellnetz kompensiert.

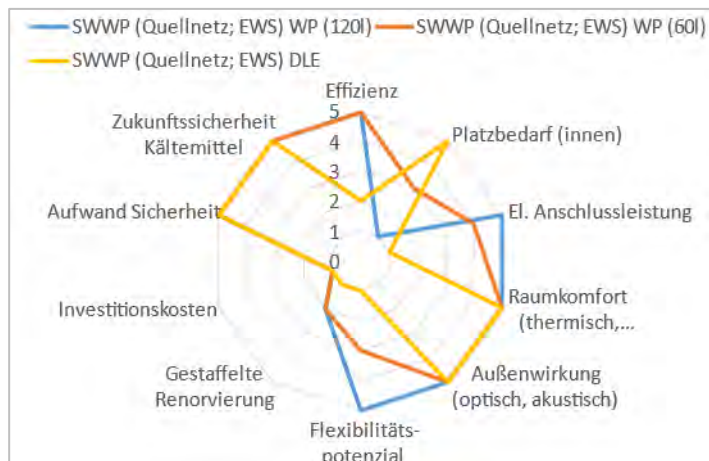


Abbildung 77: Einfluss der Art der Brauchwarmwassererwärmung bei dezentraler Wärmeversorgung auf die Kriterien; SWWP: Sole-Wasser-WP, EWS: Erdwärmesonde, DLE: Durchlauferhitzer; 5: höchste Bewertung, 1: geringste Bewertung

Unterschiedliche Varianten der BWB-Bereitung in Kombination mit einer Wohnungswärmepumpe werden in Abbildung 77 verglichen. Auf die Auswirkungen eines Durchlauferhitzers auf Effizienz, Platzbedarf, Anschlussleistung und Flexibilitätspotenzial wurde bereits bei den zentralen Systemen tiefer eingegangen. Somit konzentriert sich dieser Abschnitt auf die Unterschiede bei der Speicherdimensionierung. Auf die Effizienz hat diese für den untersuchten Fall (2 Personen pro Wohnung) keine Auswirkung. Die höheren thermischen Verluste des 120l-Speichers kompensieren den Strombedarf für direktelektrische Nachheizung. Jedoch fällt die erforderliche Anschlussleistung mit 60l-Speicher wegen der Nachheizung etwas höher aus, was die Bewertung reduziert. Weiter wirkt sich das größere Speichervolumen nachteilig auf den Platzbedarf aber vorteilhaft auf das Flexibilitätspotenzial aus.

2.4.1.5 Fazit

Diese Voruntersuchung zeigt auf, dass es aufgrund der Anzahl teils widersprüchlicher Kriterien, die im Mehrfamilienhausbestand zu berücksichtigen sind, nicht die eine, universelle Wärmepumpenlösung für die Sanierung gibt. Jedoch wird offensichtlich, dass es eine Reihe an Stellschrauben gibt, durch die Systemlösungen an unterschiedliche Anforderungen angepasst werden können.

Für zentrale Wärmepumpenlösungen sind R290-Anlagen mit höheren Leistungen sowohl für Innen- als auch Außenanwendungen zunehmend verfügbar. Somit kann auf unterschiedliche Randbedingungen wie Quellverfügbarkeit und Aufstellfläche flexibel eingegangen werden. Eine dezentrale BWB-Bereitung sollte in Betracht gezogen werden, um die Zirkulationsverluste zu reduzieren und die Gesamteffizienz zu steigern.

Kompakte R290-Wärmepumpen mit weniger als 152 g Kältemittel eignen sich durchaus zum Ersatz von Gasetagenheizungen. Herausfordernd – insbesondere hinsichtlich Aufstellplatz für den erforderlichen Speicher – stellt sich die Brauchwarmwasserbereitung dar. Kleine Speicher in Kombination mit einem Durchlauferhitzer als „Booster“ können dabei ein Kompromiss zwischen Platz, Effizienz und elektrischer Anschlussleistung darstellen.

Für den Einsatz von R290-Monoblocksystemen an Fassaden kann die Einhaltung des Sicherheitsabstands zu Fenstern und Balkon limitierend sein.

Aktuell scheinen Multi-Split-Systeme mit R32 attraktiv hinsichtlich Investitionskosten und Effizienz. Es bestehen jedoch Bedenken hinsichtlich des Komforts, der Anschlussleistung für die direktelektrische Brauchwarmwasserbereitung und des verwendeten Kältemittels.

Eine Gesamtübersicht über alle Ergebnisse findet sich in Abbildung 78 sowie Abbildung 79.

Heizung	LWWP (Monoblock)	LWWP (Monoblock)	LWWP (Monoblock)	SWWP (Luft)	SWWP (EWS)	SWWP (EWS)	SWWP (EWS)
BWW-Bereitung	DLE	FWS zentral	FWS dez.	FWS zentral	DLE	FWS zentral	FWS dez.
Effizienz	1	3	4	2	2	4	5
Platzbedarf (Keller)	5	3	3	1	5	3	3
El. Anschlussleistung	1	4	5	4	1	4	5
Außenwirkung (optisch, akustisch)	1	1	1	2	5	5	5
Flexibilitäts-potenzial	1	5	5	5	1	5	5
Investitionskosten	4	4	3	5	2	2	1
Aufwand Sicherheit	5	5	5	1	1	1	1

Abbildung 78: Übersicht Bewertung für alle untersuchten zentralen Wärmepumpenlösungen

Heizung	SWWP (Quellnetz; EWS)	SWWP (Quellnetz; EWS)	SWWP (Quellnetz; EWS)	SWWP (Quellnetz; Luft)	SWWP (Quellnetz; Luft)	SWWP (Quellnetz; Luft)	SWWP + Luft-Sole- WÜ	SWWP + Luft-Sole- WÜ	LWWP (Monoblock)	LWWP (Monoblock)	LWWP (Monoblock)	LLWP (Multi- Split)*	LLWP (Single- Split)
BWW-Bereitung	DLE	WP (60l)	WP (120l)	DLE	WP (60l)	WP (120l)	WP (60l)	WP (120l)	DLE	WP (60l)	WP (120l)	DLE	DLE
Effizienz	2	5	5	1	3	3	3	3	1	4	4	5	5
Platzbedarf (innen)	5	3	1	5	3	1	3	1	2	4	2	5	5
El. Anschlussleistung	1	4	5	1	4	5	4	5	1	4	5	1	1
Raumkomfort (thermisch, akustisch)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	1	1
Außenwirkung (optisch, akustisch)	5	5	5	4	4	4	3	3	2	2	2	2	1
Flexibilitäts-potenzial	1	3	5	1	3	5	3	5	5	3	5	1	1
Gestaffelte Renovierung	1	2	2	2	3	3	5	5	4	5	5	4	5
Investitionskosten	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	5	5
Aufwand Sicherheit	5	5	5	5	5	5	5	5	1	1	1	4	1
Zukunftssicherheit Kältemittel	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	1	1

Abbildung 79: Übersicht Bewertung für alle untersuchten dezentralen Wärmepumpenlösungen; *R32, alle übrigen Systeme mit R290

2.4.2 Systemkonzepte für zentrale Wärmepumpensysteme

Dieser Teil bewertet den Einsatz von Verbünden aus parallel geschalteten Wärmepumpen in zentralen Heizsystemen für Gebäude. Der Einsatz mehrerer kleinerer Wärmepumpen anstelle einer großen kann folgende Vorteile bieten, z. B.:

Standard-Produkte auch bei unterschiedlichem Gebäude-Bestand: werden mehrere Gebäude mit einheitlichen Wärmepumpen-Typen bzw. -Serien umgerüstet, reduziert sich die Produktvielfalt und somit die Komplexität bei Wartung, Instandhaltung und Verwaltung.

Größerer Regelbereich der Wärmepumpen: Mehrere kleinere Wärmepumpen können sich besser an einen geringen Wärmebedarf anpassen. Dies kann das erforderliche Pufferspeichervolumen verringern und möglicherweise das Ein- und Ausschalten während Zeiten mit geringem Bedarf reduzieren.

Redundanz: Falls eine Wärmepumpe ausfällt, können die verbleibenden Wärmepumpen weiterhin Wärme liefern.

Gleichzeitiger Betrieb von Warmwasserbereitung und Raumheizung: Durch den Einsatz mehrerer Wärmepumpen kann das System in beiden Betriebsarten gleichzeitig arbeiten. Eine Wärmepumpe kann Warmwasser liefern, während die anderen Geräte im Raumheizungsmodus weiterarbeiten.

2.4.2.1 Methodik

Die Leistung des Wärmepumpen-Verbundsystems wurde anhand von Jahressimulationen unter Berücksichtigung einer Konfiguration mit drei parallel geschalteten Wärmepumpen bewertet. Dabei wurden folgende Schlüsselaspekte untersucht:

Hydraulische Verschaltung der Wärmepumpen: Es wurden verschiedene Hydraulikvarianten untersucht, um deren Einfluss auf die Wärmeverteilung und die Gesamtleistung des Systems zu bewerten.

Dimensionierung der Wärmepumpen: Die Auswirkungen verschiedener Leistungskombinationen einzelner Wärmepumpen – bei gleichbleibender installierter Gesamtleistung – wurden untersucht, um den Einfluss der Dimensionierungskombinationen auf die Systemeffizienz und -flexibilität unter variierenden Lastbedingungen zu ermitteln.

Steuerung: Es wurde eine Regelungsstrategie für den Betrieb mehrerer Wärmepumpen implementiert, wobei die Hauptherausforderungen bei der Koordination der Wärmeerzeugung durch mehrere Wärmepumpen hervorgehoben wurden.

Die Bewertung erfolgte anhand von zwei Kennzahlen:

- Jahresarbeitszahl (engl. Seasonal performance factor, SPF): mit Jahressimulationen wurde der SPF des Wärmepumpensystems als Verhältnis zwischen der insgesamt erzeugten Wärme und dem von den Wärmeerzeugern verbrauchten Strom berechnet. Als Wärmeerzeuger gelten dabei die 3 Wärmepumpen und die elektrischen Zusatzheizungen.
- Ein-/Ausschaltzyklen: Die Anzahl der Wärmepumpenstarts pro Jahr. Häufige Zyklusschwankungen können zu Verschleiß an den Kompressoren führen und deren Lebensdauer verkürzen.

Das System wurde in Anlehnung an das Beispielgebäude 4 in Potsdam modelliert (s. Kapitel 2.5.3.1), das die höchste Heizlast aller betrachteten Gebäude aufweist.

Abbildung 80 veranschaulicht den idealisierten Zusammenhang zwischen Außentemperatur, der Wärmebelastung des Gebäudes sowie den Vor- und Rücklauftemperaturen des Heizsystems. Die graue gepunktete Linie zeigt die Gebäudewärmebelastung als lineare Korrelation zur Außentemperatur. Bei einer Umgebungstemperatur von -10 °C erreicht die Wärmebelastung die Nennwärmebelastung von 70 kW. Die Nennbetriebsbedingungen für die Vorlauftemperatur (rot) und die Rücklauftemperatur (blau) der Heizkörper wurden auf 55 °C bzw. 45 °C festgelegt. Für die Dimensionierung einer Luft-Wasser-Wärmepumpe wurde der bivalente Punkt (orange gepunktete Linie) bei -5 °C gewählt. Daraus ergibt sich ein Auslegungspunkt für eine Luft-Wasser-Wärmepumpe von 52 kW A-5/W52. Der Pufferspeicher für die Raumheizung und der Warmwasserspeicher wurden auf 1000 Liter bzw. 1250 Liter ausgelegt. Der Pufferspeicher wurde auf der Grundlage von 20 Litern pro kW Wärmepumpenleistung am Bivalenzpunkt sowie gemäß VDI 4645 dimensioniert. Der Warmwasserbedarf wurde auf der Grundlage von 40 Bewohnern berechnet.

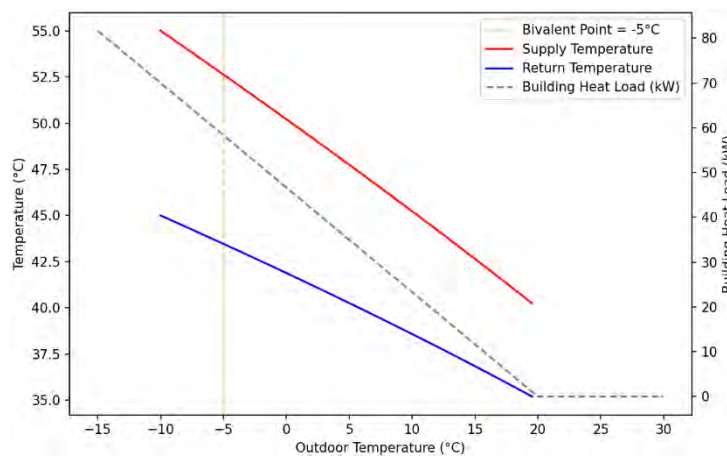


Abbildung 80: Vor- und Rücklauftemperaturprofil des Heizsystems in Abhängigkeit von der Außentemperatur sowie der entsprechenden Wärmelast des Gebäudes.

Als Referenz dient bei der Auswertung eine einzelne große Luft-Wasser-Wärmepumpe; die Konfiguration ist in Abbildung 81 dargestellt. Der bivalente Punkt für die Auslegung der Wärmepumpe liegt bei einer Außentemperatur von $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die erforderliche Wärmepumpe hat eine resultierende Nennleistung von 70 kW unter der Betriebsbedingung A2/W35 und von 52 kW unter der bivalenten Betriebsbedingung A-5/W52. Zusätzlich wurden elektrische Zusatzheizungen eingesetzt. Diese sind in als Heizstäbe (HR) dargestellt.

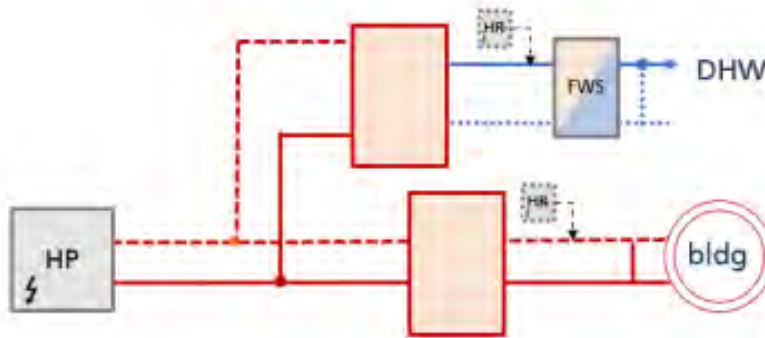


Abbildung 81: zentrale Luft-Wasser-Wärmepumpenkonfiguration.

2.4.2.2 Ergebnisse zu verschiedenen hydraulischen Konfigurationen

Für die Untersuchungen wurden exemplarisch Systeme bestehend aus drei Wärmepumpen untersucht. Folgende Varianten wurden dabei berücksichtigt (s. Abbildung 82)

One-mode-Konfiguration: bei der alle drei Wärmepumpen denselben hydraulischen Anschluss mit einem 3-Wege-Ventil teilen und jeweils entweder die Heizung oder die Warmwasserbereitung versorgen. Dabei hat der Warmwasserbetrieb Vorrang, so dass bei Warmwasserbedarf der Heizbetrieb vorübergehend unterbrochen wird und alle Wärmepumpen auf Warmwasserbetrieb umgeschaltet werden.

Dedicated-I-Konfiguration: Die Dedicated-I-Konfiguration ermöglicht einen gleichzeitigen Betrieb von Raumheizung und Warmwasserbereitung. Zwei Wärmepumpen sind ausschließlich für die Versorgung der Raumheizung vorgesehen, während eine Wärmepumpe ausschließlich für die Warmwasserbereitung zuständig ist. Ein Umschalten ist nicht möglich, da keine hydraulische Verbindung zwischen den Verbrauchern besteht.

Dedicated-II-Konfiguration: Diese Konfiguration ist eine Abwandlung des Dedicated-I-Konzepts, bei der zwei Wärmepumpen (HP1 und HP2) für die Raumheizung vorgesehen sind, während die dritte (HP3) flexibel einsetzbar ist und entweder im Raumheizungs- oder im Warmwassermodus betrieben werden kann. Dazu ist HP3 an ein 3-Wege-Ventil angeschlossen, das den Wechsel zwischen Raumheizungs- und Warmwasserspeicher ermöglicht.

Any-Mode-Konfiguration: jede der drei Wärmepumpen kann in jedem Modus betrieben werden. Wie in Abbildung 82d zu sehen ist, verfügt jede Wärmepumpe über ein eigenes 3-Wege-Ventil, wodurch sie individuell entweder dem Raumheizungs- oder dem Warmwasserspeicher zugeordnet werden kann. Daher bietet diese Konfiguration die größte Flexibilität, allerdings auf Kosten einer komplexeren hydraulischen Anordnung.

Die Konfigurationen wurden mit Wärmepumpen identischer Größe getestet. Bei den Single-Mode-, Dedicated-II- und Any-Mode-Systemen wurde die erforderliche Gesamtheizlast von 52 kW am Bivalenzpunkt gleichmäßig auf die drei Wärmepumpen aufgeteilt, wie in Abbildung 82 dargestellt. Infolgedessen wurde jede Wärmepumpe mit einer Nennleistung von 17,3 kW unter Bivalenzbedingungen A-5/W52 ausgelegt.

Im Dedicated-I-Konfigurationsschema hingegen sind nur zwei Wärmepumpen (HP1 und HP2) der Raumheizung zugeordnet. Sie müssen die gesamte Gebäudelast von 52 kW abdecken können. Daher wird die Leistung auf die beiden aufgeteilt, was bei bivalenter Regelung A-5/W52 zu einer Nennwärmeleistung von jeweils 26 kW führt. Die dritte Wärmepumpe (HP3) wird auf Basis der Warmwasserlast dimensioniert und hat eine geringere thermische Leistung von 10 kW bei A-5/W52.

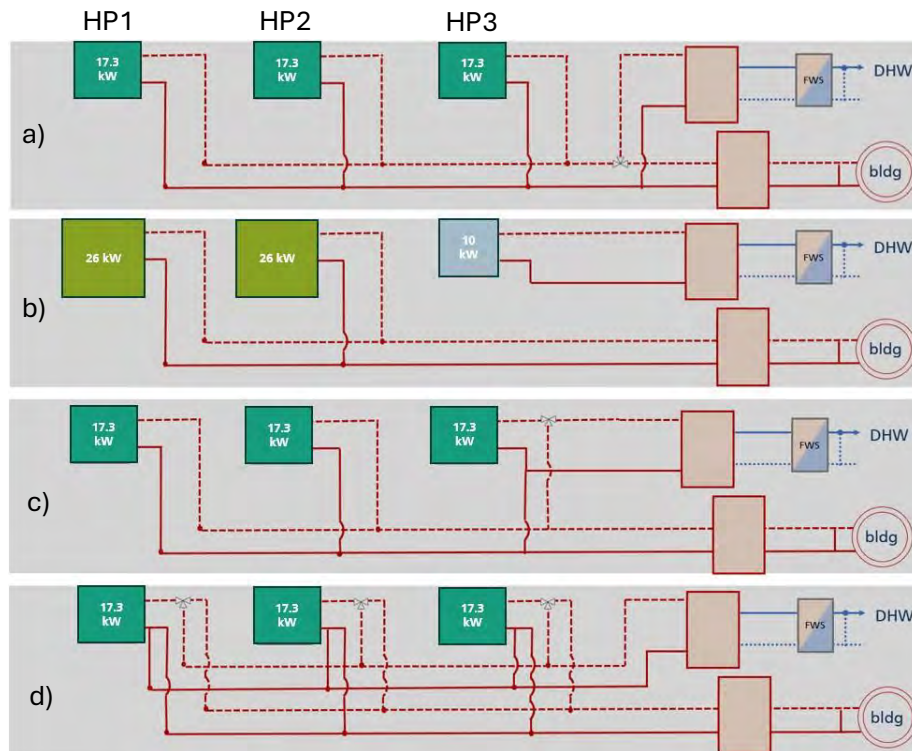


Abbildung 82: Untersuchte hydraulische Konfiguration a) stellt die Single-Mode-Konfiguration dar, b) die Dedicated-I-Konfiguration, c) die Dedicated-II-Konfiguration und d) die Any-Mode-Konfiguration. Installierte thermische Leistung der Wärmepumpen; thermische Leistung bei A-5/W52.

Abbildung 83 zeigt die Ergebnisse für die vier hydraulischen Konfigurationen und den Referenzfall mit einer einzigen großen Wärmepumpe. Die SPF-Werte der drei hydraulischen Konzepte unterscheiden sich nicht wesentlich und entsprechen in etwa dem Referenzfall, dessen SPF ebenfalls 3,10 beträgt. Eine Ausnahme bildet die Einzelmodus-Konfiguration, die einen deutlich niedrigeren SPF von 2,69 aufwies. Der Grund dafür ist der erhebliche Beitrag der Zusatzheizung, der das System ineffizienter macht. Dies ist auf den starren Betrieb zurückzuführen: Wenn die Wärmepumpen mit dem Warmwasserbedarf ausgelastet sind, können sie nicht auf einen gleichzeitigen Heizungsbedarf reagieren, was die Aktivierung der Zusatzheizung erzwingt.

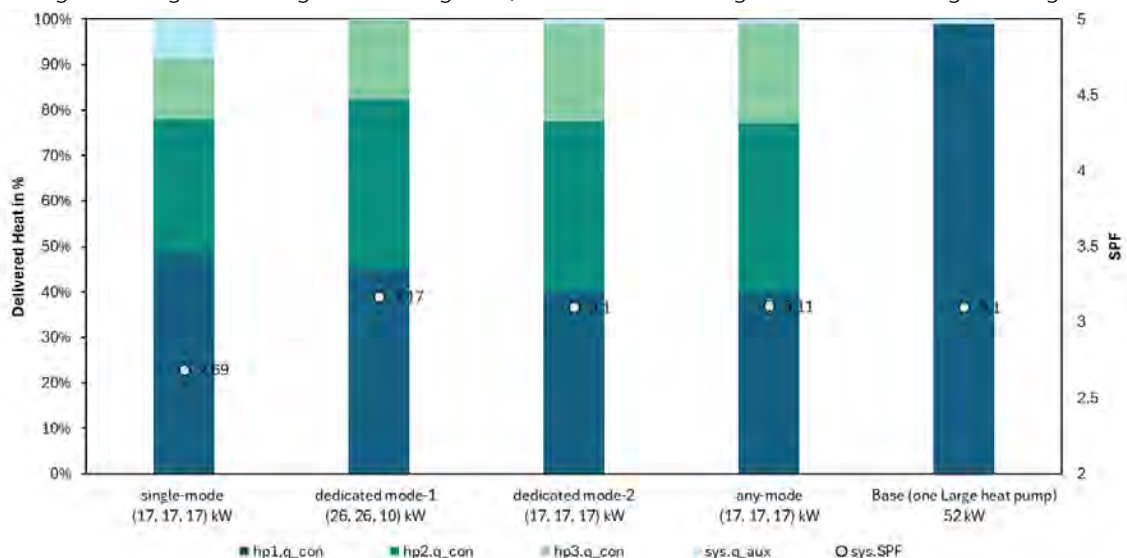


Abbildung 83: Ergebnisse zu SPF und Anteil der erzeugten/abgegebenen Wärme für die verschiedenen hydraulischen Konfigurationen mit mehreren Wärmepumpen und dem Referenzfall mit einer großen Wärmepumpe (eine große WP).

Abbildung 84 zeigt das Taktverhalten jeder Wärmepumpe in den verschiedenen hydraulischen Verbund-Konfigurationen sowie der Referenz-Wärmepumpe. Die y-Achse stellt die Gesamtzahl der Einschaltvorgänge einer Wärmepumpe dar. Die gestapelten Balken zeigen die individuellen Einschaltzahlen jeder Wärmepumpe (WP1, WP2 und WP3), wobei die Gesamthöhe des Balkens die kumulativen Einschaltzyklen für die jeweiligen hydraulischen Systeme angibt.

Die Single-Mode-Konfiguration schneidet bei hohen Schaltzyklen am schlechtesten ab, da sie nicht in der Lage ist, in zwei Modi gleichzeitig zu arbeiten, da alle drei Wärmepumpen gezwungen sind, gemeinsam zu schalten. Im Gegensatz dazu zeigen die Konfigurationen Dedicated-I, Dedicated-II und Any-Mode eine deutliche Reduzierung der Schaltzyklen, was belegt, dass das Schaltverhalten verbessert werden kann, wenn mindestens eine Wärmepumpe unabhängig den Modus wechseln kann, damit der Heizungs- und Warmwasserbetrieb parallel erfolgen kann. Die Einschaltzahlen von HP3 im Dedicated-II- und Any-Mode-Betrieb sind höher, da sie sowohl im Raumheizungs- als auch im Warmwasserbetrieb arbeiten kann. Vergleicht man die Systeme mit mehreren Wärmepumpen mit dem Referenzfall, so gibt es im Referenzfall insgesamt weniger Starts, da dort eine große Wärmepumpeneinheit verwendet wird; in allen Systemen mit mehreren Wärmepumpen, mit Ausnahme des Single-Mode-Systems, ist die Anzahl der Starts für HP1 und HP2 jedoch deutlich geringer als bei einer einzigen großen Wärmepumpe.

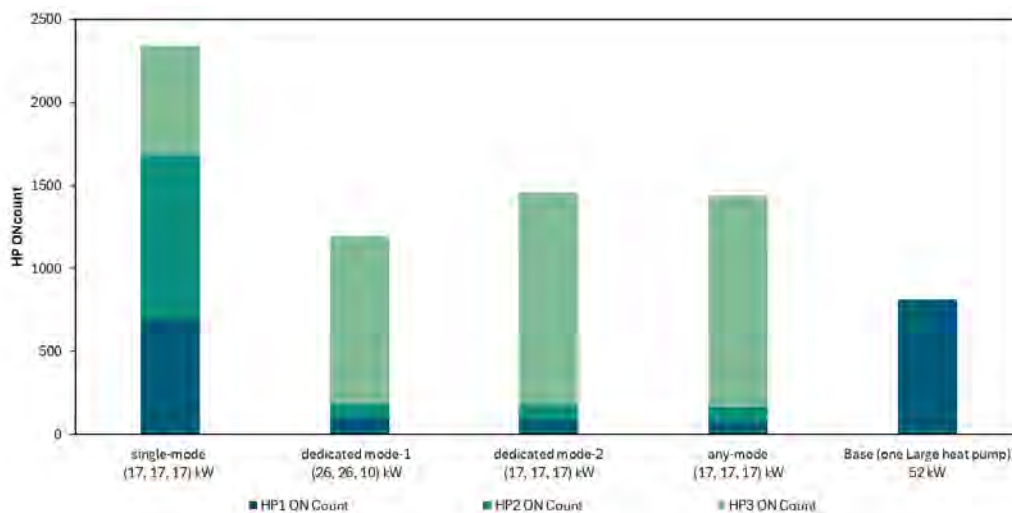


Abbildung 84: Anzahl der Einschaltvorgänge der Wärmepumpen. Für die verschiedenen hydraulischen Konfigurationen von Mehrfach-Wärmepumpen und den Referenzfall mit einer einzigen großen Wärmepumpe (eine große Wärmepumpe).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Variante Dedicated-II ein gutes Gleichgewicht zwischen Leistung, Zyklen und installierter Gesamtleistung bietet. Im Gegensatz zu Dedicated-I ermöglicht Dedicated-II, dass HP3 auch SH während Zeiten mit höherem Bedarf unterstützt und hat eine geringere installierte Gesamtleistung als Dedicated-I. Während die Any-Mode-Konfiguration vollständige Flexibilität beim Betrieb der Wärmepumpen bietet, ist die Hydraulik komplexer, was mit einer erhöhten Fehleranfälligkeit einhergeht. Die Dedicated-II-Variante erreicht mit einer einfacheren hydraulischen Konfiguration eine vergleichbare Effizienz. Die Konfiguration Dedicated-I hingegen hat den Vorteil der einfachsten und damit am wenigsten fehleranfälligen hydraulischen Konfiguration.

2.4.2.3 Parametervariation zur Wärmepumpenleistung

Es wurden vier Kombinationen von Wärmepumpenleistungen unter Verwendung der Dedicated-II-Hydraulik untersucht. Die Dimensionierungskombinationen wurden so gewählt, dass die installierte Gesamtwärmeleistung am Bivalenzpunkt 52 kW entspricht.

Bei der ersten Kombination (29 kW, 13 kW, 10 kW) wird der größte Anteil der Wärmeleistung der Wärmepumpe 1 zugewiesen, ein mittlerer Anteil der Wärmepumpe 2 und der kleine Anteil der Wärmepumpe 3, die in erster Linie den Warmwasserbedarf deckt.

Die zweite Kombination (25 kW, 17 kW, 10 kW) ist eine Variante der ersten, mit einer ausgewogeneren Verteilung zwischen den beiden Heizungspumpen (HP1 und HP2).

Die dritte Kombination (21 kW, 21 kW, 10 kW) nutzt zwei gleich große HP1- und HP2-Pumpen für die Raumheizung, während eine kleine 10-kW-HP3-Pumpe für die Warmwasserbereitung vorgesehen ist.

Die vierte Kombination (17 kW, 17 kW, 17 kW) schließlich besteht aus drei identischen Wärmepumpen, wodurch die thermische Last gleichmäßig verteilt wird.

Tabelle 15 vergleicht den System-SPF für jede Dimensionierungskombination. Der SPF bleibt bei allen Dimensionierungskombinationen nahezu identisch bei etwa 3,15. Dies deutet darauf hin, dass die Umverteilung der thermischen Leistung zwischen den Wärmepumpen kaum Einfluss auf den System-SPF hat.

Tabelle 15: SPF-Ergebnisse für verschiedene Kombinationen von Wärmepumpen für die Konfiguration Dedicated-II. Die verschiedenen Kombinationen der installierten Leistung werden durch (HP1, HP2, HP3) kW dargestellt.

Hydraulikvariante	Nominalleistung WP1, WP2, WP3 [kW]	SPF
Dedicated II	29, 13, 10	3,14
Dedicated II	25,17,10	3,15
Dedicated II	21, 21, 10	3,15
Dedicated II	17, 17, 17	3,10

Ein ähnlicher Trend ist auch im Taktverhalten der Kombinationen zu beobachten. Die ersten drei Konfigurationen weisen nahezu die gleiche Anzahl von Einschaltvorgängen auf. Im Fall identischer Wärmepumpen ist hingegen ein leichter Anstieg der Zyklushäufigkeit von HP3 zu verzeichnen, da diese mit 17 kW – etwas mehr als die vorherigen 10 kW – den Warmwasserbedarf relativ schnell deckt und häufiger taktet.

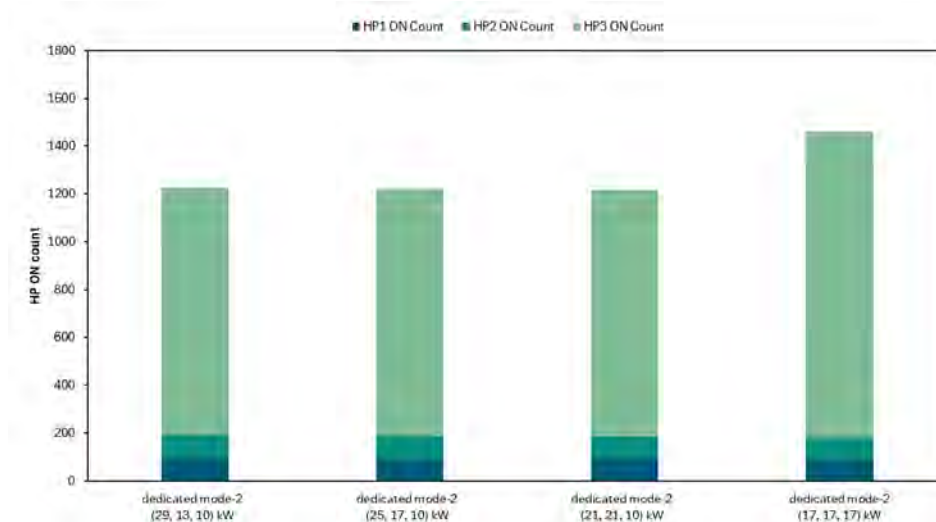


Abbildung 85: Zyklusergebnisse für verschiedene Kombinationen der installierten thermischen Leistung der Wärmepumpen im System Dedicated-II. Die verschiedenen Kombinationen der installierten Leistung werden durch (HP1, HP2, HP3) kW dargestellt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Aufteilung der thermischen Lasten auf die drei Wärmepumpen nur minimale Auswirkungen auf den Gesamtsystemwirkungsgrad hat. Jede der Größenkombinationen ist akzeptabel. Im Sinne der Systemvereinfachung ist es naheliegend, alle Wärmepumpen mit derselben Größe zu wählen.

2.4.2.4 Steuerung für Wärmepumpenverbünde

2.4.2.4.1 Methodik

a) Einschaltsignal

Die Wärmepumpen werden stufenweise nacheinander aktiviert. Jede Stufe hängt von der Temperatur im Speicher und der Zeit ab. Im Folgenden werden die drei untersuchten Regelungsstrategien vorgestellt: Zeitverzögerung, Temperaturhysterese und eine kombinierte Strategie aus Zeitverzögerung und Temperaturhysterese.

b) Zeitgesteuerte Regelung (zeitbasierte Stufenschaltung)

Die Zeitsteuerung ist eine rein zeitbasierte Strategie, die eine feste Zeitverzögerung zwischen der Aktivierung der einzelnen Wärmepumpen vorsieht. Die Stufenschaltung ist in Abbildung 86 dargestellt. Anhand eines Beispiels, bei dem Wärmebedarf entsteht und die Speichertemperatur sinkt:

Stufe 1: Wenn die Speichertemperatur unter den Einschaltgrenzwert fällt, sendet sie ein Signal, dass der Speicher beheizt werden muss. Dadurch wird die erste Wärmepumpe (WP1) aktiviert.

Stufe 2: Sobald HP1 aktiv ist, startet ein Timer. Nach einer Verzögerung von 10 Minuten startet die zweite HP2.

Stufe 3: Ebenso wird nach einer weiteren Verzögerung von 10 Minuten die HP3 aktiviert.

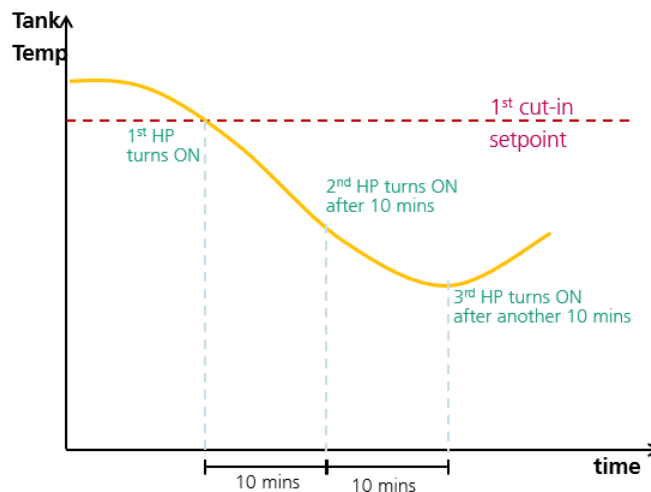


Abbildung 86: Zeitverzögerung, sequentielles Einschaltsignal für Wärmepumpen.

Die Zeitsteuerung gewährleistet die gestaffelte Aktivierung der Wärmepumpen und verhindert, dass diese gleichzeitig eingeschaltet werden. Sie berücksichtigt jedoch nicht, wie sich die Speichertemperatur verändert.

c) Temperaturhysterese (temperaturbasierte Stufenschaltung)

Bei dieser Strategie hat jede Wärmepumpe ihren eigenen EinschaltSchwellenwert für die Speichertemperatur. Diese Strategie ist in Abbildung 87 dargestellt und wie folgt beschrieben:

Stufe 1: HP1 schaltet sich ein, wenn die Speichertemperatur unter den ersten EinschaltSollwert fällt.

Stufe 2: Wenn die Speichertemperatur weiter sinkt und den zweiten Einschalt-Sollwert unterschreitet, schaltet sich HP2 ein.

Stufe 3: Sinkt die Temperatur noch weiter unter den dritten EinschaltSollwert, schaltet sich HP3 ein.

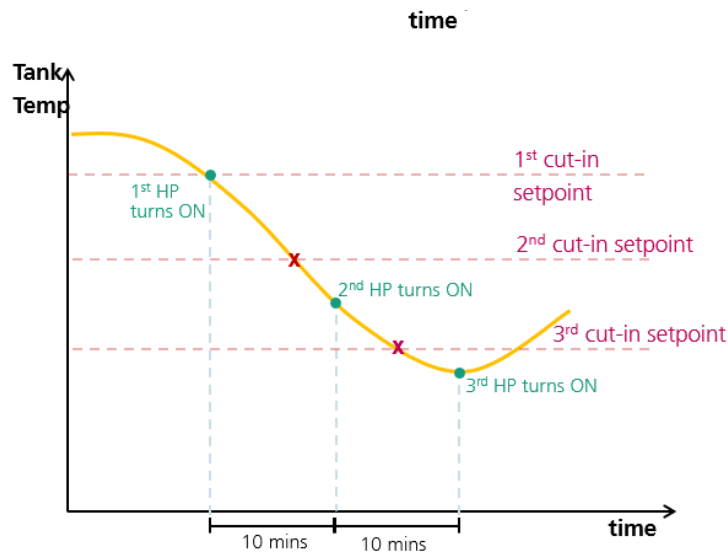


Abbildung 87: Temperaturhysterese, sequentielles Einschaltsignal für die HP.

Kombinierte Regelungsstrategie

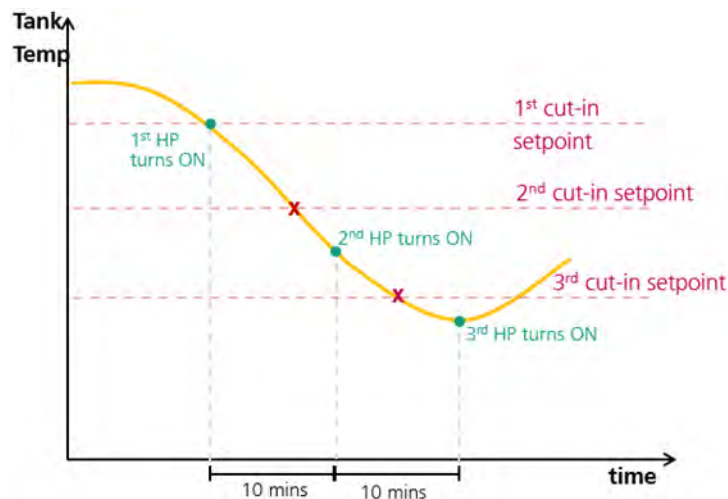


Abbildung 88: Kombinierte Regelungsstrategie für die sequenzielle Einschaltung der Wärmepumpen. Kombination von Zeitverzögerung und Temperaturhysterese.

Die in dieser Studie implementierte Regelungsstrategie kombiniert sowohl Zeitverzögerungs- als auch Temperaturhysterese-Strategien, um die Wärmepumpen stufenweise zu aktivieren. Dies ist in Abbildung 89 dargestellt, und die Logik für ihre Aktivierung ist wie folgt:

Stufe 1: HP1 wird aktiviert, sobald die Speichertemperatur unter den ersten Einschaltswert fällt. Der Einschalt-Timer wird dann gestartet.

Stufe 2: Liegt die Speichertemperatur nach 10 Minuten immer noch unter dem zweiten Einschalt-Sollwert, schaltet sich HP2 ein.

Stufe 3: Nach weiteren 10 Minuten startet HP3, wenn die Speichertemperatur weiterhin unter dem dritten Einschaltswert liegt.

d) Prioritätszuweisung

Die Regelungsstrategie ordnet dynamisch die Priorität zu, in welcher Reihenfolge die Wärmepumpen ein- und ausgeschaltet werden sollen, je nachdem, wie gut sie dem aktuellen Heizbedarf entsprechen. Bei Warmwasserbedarf wird der kleinsten Wärmepumpe HP3 Vorrang eingeräumt, da die Warmwasserlast in der

Regel geringer ist. Bei Heizbedarf wird die Priorität auf der Grundlage der aktuellen Gebäudelast zugewiesen. In realen Gebäuden ist die effektive Gebäudelast nicht bekannt (lediglich die theoretische Auslegungswärmelast, die erheblich abweichen kann, siehe Bericht Nr. 5); daher wird die durchschnittliche Außentemperatur berücksichtigt, wobei von einem linearen Zusammenhang zwischen Außentemperatur und Gebäudeheizlast ausgegangen wird. Die implementierte Logik ist in Abbildung 89 anhand einer Dimensionierungskombination aus HP1 25 kW, HP2 17 kW und HP3 10 kW dargestellt.

Hoher Bedarf (durchschnittliche Außentemperatur: unter 8 °C): Bei kalten Außentemperaturen ist der Wärmebedarf des Gebäudes hoch. In diesem Fall priorisiert der Regler die größte Wärmepumpe HP1 (25 kW) für den ersten Betrieb, die nächstgrößte 17-kW-Wärmepumpe (HP2) wird dann in Stufe 2 aktiviert, gefolgt von der kleinsten 10-kW-Wärmepumpe (HP3) in Stufe 3, falls zusätzliche Leistung benötigt wird.

Mittlerer Bedarf (durchschnittliche Außentemperatur: 8 °C bis 12 °C): Bei mildem Wetter ist der Wärmebedarf moderat. Daher wäre der Start der größten Wärmepumpe ineffizient und würde zu häufigen Zyklen führen. Deshalb erhält die mittelgroße Wärmepumpe mit 17 kW (HP2) die erste Priorität, gefolgt von der 10-kW-Wärmepumpe (HP3), und zuletzt wird die 25-kW-Wärmepumpe (HP1) als letzte Reserve bereitgehalten.

Geringer Bedarf (durchschnittliche Außentemperatur: über 12 °C): Bei wärmeren Temperaturen sinkt der Heizbedarf, sodass HP3, die kleinste Wärmepumpe mit 10 kW, als erste startet. Auf diese Weise wird das kurze Ein- und Ausschalten größerer Wärmepumpen in Zeiten geringen Bedarfs vermieden. An zweiter Stelle steht die mittelgroße 17-kW-Wärmepumpe HP2, gefolgt von der 25-kW-Wärmepumpe HP1.

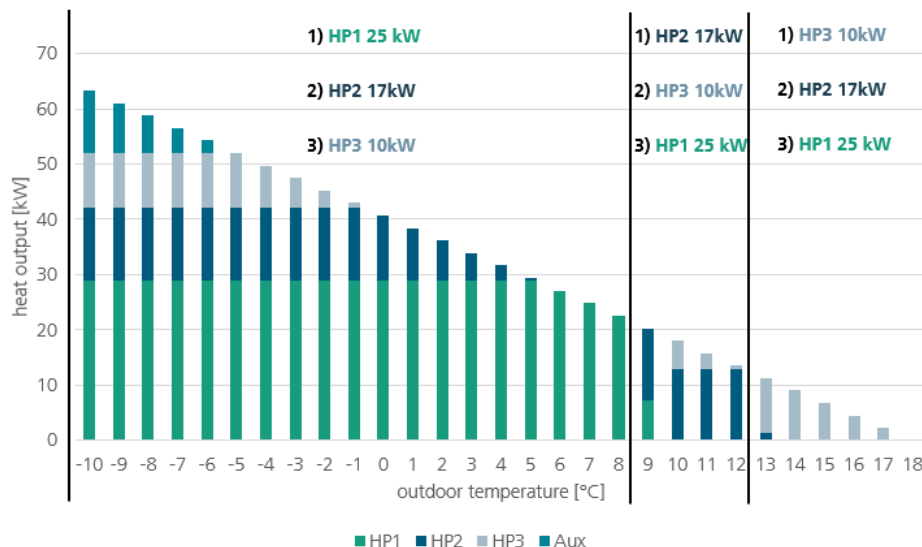


Abbildung 89: Prioritätszuweisung für die Stufenschaltung der Wärmepumpen (vereinfachte Darstellung)

e) Abschaltsequenz

Die Wärmepumpen werden in umgekehrter Reihenfolge basierend auf der Temperaturhysterese abgeschaltet, wobei im Speicher drei Abschaltschwellenwerte gelten. Dies verhindert eine unnötige Überhitzung des Speichers. Das Abschaltkonzept ist in Abbildung 90 dargestellt.

Stufe 1: Wenn sich der Speicher erwärmt, erreicht die Temperatur zunächst den niedrigsten (dritten) Abschaltsollwert. Zu diesem Zeitpunkt wird die HP3 abgeschaltet.

Stufe 2: Wenn die Temperatur weiter ansteigt und den zweiten Abschaltsollwert überschreitet, schaltet sich HP2 ab.

Stufe 3: Wenn der Speicher schließlich den Haupt- (ersten) Abschaltsollwert erreicht, ist der Bedarf vollständig gedeckt und HP1 schaltet sich aus.

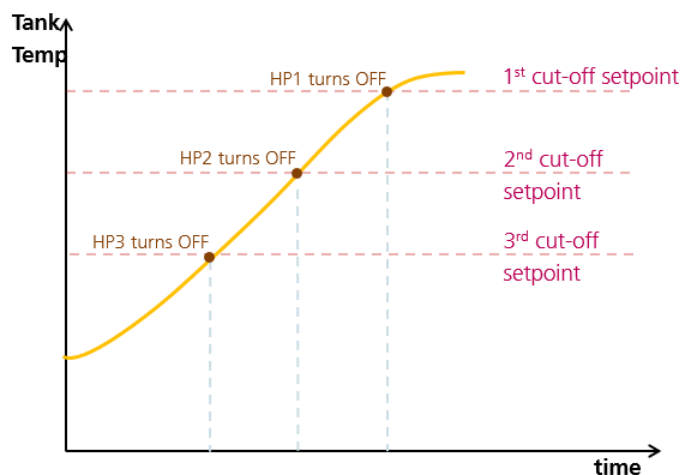


Abbildung 90: Signal zur sequenziellen Abschaltung der HPs. Basierend auf der Temperaturhysterese.

2.4.2.4.2 Ergebnisse

Der Gesamtsystemwirkungsgrad für jede Regelungsstrategie ist in Tabelle 16 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass es keine signifikanten Leistungsunterschiede zwischen den untersuchten Strategien gibt. Es liegt auf der Hand, dass die Ergebnisse bei unterschiedlichen Regelparametern variieren werden.

Tabelle 16: Vergleich des SPF zwischen den drei Regelungsstrategien

Hydraulikvariante	Nominalleistung WP1, WP2, WP3 [kW]	Regelungsansatz	SPF
Dedicated II	17, 17, 17	Zeitbasiert	3,08
Dedicated II	17, 17, 17	Temperaturbasiert	3,10
Dedicated II	17, 17, 17	Kombiniert (zeit- und temperaturbasiert)	3,10

Beim Vergleich der Anzahl der Wärmepumpenzyklen in Abbildung 91 zeigt die Zeitverzögerungsstrategie leicht höhere Werte. Dies liegt daran, dass die zweite und dritte Wärmepumpe nach einer festen Zeitverzögerung aktiviert werden, unabhängig davon, ob die Speichertemperatur weiter gesunken ist. Dies führt zu unnötigen Startvorgängen, da die Speichertemperatur vor der Aktivierung der nächsten Stufe nicht überprüft wird.

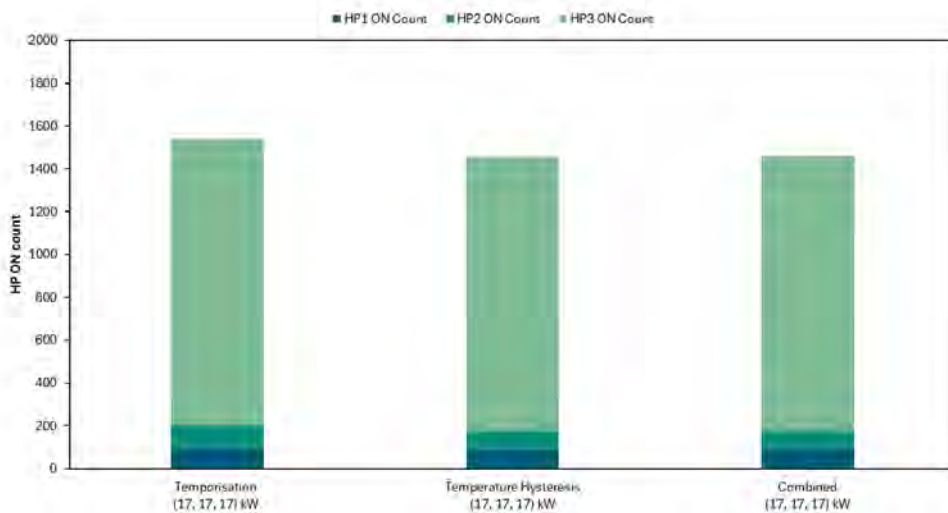


Abbildung 91: Vergleich der Ein-/Ausschaltzyklen der Wärmepumpen bei den drei Regelungsstrategien.

Insgesamt weisen alle Regelungsstrategien vergleichbare Ergebnisse auf. Dennoch ist die kombinierte Regelungsstrategie in der Lage, die Effizienz der Hysterese-Regelung zu erreichen und gleichzeitig unnötige Stufenwechsel der Wärmepumpen zu vermeiden, wie sie bei der zeitverzögerten Regelung zu beobachten sind, indem sie zusätzlich Temperaturprüfungen im Speicher mit einer Verzögerung einbezieht. Aus diesem Grund wurde die kombinierte Regelung in den Simulationen verwendet. Zudem ist zu erwarten, dass die kombinierte Strategie am robustesten gegenüber suboptimalen Werten einzelner Parameter ist (z. B. zu kleine Hysterese, zu kleine Verzögerung).

2.4.2.5 Schlussfolgerungen und Diskussion

In diesem Kapitel werden mehrere relevante Parameter behandelt, die die Leistung, Zuverlässigkeit und Robustheit von zentralen Wärmepumpensystemen beeinflussen. Der Einsatz von Wärmepumpenverbünden zur Deckung der (im Vergleich zu Einfamilienhäusern) höheren Wärmelasten von Mehrfamilienhäusern bietet eine Reihe potenzieller Vorteile, insbesondere einen erweiterten Modulationsbereich, erhöhte Redundanz, gleichzeitige Raumheizung und Warmwasserbereitung sowie eine geringere Produktvielfalt im Gebäudebestand.

Vorteile mehrerer Wärmepumpen

Der Einsatz mehrerer kleinerer Wärmepumpen kann vorteilhafter sein als der Einsatz einer einzigen großen. Er ermöglicht Redundanz und somit erhöhte Betriebssicherheit, erweitert den Modulationsbereich und die Lastverteilung auf mehrere Wärmepumpen kann über einen Laufzeitausgleich die Anzahl der Verdichterstarts pro einzelner Wärmepumpe reduzieren.

Hydraulische Konfiguration

Unter den bewerteten hydraulischen Konzepten sind Konfigurationen vorzuziehen, die einen Parallelbetrieb von Warmwasser und Fernwärme mit einem einfacheren hydraulischen Aufbau ermöglichen. Eine Konfiguration wie „Dedicated-II“ ermöglicht den gleichzeitigen Betrieb ohne komplexe Hydraulik.

Dimensionierung der Wärmepumpen

Die Dimensionierung und Verteilung der thermischen Leistung auf die Wärmepumpen hat nur minimale Auswirkungen auf den Gesamtwirkungsgrad des Systems. Daher wird der Einsatz von Wärmepumpen gleicher Größe bevorzugt, da dies die Planung und Wartung vereinfacht. Die Dimensionierung der Wärmepumpen entsprechend der Warmwasserlast ist jedoch ebenfalls möglich und liefert vergleichbare thermische Ergebnisse.

Wärmepumpensteuerung

Die Steuerung des Betriebs mehrerer Wärmepumpen erfordert eine sorgfältige Koordination ihrer Ein- und Ausschaltsequenz, was schwieriger zu realisieren ist als bei einer einzelnen Wärmepumpe. Die Studie zeigt, dass eine Steuerungslogik, die Temperaturhysterese mit Zeitverzögerung kombiniert, eine zuverlässigere Lösung darstellt, um unnötiges Takten zu vermeiden. Darüber hinaus ist die Anpassung der Zeitplanung der Wärmepumpen an den Heizbedarf vorteilhaft, wenn Wärmepumpen mit unterschiedlicher Leistung kombiniert werden.

Die beschriebenen Untersuchungen basieren auf Simulationen. Die Praxis zeigt, dass ein stabiler und effizienter Systembetrieb in der Praxis nicht immer erreicht werden kann. Grundvoraussetzung dafür sind eine angemessene Dimensionierung der Wärmepumpen und peripheren Komponenten wie Pufferspeicher. Feldstudien belegen jedoch, dass dies nicht die einzigen und entscheidenden Faktoren für ein gutes Betriebsverhalten des Systems sind¹². Eine geeignete hydraulische Einbindung mit einer abgestimmten Regelungsstrategie, die die Wärmebereitstellung an den tatsächlichen Bedarf anpasst, ist unerlässlich.

Um den Temperaturabfall zwischen dem Ausgang des Wärmepumpen-Kondensators und der Vorlauftemperatur des Heizsystems zu minimieren, muss das Risiko von Vermischungsverlusten „auf dem Weg“ berücksichtigt werden. Dazu eignet sich eine „3-Punkt-Einbindung“ des Heizungspufferspeichers, wie in Abbildung 92 rechts dargestellt. Ein Anschluss des Wärmepumpenauslasses auf einer anderen Höhe als der Vorlauf des Heizsystems sollte vermieden werden, da diese Variante standardmäßig zu Vermischungen führt.

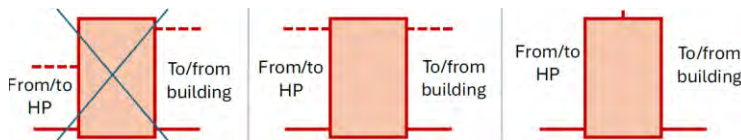


Abbildung 92: Möglichkeiten der hydraulischen Integration von Pufferspeichern für die Raumheizung (Auswahl)

Bei einer geeigneten Steuerung der Wärmepumpe muss das Verteilungssystem im Gebäude berücksichtigt werden (z. B. weisen Heizkörper in der Regel eine größere Temperaturspreizung auf als Fußbodenheizungen, sodass auch die (Soll-)Temperaturdifferenz über den Kondensator angepasst werden kann). Zudem muss der Abstand zwischen einer im Freien aufgestellten Luft-Wasser-Wärmepumpe (die sich unter Umständen mehrere Meter vom Gebäude entfernt befindet) und dem Heizungskeller berücksichtigt werden, da die thermische Trägheit der Rohrleitungen zu einer spürbaren Verzögerung der Systemreaktion führen kann.

2.4.3 Systemkonzepte für dezentrale Wärmepumpensysteme

In diesem Kapitel werden Systemlösungen für den Ersatz von wohnungsbezogenen Gasheizkesseln durch dezentrale, in den Wohnungen installierte Wärmepumpen, die mit einer Propangas-Kältemittelfüllung von unter 150 g betrieben werden, im Detail untersucht.

Bestehende dezentrale Heizsysteme in Mehrfamilienhäusern sind aufgrund von sukzessiven Erneuerungen im Laufe der Zeit hinsichtlich Alter und Zustand heterogen. Daher liegt der Fokus auf robusten Lösungen, die den Bedarf einer breiten Palette von Wohnungen abdecken. Darüber hinaus wird besonderer Wert darauf gelegt, den Bedarf an zusätzlichem Aufstellraum im Vergleich zum Gasheizkessel zu minimieren.

¹ https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/projekte/WP-QS_Schlussbericht.pdf

² S. Bernal et al., 2025: Betriebsverhalten von überdimensionierten Wärmepumpen: Eine Analyse von Feldmessdaten; DKV-Tagung, Magdeburg 2025

2.4.3.1 Methodik

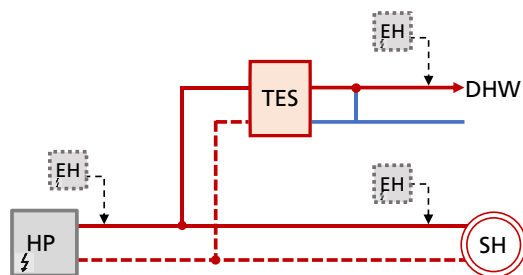
2.4.3.1.1 Beschreibung der Systeme

Kern dieser Studie ist der Prototyp einer R290-Sole-Wasser-Wärmepumpe mit einer Kältemittelfüllmenge unter 150 g (s. Kapitel 2.3). Auf der Grundlage dieses Prototyps wurden dezentrale, wohnungsinterne Wärmepumpen-Systemlösungen unter Verwendung eines zentralen Niedertemperatur-Wärmenetzes bewertet. Das Vorgehen dabei war wie folgt

- Zunächst definierten wir die Systemkonfigurationen, indem wir den Installationsort der Wärmepumpe und der Zusatzkomponenten, die Dimensionierung der thermischen Energiespeicher (TES), die hydraulischen Konfigurationen sowie die Standorte für elektrische Reserveheizungen festlegten.
- Anschließend entwickelten wir in der Simulationsumgebung Dymola Simulationsmodelle auf Komponenten- und Systemebene, einschließlich Regelungsstrategien für die verschiedenen Varianten; die Modelle wurden unter Verwendung repräsentativer Wärmelast- und Warmwasserprofile simuliert.
- Drittens haben wir die Systemvarianten anhand der Simulationsergebnisse unter Berücksichtigung der Temperaturkonformität, der Energieeffizienz, des Kompressor-Zyklusverhaltens und der elektrischen Last bewertet.

Bei der Gestaltung der Systemarchitektur für dezentrale Wärmepumpen in Wohnungen standen Kompaktheit, Robustheit und Flexibilität im Vordergrund. Es wurden die in Abbildung 93 vorgestellten Systemausführungen bewertet. Variante 1 (HPS1, links) enthält einen thermischen Speicher (TES) mit integriertem Wärmetauscher für die Warmwasserbereitung; die Wärmepumpe versorgt die Heizkörper direkt ohne Pufferspeicher und arbeitet bei einer Vorlauftemperatur, die durch die Heizkurve definiert ist (max. 55 °C) und somit niedriger ist als die TES-Ladetemperatur von 60 °C. Variante 2 (HPS2) nutzt einen Kombispeicher, der eine Frischwasserstation zur Warmwasserbereitung versorgt und gleichzeitig den Warmwasserbedarf deckt; diese Konfiguration erfordert, dass die Wärmepumpe ganzjährig hohe Temperaturen liefert, da die geringe Größe eine Trennung in eine Warmwasser- und eine Heizungszone, wie sie in „typischen“ Kombispeichern zu finden ist, nicht sinnvoll zulässt. Zusätzlich wurden drei Standorte für elektrische Heizgeräte (EH) bewertet: im Wärmepumpenvorlauf, innerhalb des Kombispeichers oder auf der Verbraucherseite (ein EH in der Warmwasserversorgung und eines in der Nähe der Entnahmestelle).

HP system with TES for DHW preparation



HP system with combination TES

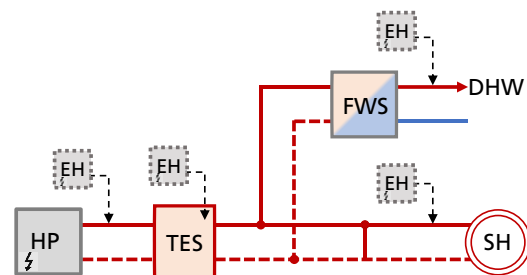


Abbildung 93: Zwei hydraulische Konfigurationen für dezentrale Wärmepumpensysteme (HP), die mögliche Standorte für elektrische Zusatzheizungen (EH) veranschaulichen. Links: Wärmepumpensystem mit thermischem Energiespeicher (TES) ausschließlich zur Warmwasserbereitung (HPS1); rechts: Wärmepumpensystem mit einem kombinierten Speicher für Raumheizung und Warmwasserbereitung über eine Frischwasserstation (HPS2).

Auf der Grundlage der beiden hydraulischen Konfigurationen wurden sechs Varianten dezentraler Wärmepumpensysteme mit unterschiedlichen thermischen Energiespeichern definiert. Tabelle 17 fasst die Spezifikationen der thermischen Energiespeicher zusammen: Drei Varianten verfügen über wandmontierte thermische Energiespeicher, drei über bodenstehende thermische Energiespeicher. Da das Phasenwechselmaterial (PCM) eine höhere volumetrische Energiespeicherdichte als Wasser aufweist, bietet ein 60-Liter-PCM-Speicher an der Wand eine größere Wärmekapazität als ein 120-Liter-Wasserspeicher.

Tabelle 17: Spezifikationen der thermischen Energiespeicher für sechs Varianten dezentraler Wärmepumpensysteme. 1 Schmelztemperatur bei 58 °C; 2 Die Wärmekapazität wird durch Simulation aus einem Ladezustand von 60 °C für Wasser und 65 °C für Salzhydrat berechnet, wobei die Entladung so lange fortgesetzt wird, bis die Wasseraustrittstemperatur unter 40 °C fällt.

Systemvarianten	Energiespeichermaterialien		Brutto- speichervolumen in l	Wärmekapazi- tät² in kWh	Energie-eff- izienz-klasse
	Typ	Volumen in l			
Wandmontiertes TES („Mini“):					
HPS1W60	Wasser	60	118	2,5	A
HPS1PCM60	Salzhydrat¹	60	118	6,1	A+
HPS2W60	Wasser	60	108	2,5	A
Stand-TES („klein“):					
HPS1W120	Wasser	120	210	5,1	A
HPS1PCM80	Salzhydrat¹	80	156	8,7	A+
HPS2W120	Wasser	120	192	5,1	A

2.4.3.1.2 Modellierung und Simulation in Dymola

Die Systemvarianten wurden in der dynamischen Simulationsumgebung *Dymola* (Version 2021x) unter Verwendung von Open-Source-Modelica-Bibliotheken modelliert, darunter die *Modelica Standard Library 4.0.0*, *Buildings 12.1.0* und *AixLib 2.1.0*. Abbildung 94 zeigt das Schema eines in Dymola modellierten dezentralen Wärmepumpensystems.

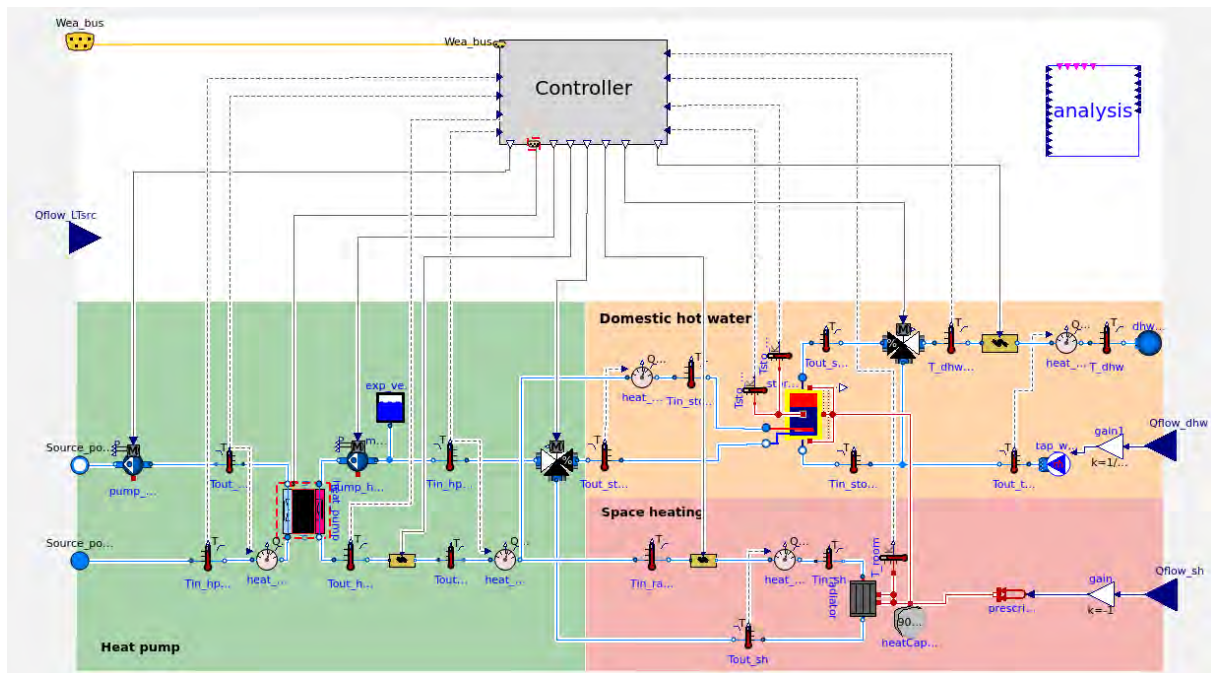


Abbildung 94: Schematische Darstellung eines in Dymola modellierten dezentralen Wärmepumpensystems.

Das Wärmepumpenmodell ist ein Black-Box-Modell, das durch Leistungskurven parametrisiert ist. Es prognostiziert den Wärmepumpen-COP und die Wärmeabgabe des Kondensators anhand von fünf Eingangsgrößen: Soleneintrittstemperatur des Verdampfers, Temperaturdifferenz des Verdampfers, Wasseraustrittstemperatur des Kondensators, Temperaturdifferenz des Kondensators und Kompressordrehzahl. Die Zuordnung erfolgt über eine mehrdimensionale Interpolations-Nachschlagetabelle. Die Leistungskurven wurden aus IMST-ART-Simulationen generiert. Die Kompressordrehzahl wird durch einen PID-Regler auf Basis der Kondensator-Wasseraustrittstemperatur geregelt. Der Massenstrom auf der Quellenseite wird so moduliert, dass eine konstante Verdampfer-Temperaturdifferenz von 3 K aufrechterhalten wird; der Massenstrom auf der Senkenseite zum SH wird so moduliert, dass eine konstante Kondensator-Temperaturdifferenz von 5 K aufrechterhalten wird; und der Massenstrom auf der Senkenseite für die Speicherladung ist auf 0,3 kg/s festgelegt.

Die Quellseite der Wärmepumpe ist an ein zentrales Niedertemperaturnetz angeschlossen. Dieses wird

- entweder durch eine Erdsonde versorgt; in diesem Fall wird die Sole-Temperatur in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur ermittelt; die hinterlegte Funktion wurde aus Monitoringdaten der Wärmepumpe abgeleitet und zeigt eine gute Übereinstimmung mit der VDI 4650:2016¹
- oder durch einen zentralen Luft-Sole-Wärmetauscher, der Wärme aus der Außenluft entzieht (unter der Annahme einer festen Temperaturdifferenz zwischen Umgebungsluft und Sole-Rücklauftemperatur zur Wärmepumpe von 4 K) gespeist.

Das quellseitige Wärmeträgermedium ist Sole, bestehend aus einem 40-vol.-%igen Glykol-Wasser-Gemisch.

Das Modell für den Warmwasserspeicher beinhaltet einen integrierten Wärmetauscher zur Beladung. Im Gegensatz dazu nutzt der Kombispeicher eine separate Frischwasserstation für die Warmwasserbereitung.

¹ Peter Schossig, Constanze Bongs, Björn Nienborg, Martin Kleinstück, Axel Albers (2017): Hochtemperatur-Sorptionswärmepumpen für Mehrfamilienhäuser; Internationale Sorptionswärmepumpenkonzferenz (ISHPC2017), 7. – 10. August 2017, Waseda-Universität, Tokio, Japan

Beide Speichermodelle stellen die thermische Schichtung anhand von vier diskretisierten Volumina dar. Die Frischwasserstation wurde mit der Effektivitäts-NTU-Methode¹ modelliert.

Das am Fraunhofer ISE entwickelte Speicher-Modell mit Phasenwechselmaterial ist eine zweidimensionale diskretisierte Darstellung, die zwei integrierte Wärmetauscher für die Be- und Entladung umfasst. Das 80-Liter-PCM-Speichermodell wurde auf der Grundlage der technischen Spezifikationen eines handelsüblichen Produkts parametrisiert und mit Datenblattwerten des Herstellers angegebenen Messwerte abgeglichen. Das 60-Liter-PCM-Speichermodell wurde durch proportionale Verkleinerung des 80-Liter-PCM-Speichers erstellt.

Das PCM schmilzt bei etwa 58 °C. Dementsprechend wird die Ladetemperatur des PCM-Speichers auf 65 °C festgelegt, was höher ist als die für Wasserspeicher verwendeten 60 °C. Die Vorlauftemperatur für die Raumheizung wird durch eine Außentemperaturabhängige Heizkurve bestimmt und erreicht 55°C im Auslegungsfall. Die Speicherladung wird von einem hysteresebasierten Regler gesteuert, der die Temperatur der zweituntersten Schicht verwendet. Bei hydraulischen Varianten, bei denen der Speicher ausschließlich der Warmwasserbereitung dient, hat die Speicherladung Vorrang vor der Raumheizung.

Der elektrische Zusatzheizer in den Warmwasser-Vorlaufleitungen wird durch die Warmwasser-Vorlauftemperatur gesteuert und aktiviert, wenn die Vorlauftemperatur länger als 20 Minuten mindestens 2 K unter ihrem Schwellenwert bleibt. Der Elektroheizer im Kombispeicher wird aktiviert, wenn die Speichertemperatur der obersten Schicht nach mehr als 20 Minuten Aufladung unter der Mindestspeichertemperatur bleibt. Der Elektroheizer in der Nähe der Entnahmestelle wird aktiviert, wenn die Warmwassertemperatur unter 45 °C fällt. Der Heizer in den Warmwasserversorgungsleitungen wird aktiviert, wenn die Raumtemperatur länger als 30 Minuten unter 20 °C bleibt. Jeder Heizer hat eine maximale elektrische Leistung von 3 kW, und es wird ein elektrischer Wirkungsgrad von 100 % angenommen.

Die Systemmodelle verwendeten das Modell RadiatorEN442-2 aus der Modelica-Bibliothek „*Buildings*“ für die Raumheizung. Das Heizkörpermodell wurde entsprechend der Auslegungswärmelast der Wohnungen parametrisiert. Jede Wohnung wurde als einzelne thermische Zone mit einer flächenspezifischen Wärmekapazität von 90 Wh/(m²·K) modelliert. Die Wärmelastprofile der Wohnungen wurden im Rahmen des LowEx-Projekts für Mehrfamilienhäuser in *TRNSYS* generiert². Sie umfassen die folgenden Varianten:

- 3 Gebäudegeometrien (kleines/mittleres/großes Mehrfamilienhaus mit 4/12/30 Wohnungen)
- 2 Baualtersklassen (1958–1978 und 1979–1994)
- Verschiedene Sanierungsstufen (Originalzustand, ausgetauschte Fenster, gedämmte Fassade; einschließlich Kombinationen davon und unterschiedlicher energetischer Qualitäten)

Der Warmwasserbedarf hängt in erster Linie von der Anzahl der Bewohner und dem Nutzerverhalten ab. Die Warmwasserprofile wurden mit dem Fraunhofer-Tool *synPro*³ erstellt und als Eingaben für die Simulationen verwendet.

Die Wetterdaten wurden mit *Meteonorm* v7.3.3 unter Verwendung des EnEV-Referenzdatensatzes für Potsdam, Deutschland (Wetterstation 52,4° N, 13,1° O; Höhe 81 m) generiert. Sowohl die Gebäudeenergiesimulationen in *TRNSYS* als auch die Anlagensimulationen in *Dymola* verwendeten denselben Wetterdatensatz.

Die Systemvarianten wurden über mehr als 3.000 Anwendungsfälle über ein ganzes Jahr hinweg simuliert. Die Ergebnisse wurden in 1-Minuten-Intervallen aufgezeichnet und in Python nachbearbeitet.

¹ https://en.wikipedia.org/wiki/NTU_method

² https://lowex-bestand.de/wp-content/uploads/2025/12/Abschlussbericht_LiB.pdf

³ <https://synpro-lastprofile.de/>

2.4.3.1.3 Definition der Bewertungskriterien

Im folgenden sind die Bewertungskriterien beschrieben, die für die Auswertung der Simulationen herangezogen werden.

Die Zeitkonformitätsrate der Raumtemperatur ($C_{T,SH}$) wird wie folgt berechnet:

$$C_{T,SH} = \frac{t(T_{Room} \geq 20^\circ C)}{t_{heating}} * 100\% \quad (1)$$

wobei

$t(T_{Room} \geq 20^\circ C)$ die Dauer in Sekunden ist, in der die Raumtemperatur nicht unter 20 °C liegt

$t_{heating}$ die Gesamtdauer der Heizperiode in Sekunden ist

Als Untergrenze für die Einhaltung der Komfortanforderungen wird ein Prozessfähigkeitsindex ($C_{T,SH}$) von 95 % angenommen.

Der Prozessfähigkeitsindex für die Warmwasserbereitung ($C_{pK,DHW}$) wird wie folgt berechnet:

$$C_{pK,DHW} = \min\left(\frac{50^\circ C - T_{DHW,m}}{3 \cdot \sigma_{T,DHW}}, \frac{T_{DHW,m} - 45^\circ C}{3 \cdot \sigma_{T,DHW}}\right) \quad (2)$$

wobei

$T_{DHW,m}$ die mittlere Warmwassertemperatur in °C

$\sigma_{T,DHW}$ die Standardabweichung der Warmwassertemperatur in °C ist

Ein Wert für den saisonalen Leistungsfaktor ($C_{pK,DHW}$) über **1,33** kann als zuverlässige Warmwasserbereitung gewertet werden.

Der saisonale Leistungsfaktor der Wärmepumpe (SPF_{HP}) wird wie folgt berechnet:

$$SPF_{HP} = \frac{Q_{HP}}{E_{el,HP}} \quad (3)$$

wobei

Q_{HP} die von den Wärmepumpen bereitgestellte thermische Energie in kWh

$E_{el,HP}$ der Gesamtstromverbrauch der Kompressoren, Steuerelemente und Pumpen der Wärmepumpen in kWh ist

Der saisonale Leistungsfaktor der HP-Systeme (SPF_{HPS}) wird wie folgt berechnet:

$$SPF_{HPS} = \frac{Q_{SH} + Q_{DHW}}{E_{el,HPS}} \quad (4)$$

wobei

Q_{SH} der Wärmebedarf für Warmwasser in kWh ist

Q_{DHW} der Wärmebedarf für Warmwasser in kWh ist

$E_{el,HPS}$ der Gesamtstromverbrauch der Wärmepumpensysteme während ihrer Betriebszeit in kWh

Der Gleichzeitigkeitsfaktor für Einfamilienhäuser (k_s) wird wie folgt berechnet:

$$k_s = \frac{\max(\sum P_{el,HPs})}{\sum P_{el,HP, rated}} \quad (5)$$

wobei

$\max(\sum P_{el,HPs})$ der maximale gleichzeitige Strombedarf der HP-Systeme in kW ist

$\sum P_{el,HP, rated}$ die Summe der Nennleistung der HP-Systeme in kWh ist

2.4.3.2 Ergebnisse

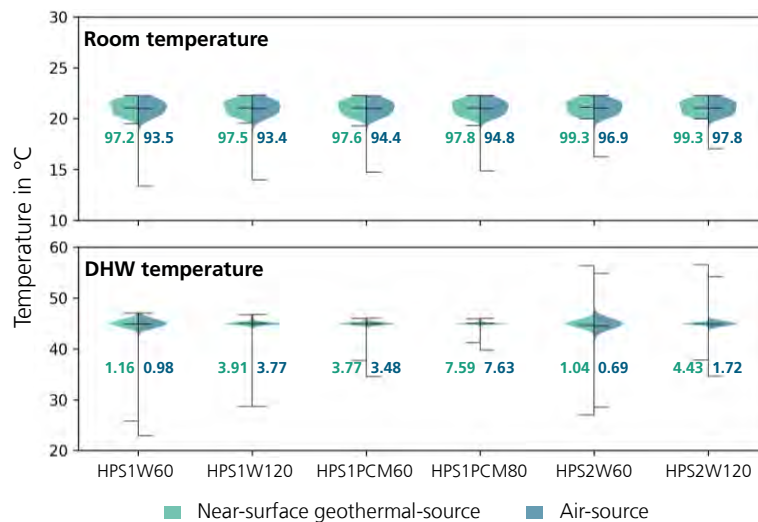


Abbildung 95: Häufigkeitsverteilungen der Raum- und Warmwassertemperaturen für sechs Systemvarianten ohne Elektroheizungen, wobei entweder oberflächennahe Erdwärme (linke Seite der Violin-Diagramme, grün) oder Außenluft (rechte Seite, blau) als Wärmequelle genutzt wird, sowie die Erfüllungsrate der Raumtemperatur in % (oberes Feld) und der Prozessfähigkeitsindex für die Warmwasserbereitung (unteres Feld).

Abbildung 95 zeigt die Häufigkeitsverteilungen der Raum- und Warmwassertemperaturen für sechs Systemvarianten ohne Elektroheizungen in einer 55 m² großen Wohnung mit zwei Bewohnern in einem unrenovierten kleinen Mehrfamilienhaus, das zwischen 1979 und 1994 erbaut wurde. In diesem Beispiel können die Komfortanforderungen durch Systeme mit Bohrloch als Quelle und 120 l Wasser- oder PCM-Speicher erfüllt werden. Luftwärmepumpen sowie Systeme mit nur 60 l Speichervolumen benötigen elektrische Zusatzheizungen, um das ganze Jahr über Komfort zu gewährleisten.

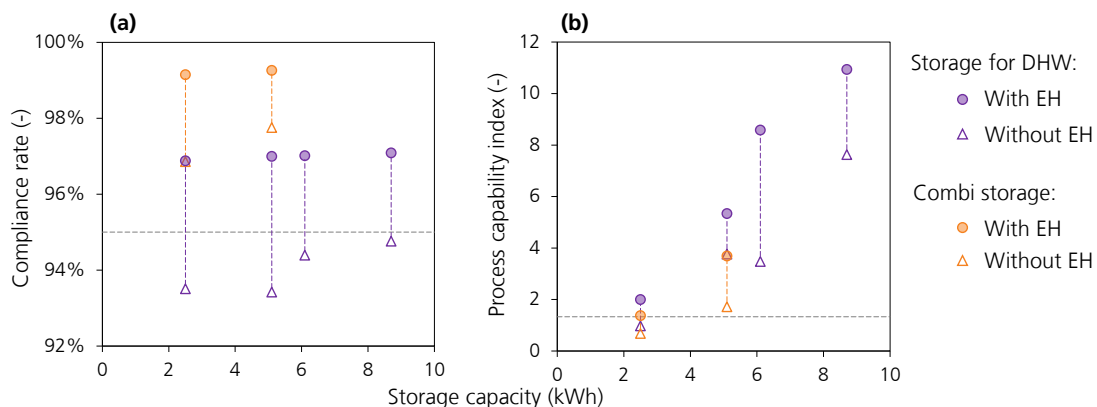


Abbildung 96: Zusammenhang zwischen Speicherkapazität und Einhaltung des thermischen Komforts für Systemvarianten mit und ohne elektrische Heizungen (EHs). (a) Raumtemperatur-Einhaltungsrate; (b) Prozessfähigkeitsindex für die Warmwasserbereitung.

Abbildung 96 visualisiert den Zusammenhang zwischen Speicherkapazität und den Komfortkriterien für das selbe Anwendungsbeispiel. Die linke Grafik (a) zeigt, dass die Systemauslegung 2 (mit Kombispeicher anstelle eines reinen Warmwasserspeichers) unabhängig von der Speicherkapazität einen höheren Raumtemperaturkomfort gewährleistet. Der Warmwasserkomfort korreliert mit der Speicherkapazität korreliert (rechte Grafik, b). Zudem ist zu erkennen, dass Systeme mit reiner Warmwasserspeicherung bei einer gegebenen Speicherkapazität eine etwas bessere Leistung erbringen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die gesamte Kapazität ausschließlich für die Warmwasserbereitung zur Verfügung steht und keine Heizleistung daraus bereitgestellt wird. Elektrische Zusatzheizungen reduzieren Komfortabweichungen in allen dargestellten Varianten.

Der Einfluss des Dimensionierungsfaktors – definiert als das Verhältnis der Auslegungswärmelast der Wohnung zur Wärmepumpenleistung unter der Prüfbedingung A-7W55 – auf den Raumtemperatur-Einhaltungsfaktor für die beiden untersuchten Varianten der Speichereinbindung ist in Abbildung 97 für Systeme mit 60-Liter-Speichern dargestellt. Die Trendlinien basieren auf den Lastprofilen der in Kapitel 2.4.3.1.2 beschriebenen Gebäude. Daraus geht hervor, dass die dezentralen Wärmepumpenlösungen einen breiten Anwendungs- und Leistungsbereich abdecken können. Die hydraulische Konfiguration mit Kombispeicher bietet ein größeres Potenzial für stabile Raumtemperaturen (auf Kosten eines gelegentlich geringeren Warmwasserkomforts).

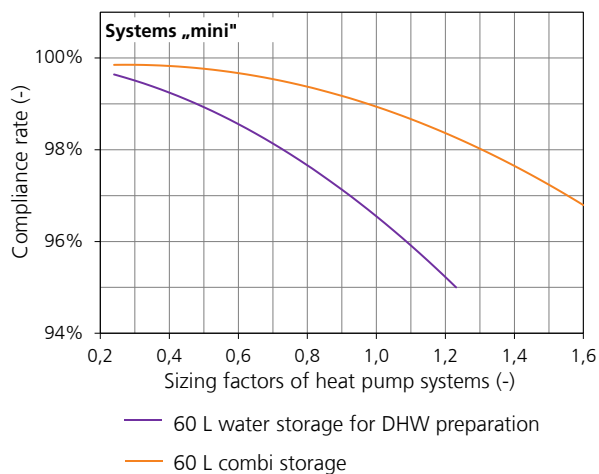


Abbildung 97: Raumtemperatur-Einhaltungsrate über verschiedene Systemauslegungsfaktoren für dezentrale Wärmepumpensysteme mit elektrischen Heizungen in den Vorlaufleitungen.

Abbildung 98 vergleicht den SPF für dieselbe Wohnung wie oben. Die linke Grafik zeigt die Auswirkungen der Speichereinbindung für die Wärmepumpe mit Bohrlochern als Quelle: Während das System mit reinem Warmwasserspeicher einen SPF von 4 erreicht, sinkt dieser bei Umstellung auf die Kombispeicher-Konfiguration auf 2,9, da der gesamte Wärmebedarf auf den Speicher bei dessen eingestellter Temperatur von 60 °C geladen werden muss (kein Vorteil der Heizkurve). Die Speichergröße (60 l für „Mini“, 120 l für „Small“) hat keinen Einfluss auf die saisonale Leistung. Der leicht erhöhte Einsatz eines Zusatzheizgeräts in den „Mini“-Systemen wird durch die geringeren Speicherverluste kompensiert.

Der Effekt der niedrigen Temperatur ist offensichtlich (rechtes Diagramm): Die höheren Temperaturen, die während der Hauptheizperiode aus dem Bohrloch entnommen werden, sowie die geringere Temperaturdifferenz zwischen dem Kältemittel und der Vorlauftemperatur auf der Quellenseite führen zu einem deutlich höheren SPF im Vergleich zu Luft als Quelle.

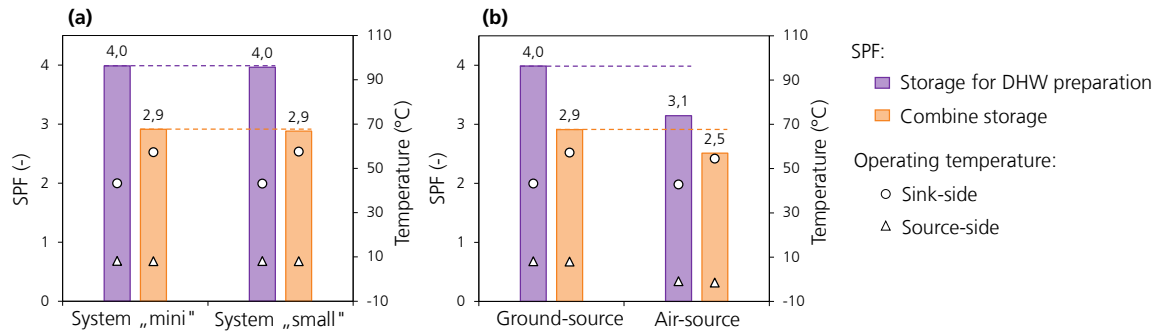


Abbildung 98: Saisonaler Leistungsfaktor (SPF) der Wärmepumpensysteme mit elektrischen Heizungen in den Vorlaufleitungen über verschiedene Systemvarianten und Wärmequellen hinweg. (a) SPF für die Systeme „mini“ und „small“ mit unterschiedlicher Speicherkapazität. (b) SPF für verschiedene Wärmequellen.

Der Einfluss des Speichervolumens Niedertemperaturquelle und der Speicherintegration auf das Schaltverhalten der Wärmepumpe unter den gegebenen Randbedingungen ist in Abbildung 99 dargestellt. Eine Verdopplung der Speicherkapazität von 60 l auf 120 l reduziert die Schaltzahl um etwa 25 % (linkes Diagramm). Die Speicherintegration und die Niedertemperaturquelle haben keinen signifikanten Einfluss auf die Schalthäufigkeit

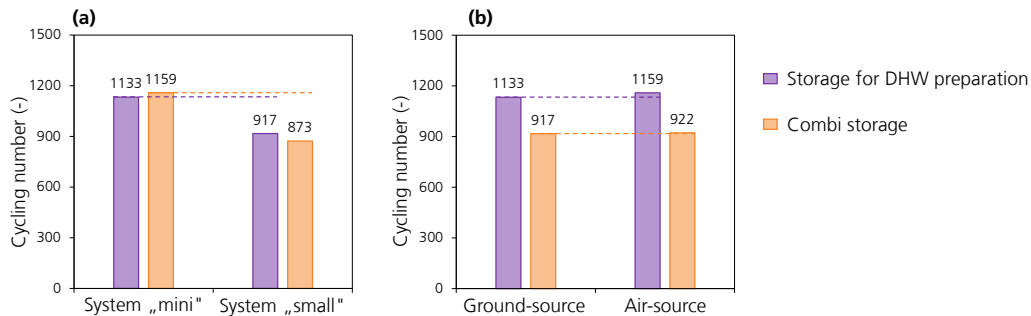


Abbildung 99: Kompressorzyklenzahl der Wärmepumpensysteme mit elektrischen Heizungen in den Vorlaufleitungen über verschiedene Systemvarianten und Wärmequellen hinweg. (a) Kompressorzyklenzahl für die Systeme „mini“ (60l) und „small“ (120l) bei unterschiedlicher Speicherkapazität. (b) Kompressorzyklenzahl für verschiedene Wärmequellen.

Die elektrische Spitzenlast von Wärmepumpensystemen in (nicht) renovierten 55 m²-Wohnungen ist in

Abbildung 100 dargestellt. Durch die Sanierung sinkt die Heizlast, ebenso wie die elektrische Spitzenlast. Die Speicherkapazität hat keinen signifikanten Einfluss auf die Spitzenlast. Das System mit Warmwasserspeicher weist im Vergleich zur Kombi-Speicherlösung einen reduzierten Spitzenwert auf, da die elektrischen Zusatzheizungen in dieser Konfiguration nicht gleichzeitig in Betrieb sind.

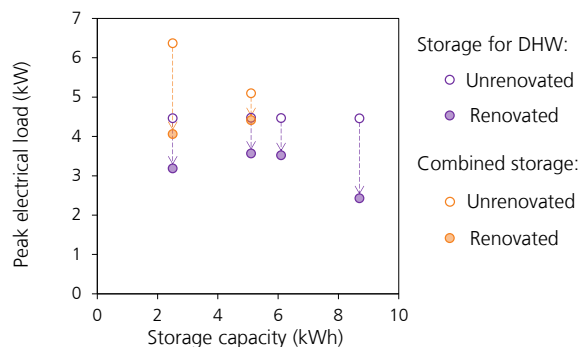


Abbildung 100: Zusammenhang zwischen Speicherkapazität und Spitzenstromlast einer einzelnen dezentralen Wärmepumpenanlage mit elektrischen Heizungen in den Versorgungsleitungen in sanierten und nicht sanierten Wohnungen.

Die Gleichzeitigkeit des Stromverbrauchs der Wärmepumpensysteme ist entscheidend für die Bestimmung der erforderlichen Leistung des Hausanschlusses. Abbildung 101 zeigt die Abhängigkeit des Gleichzeitigkeitsfaktors von der Anzahl der Wohnungen. Offensichtlich beeinflusst der Wärmebedarf nicht nur die Spitzenleistung eines einzelnen Wärmepumpensystems, sondern auch den Gleichzeitigkeitsfaktor, der sich durch eine Gebäudesanierung um über 40 % verringert. Je höher die Anzahl der Wohnungen im Gebäude ist, desto besser werden die Spitzenlasten verteilt, was zu einem niedrigeren Gleichzeitigkeitsfaktor führt. Bei 4 bis 24 Einheiten ist eine Verringerung um ~35 % zu beobachten. Bei einer weiteren Erhöhung der Anzahl der Wohnungen ist kein wesentlicher Einfluss auf den Gleichzeitigkeitsfaktor zu beobachten. Der Grund für Simultaneitätsfaktoren über eins liegt in dessen Definition (siehe Kapitel 2.4.3.1.3): Er hängt mit der elektrischen Leistung der Wärmepumpen bei A-7/W55 zusammen (in diesem Fall $P_{el,HPS, rated} = 1843 \text{ W}$), weshalb der Betrieb elektrischer Zusatzheizungen zu Werten über eins führt.

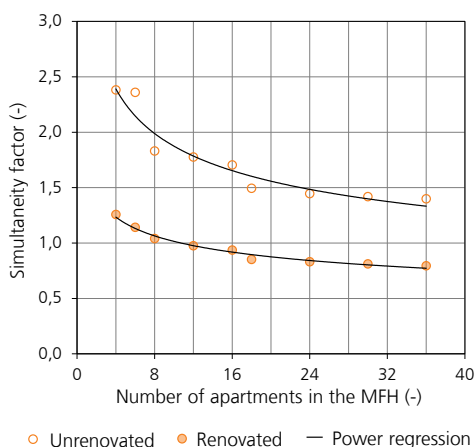


Abbildung 101: Gleichzeitigkeitsfunktionen des 15-Minuten-Durchschnitts-Stromverbrauchs für dezentrale Wärmepumpensysteme in Mehrfamilienhäusern mit unterschiedlicher Anzahl von Wohnungen und unterschiedlichem Sanierungszustand. Ergebnisse für ASHP

Ein Vergleich dieser Werte mit den Anforderungen an die Netzanschlussleistung von Gebäuden gemäß DIN 18015¹ zeigt, dass der Anschluss für den Einsatz dezentraler Wärmepumpen ausreichend ist, sofern die elektrische Anlage des Gebäudes für die direkte elektrische Warmwasserbereitung ausgelegt wurde.

¹ DIN 18015-1:2020-05 Elektrische Anlagen in Wohngebäuden

2.4.3.3 Quellennetze

Wie in der Einleitung beschrieben, konzentriert sich diese Studie zu dezentralen Wärmepumpensystemen auf Sole-Wasser-Wärmepumpen, die in den Wohnungen installiert sind. Um diese Wärmepumpen mit Niedertemperaturenergie zu versorgen, sind entsprechende Quellennetze erforderlich. Auf den folgenden Seiten werden Überlegungen zu Hydraulik, Regelung und Umsetzung dokumentiert.

Hydraulik

Wie bei Heizungsnetzen kann hinsichtlich der Hydraulik des Quellennetzes zwischen passiven und aktiven Varianten unterschieden werden: Bei einer passiven Variante verfügt der Quellteilslauf über keine zentrale Umwälzpumpe. Stattdessen verfügt jede Wohnungswärmepumpe über eine eigene Pumpe, die bei Bedarf einen Volumenstrom aus dem zentralen Netz „entnimmt“. Dies ist jedoch nur möglich, wenn die Förderhöhe der dezentralen Pumpen ausreicht, um den Druckverlust des gesamten Quellteils einschließlich Komponenten wie Erdwärmesonden (falls vorhanden) zu überwinden. Zudem muss sichergestellt sein, dass die Flüssigkeit aus der Hauptverteilungsleitung und nicht aus Teilkreisen anderer Wohnungen entnommen wird. Dies erfordert eine entsprechende Auslegung, möglicherweise auch den Einsatz von Rückschlagventilen, obwohl die Praxis gezeigt hat, dass diese langfristig nicht immer zuverlässig schließen.

Alternativ ist ein aktives System mit einer zentralen Umwälzpumpe möglich. Bei einer Variante mit einer zentralen Pumpe im Quellteils ohne dezentrale Pumpen ist ein sorgfältiger hydraulischer Abgleich erforderlich, um einen gleichmäßigen Durchfluss durch alle Teilkreise in den Wohnungen zu gewährleisten. Diese Gleichmäßigkeit lässt sich umso leichter erreichen, je deutlicher die Druckverluste in den Teilkreisen gegenüber denen im Quellteils überwiegen. Allerdings muss der Massenstrom in den Teilkreisen in Abhängigkeit von der erforderlichen Quelleistung so regelbar sein, dass eine Soll-Temperaturdifferenz erreicht wird. Dies muss entweder durch Regelventile oder dezentrale Pumpen erreicht werden. Zudem reicht ein statischer hydraulischer Abgleich nicht aus, da die Volumenströme in den einzelnen Teilkreisen im Teillastbetrieb voneinander abweichen können. In diesem Fall ist ein dynamischer oder adaptiver hydraulischer Abgleich, z. B. mittels Differenzdruckreglern, erforderlich (siehe DIN 94679). Um den Druckverlust in den Steigleitungen des Quellteils gering zu halten, sollten die Querschnitte dort großzügig bemessen sein. Dies kann auch sicherstellen, dass die Druckverluste in den Teilkreisen (mit kleineren Querschnitten) dominieren (siehe oben), was zu einer gleichmäßigeren Strömung führt. Nachteile sind jedoch die höheren Kosten und die Tatsache, dass der Installationsraum vorhanden sein muss. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die Strömungsgeschwindigkeiten in Rohrleitungsnetzen bestimmte Mindest- und Höchstwerte nicht unterschreiten bzw. überschreiten dürfen. Typischerweise werden für Hauptverteilungsleitungen Strömungsgeschwindigkeiten von 0,3 bis 1,5 m/s als Richtwerte angegeben¹. Für diese Einschränkungen gibt es verschiedene Gründe, wie z. B. die Verhinderung von Ablagerungen, die Verringerung des Verschleißes, die Minimierung von Geräuschen, die Begrenzung des Energiebedarfs der Pumpe usw. Ausgehend von der erforderlichen Heizleistung und den Temperaturspannen werden Massenströme berechnet, aus denen unter Berücksichtigung der minimalen und maximalen Strömungsgeschwindigkeiten die Rohrdurchmesser ermittelt werden können. In diesem Zusammenhang muss die Gleichzeitigkeit der Wärmepumpenleistung berücksichtigt werden.

Bei niedrigen Vorlauftemperaturen besteht die Gefahr der Kondensation an den Außenflächen der Rohrleitungen des Vorlaufnetzes, sodass eine diffusionsdichte Wärmedämmung erforderlich ist. Eine Ausnahme bilden Rohrleitungen an der Fassade, wenn Luft als Wärmequelle genutzt wird: Hier können die Rohrleitungen ungedämmt bleiben und dienen als Erweiterung des Luft-Brine-Wärmetauschers.

¹ Schramek, Ernst-Rudolf (Hrsg.). *Taschenbuch der Heizungs- und Klimatechnik, einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik*. 73. Auflage. München: Oldenbourg Industrieverlag, 2007. ISBN 978-3-8356-3104-5.

Tabelle 18: Dämmungsanforderungen für Kaltwasserleitungen gemäß geltender deutscher Gesetzgebung

Rohrinnendurchmesser [mm]	Minstdämmstärke [mm]
≤ 22 mm	9 mm
> 22 mm	19 mm

Bei höheren Vorlauftemperaturen, z. B. im Kaskadenbetrieb mit einer Vorwärmung durch eine zentrale Wärmepumpe, ist eine Wärmedämmung erneut erforderlich, um hohe Wärmeverluste zu vermeiden, wenn die Vorlaufleitungen in Kaltschächten verlegt werden. Werden sie jedoch durch die Wohnungen geführt, ist eine Wärmedämmung nicht erforderlich. Die Wärmedämmstärke von Rohren ist in Deutschland durch das Energieeinsparungsgesetz vorgeschrieben und hängt vom Innendurchmesser ab. Bei einer Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung von $0,035 \text{ W/(mK)}$ sind für Kaltwasser- und Kaltwasserleitungen die in Tabelle 18 aufgeführten Minstdämmstärken erforderlich¹.

Eine optimierte hydraulische Planung bietet ein hohes Energiesparpotenzial². So sind beispielsweise eine geeignete Auswahl der Rohrquerschnitte, die Minimierung von Wegstrecken, Querschnittsänderungen und Installationen ebenso vorteilhaft wie angepasste Massenströme (Vermeidung zu geringer Temperaturunterschiede), um die hydraulische und letztlich die elektrische Leistung der Pumpen zu minimieren und damit den Jahresleistungsfaktor der Anlage positiv zu beeinflussen, da auch die Hilfsenergie in dessen Bilanz einfließt.

Regelung

In den an die wohnungsbezogenen Wärmepumpen angeschlossenen Teilleitungen sollte der Massenstrom so geregelt werden, dass ein konstanter Temperaturunterschied aufrechterhalten wird. Unterschiedliche Temperaturunterschiede in den einzelnen Wohnungen würden zu gemischten Temperaturen im Rücklauf führen, was Exergieverluste verursachen würde. Ein Temperaturunterschied von 3 bis 5 K erscheint als Kompromiss zwischen abnehmender Wärmepumpenleistung bei höheren Unterschieden und steigender hydraulischer Pumpenleistung, die für geringere Temperaturunterschiede erforderlich ist, angemessen.

Konstruktive Umsetzung

Wird eine Immobilie komplett renoviert, können Schornsteine oder vorhandene Schächte für die Verlegung der Leitungen des Versorgungsnetzes genutzt werden. Dabei ist zu beachten, dass diese häufig auch für andere Zwecke genutzt werden, weshalb die Eignung stets im Einzelfall geprüft werden muss. Alternativ können die Leitungen auch entlang der Fassade verlegt werden. Ein Beispiel für diese Lösung findet sich in Abbildung 102.

¹ https://www.gesetze-im-internet.de/geg/anlage_8.html

² <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/lowex-q5.html>

Die folgende Schätzung soll beispielhaft die ungefähren erforderlichen Querschnitte für Schornsteine oder Schächte aufzeigen (siehe Abbildung 103). Sie dient jedoch nur als Richtwert; eine konkrete Auslegung muss stets individuell erfolgen.



Abbildung 102: links: Beispiel für eine an der Fassade montierte Versorgungsleitung; rechts: Eisbildung an der Leitung (fleckige Oberfläche am rechten Rohr) und am Wandkanal

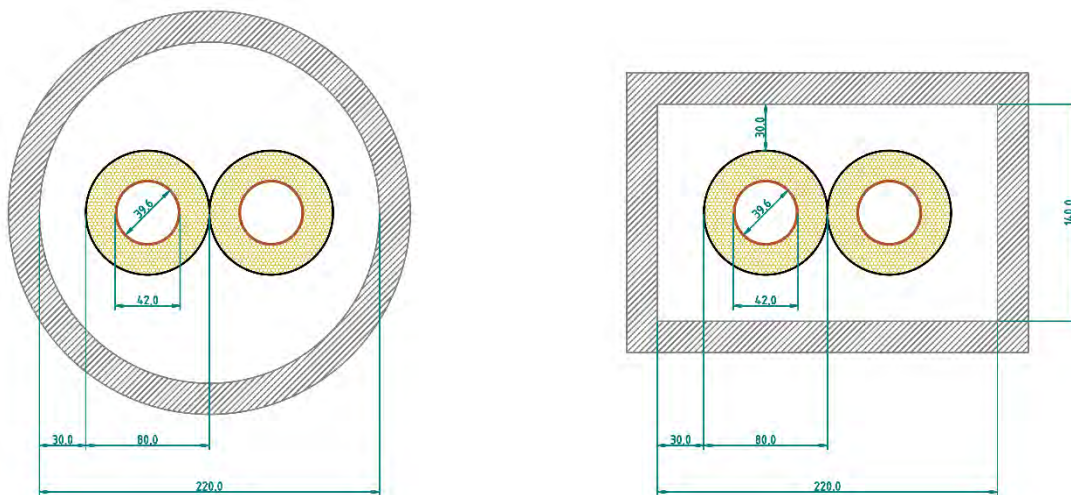


Abbildung 103: Beispiel für Kamin-/Schachtquerschnitte mit wärmedämmten Rohren

Nehmen wir ein Mehrfamilienhaus an, in dem vier übereinanderliegende Wohnungen über gemeinsame Rohrleitungen aus dem Quellennetz versorgt werden sollen. Bei einer maximalen Heizleistung von 6 kW pro Wohnung und einem COP von 3 ergibt sich eine Quellleistung von 16 kW für alle vier Wohnungen. Bei einem Temperaturunterschied von 3 K ergibt sich daraus ein Volumenstrom von ~1,3 l/s für ein gängiges Wasser-Glykol-Gemisch. Bei minimalen und maximalen Strömungsgeschwindigkeiten von 0,3 und 1,5 m/s ergibt sich ein minimaler Rohrrinnendurchmesser von 34 mm und ein maximaler von 75 mm. Es müssen jedoch handelsübliche Abmessungen berücksichtigt werden, sodass ein Mindestdurchmesser von 39,6 mm und ein Höchstdurchmesser von 60 mm realistisch sind. Unter Annahme des minimalen Innendurchmessers, einer entsprechenden Wandstärke von 1,2 mm und der erforderlichen Wärmedämmstärke von 19 mm sowie eines angenommenen zusätzlichen Abstands von 30 mm zur „Sicherheit“ für die Zugänglichkeit während der Installation ergibt sich ein minimaler Innendurchmesser von ca. 220 mm für einen zylindrischen Schornstein

oder ein erforderlicher freier Querschnitt von 220 mm x 140 mm für einen rechteckigen Schacht oder Schornstein. Die tatsächlichen Abmessungen bestehender Schornsteine hängen von verschiedenen Auslegungsparametern ab, daher müssen sie vor Ort auf ihre Geometrie und Eignung überprüft werden. Je nach Ausführung können die Beispielabmessungen bereits zu groß sein. Zudem ist es möglich, dass bestehende Schornsteine oder Schächte bereits für andere Installationen, z. B. elektrische Leitungen, genutzt werden, sodass eine Beurteilung des konkreten Objekts unerlässlich ist.

Auslegungsbedingungen und Gleichzeitigkeitsfaktor für das Quellennetz

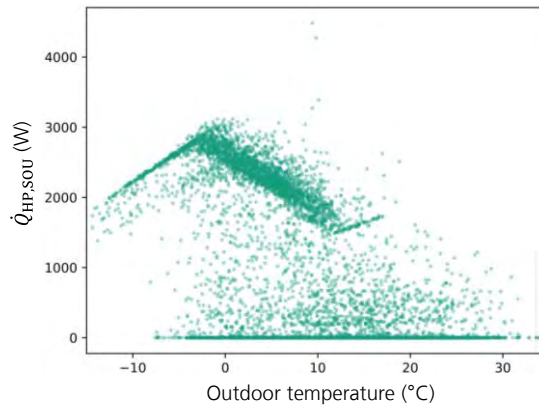


Abbildung 104: Stündliche durchschnittliche quellenseitige Wärmelast einer dezentralen Wärmepumpenanlage in einem unrenovierten Mehrfamilienhaus.

Abbildung 104 zeigt die durchschnittlichen thermischen Quellleistungen für eine nicht sanierte Beispielwohnung (55 m² große Wohnung mit zwei Bewohnern in Mehrfamilienhäusern, die zwischen 1979 und 1994 erbaut wurden) mit zentralem Luft-Brine-Wärmetauscher. Die Spitzenquellleistung von ca. 3 kW tritt bei -2 °C auf, was dem Bivalenzpunkt dieses Systems entspricht. Unterhalb dieser Umgebungstemperatur reicht die Wärmepumpenleistung nicht aus, um die Wohnung zu beheizen, sodass sie durch eine elektrische Zusatzheizung unterstützt wird. Bei niedrigeren Umgebungstemperaturen sinkt die Quelltemperatur und die erforderliche Heizvorlauftemperatur steigt, was dazu führt, dass der COP der Wärmepumpe und die erreichbare Heizleistung abnehmen. Daher sinkt auch die Verdampferleistung (=Quellenleistung) bei niedrigeren Umgebungstemperaturen. Die Dimensionierung des Niedertemperatur-Quellennetzes muss auf der Spitzenquellenleistung am Bivalenzpunkt (-2 °C in diesem Beispiel) basieren – nicht am Auslegungspunkt (-12 °C)!

Die Auswirkung der Anzahl der Wohnungen auf den Simultaneitätsfaktor (definiert als Spitzenleistung des Verdampfers, in diesem Fall bei A-2, und maximale Kompressordrehzahl) für die Quellenseitenleistung ist in Abbildung 105 dargestellt. Eine Erhöhung der Anzahl der Wohnungen von 4 auf 24 führt zu einer Verringerung des Simultaneitätsfaktors um ~25 %. Ähnlich wie beim Gebäudeanschluss (Abbildung 101) ist bei einer weiteren Erhöhung der Anzahl der Wohnungen kein wesentlicher Einfluss auf den Simultaneitätsfaktor zu beobachten.

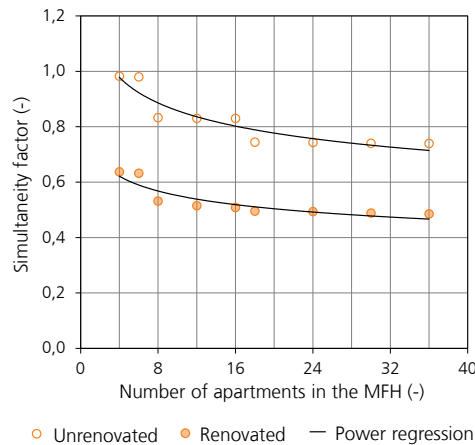


Abbildung 105: Gleichzeitigkeitsfunktionen der stündlichen durchschnittlichen Heizlast auf der Quellenseite für dezentrale Wärmepumpensysteme in Mehrfamilienhäusern mit unterschiedlicher Anzahl von Wohnungen und unterschiedlichem Sanierungszustand.

2.4.3.4 Zusammenfassung zu dezentralen Wärmepumpensystemen

Da Aufstellplatz in Wohnungen knapp ist, ist eine Systemkonfiguration mit getrennten Speichern für Heizung und Warmwasserbereitung in aller Regel nicht realisierbar. Ein kompaktes Wärmepumpensystem ohne Kombipuffer (reiner Warmwasserspeicher) kann auch in Wohnungen hohe saisonale Effizienzen erreichen, muss allerdings so konzeptioniert sein, dass der Minstdurchfluss im Kondensator gewährleistet ist.

Eine Kombispeicher-Konfiguration ist hinsichtlich der Komfort Erfüllung robuster, insbesondere wenn die Auslegungsleistung der Wärmepumpe nahe an der maximalen Wärmebelastung der Wohnung liegt. Dies geht jedoch zu Lasten des SPF, der in den untersuchten Fällen um 0,6 bis 1,1 Punkte geringer ausfällt.

Für 2-Personen-Haushalte lässt sich bereits mit einem Speichervolumen von 60 l und begrenztem Einsatz eines Zusatzheizgeräts ein angemessener Warmwasserkomfort erreichen. Erdwärmesysteme können sogar vollständig monovalent betrieben werden.

PCM-Speicher gleicher Baugröße können aufgrund der höheren volumenbezogenen Speicherkapazität den Heizstabeinsatz annähernd komplett vermeiden oder auch größere Zapfmengen bereitstellen. Die geringere Wärmepumpeneffizienz aufgrund der erforderlichen höheren Beladetemperaturen werden durch geringere Verluste und den reduzierten Heizstabeinsatz weitestgehend kompensiert.

Bei Gebäuden mit weniger als 16 Einheiten hat die Anzahl der Wärmepumpen einen erheblichen Einfluss auf die erforderliche elektrische Anschlussleistung sowie erforderliche Quelleistung. Darüber nähert sich der Gleichzeitigkeitsfaktor für beide Parameter einem konstanten Wert.

Die Dimensionierung des Quellnetzes hängt maßgeblich von der zu erschließenden Wärmequelle und der Auslegung der Wärmepumpen ab: Bei Luft als Quelle bietet sich eine unisolierte Leitungsführung an der Fassade an. Bei Quellen mit höheren Temperaturen liegt eine (isolierte) innenliegende Verteilung nahe. Die Einhaltung der Brandschutzvorgaben zwischen den Geschossen sowie beim Einführen in die Wohnungen ist zu berücksichtigen. Für die Auslegung ist der maximal erforderliche Durchfluss zu berücksichtigen. Dieser liegt nicht zwingend bei der Normaußentemperatur oder Maximalleistung der Wärmepumpe.

2.5 Planungsprozess für Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern

Das Arbeitspaket 1 betrachtet die Einbindung von R290-WP ins Gebäudesystem in Hinblick auf technische, strukturelle und regulatorische Aspekte (s. Arbeitspaketstruktur des Projekts in Abbildung 1). Anhand realer Beispielgebäude wird das Gesamtsystem aus den technischen Komponenten und dem baulichen Bestand analysiert. Die Beispielgebäude stammen aus dem Bestand der Wohnungswirtschaftsfirmen im Industriebeirat.

2.5.1 Methodik

Auswahl der Beispielgebäude

Die im Rahmen des Projekts entwickelten Lösungen sollten so allgemein wie möglich sein, d. h. viele Anwendungsfälle abdecken. Anstelle von fiktiven oder durchschnittlichen Gebäuden werden bestehende Gebäude aus den Portfolios der Wohnungsunternehmen des Industriebeirats herangezogen. Diese Gebäude wurden in einem mehrstufigen Auswahlverfahren ermittelt. Zunächst wurde das verfügbare Portfolio mit dem deutschen Bestand an Mehrfamilienhäusern verglichen, um durch die Zusammensetzung der Beispielgebäude repräsentative Fälle zu gewährleisten.

Bei der Auswahl der Gebäude spielt neben der statistischen Relevanz auch die Machbarkeit eine Rolle – so sollte sich das Projekt beispielsweise auf Gebäude konzentrieren, bei denen die Wohnungsunternehmen des Industriebeirats Herausforderungen sehen, wie z. B. bei dezentralen Versorgungssystemen oder Gebäuden in niedrigen Energieeffizienzklassen. Für diese Gebäude wurden detaillierte Daten erhoben und eine Reihe von Analysen durchgeführt, die in den folgenden Abschnitten beschrieben werden.

Tabelle 19 Ausgewählte Beispielgebäude:

Ort Beispielgebäude	Mönchengladbach, Eickener Straße	Essen, Schwanenbuschstr.	Hannover, Löwenberger Straße	Potsdam, Großbeeren/ H.v.Kleist Str.	Schönebeck, Leipziger Str.
Baujahr	1962	1952	1968	1915	1938
Wohnungen	8	7	16	21	23

2.5.1.1 Datenerhebung Beispielgebäude

Für die Bestandsaufnahme wurden zunächst Merkmale und Besonderheiten der Beispielgebäude, des Grundstücks und der direkten Nachbarschaft und städtebaulichen Einbindung analysiert. Als Auswertungsgrundlage dienten Planunterlagen, Daten zur Gebäudesubstanz und zu den technischen Anlagen der Beispielgebäude sowie Fotografien, Luftbilder und als Open Data verfügbare Karten der Geoportale der Länder ¹. Zum Teil wurden bei Ortsbegehungen eigene Fotoaufnahmen angefertigt. Die Baupläne der Beispielgebäude stammen teils noch aus der Planungsphase. Die Übereinstimmung der Pläne mit dem aktuellen Zustand der Gebäude ist daher nicht in allen Fällen gewährleistet. Nachträgliche Umbauten sind nur dann bekannt, wenn sie durch die der Wohnungsunternehmen des Industriebeirats erfasst und an uns weitergegeben wurden. Die Informationen zu Gebäuden oder Bauteilen wurden von den Wohnungsbaugesellschaften bereitgestellt, jedoch nicht vor Ort überprüft. Daher liegt allen Annahmen zu den Beispielgebäuden ein Unsicherheitsfaktor zugrunde.

Da das vorrangige Ziel der Datenerhebung keine exakte Fachplanung, sondern die Abschätzung realistischer Größenordnungen für die Beispielgebäude war, werden die unten beschriebenen Verfahren und überschlägigen Berechnungen als hinreichend genau erachtet.

¹ IHFC, Global Heat Flow Data Assessment Group (2016): Viewer Global Heat Flow Database. Online verfügbar unter <https://dataservices.gfz-potsdam.de/web/>, zuletzt geprüft am 12.11.2025

Heizlastberechnung nach DIN 12831

Die Norm-Heizlastberechnung wurde zunächst anhand überschlägiger Berechnungsverfahren in Anlehnung an die DIN 12831 erstellt, um eine schnelle Arbeitsgrundlage für die weiteren Betrachtungen und Simulationen der anderen Arbeitspakete zu erhalten. Nach diesem Verfahren wurde sowohl die raumweise als auch die Gebäudeheizlast erstellt. Die Ergebnisse wurden durch einen Vergleich mit den realen Verbrauchsdaten der letzten Jahre und mit einer generischen Abschätzung anhand typischer Gebäudeparameter und Baualtersklassen verifiziert.

Um eine präzisere und genauere Ausgangslage für die extern erstellte Planungsleistung der Projektaufstockung zu erhalten, wurde im Nachgang ein externes Planungsbüro (DGNA mbH) damit beauftragt, für fünf der Beispielgebäude eine Heizlastberechnung nach DIN EN 12831 zu erstellen.

Analyse der Heizkörperleistung bei verschiedenen Vorlauftemperaturen im Bestand

Von den der Wohnungsunternehmen des Industriebeirats wurden Daten über die Heizkörpertypen- und Größen für die Beispielgebäude zur Verfügung gestellt. Diese Daten wurden als Grundlage für die weiteren Untersuchungen der Heizkörperleistung bei verschiedenen Systemtemperaturen genutzt. Mittels Literaturrecherchen verschiedener Bautypen von Heizkörpern wurde die Nennleistung für die im Altbau typischen Vorlauf- und Rücklauftemperaturen von 75/65 ermittelt, und so der Ist-Zustand für jeden Raum abgebildet. In Räumen mit mehreren Heizkörpern wurden diese addiert, um die Heizkörperleistung für den Raum zu erhalten. Lagen für Einzelräume keine Heizkörperdaten vor, so wurden diese nach Plausibilität angenommen; also gemäß der Heizkörper identischer Wohnungen oder nach typischen Werten gemäß der Baualtersklasse. Anhand untenstehender Umrechnungsformel und der Literatur entnommener Korrekturfaktoren erfolgte eine Abschätzung der Wärmeleistung der Heizkörper für die gewünschten Systemtemperaturen von 90/70 und 55/45 ¹:

$$\phi_H = \frac{\phi_S}{F}$$

Mit ϕ_H = Wärmeleistung des Heizkörpers bei individueller Systemtemperatur

ϕ_S = Norm-Wärmeleistung des Heizkörpers bei Systemtemperaturen von 75/65/20

F = Umrechnungsfaktor

Zur Ermittlung der Auskömmlichkeit der Nennleistung der installierten Heizkörper für reduzierte Vorlauftemperaturen erfolgte ein Vergleich der Heizkörper-Nennleistung mit der Raumheizlast der Heizlastberechnung. Die Ergebnisse sind im Kapitel 2.5.2.2 dargestellt.

Quellenverfügbarkeit

Um für jedes Beispielgebäude die Verfügbarkeit verschiedener Systeme zu prüfen, werden unterschiedliche – auch selten genutzte Wärmequellen analysiert. Die Verfügbarkeit dieser wird unter Berücksichtigung der räumlichen und geografischen Gegebenheiten abgeschätzt. Der Fokus liegt dabei auf einer grundsätzlichen Prüfung der Verfügbarkeit, nicht um die exakte Dimensionierung der Wärmequellen. Für diesen Zweck wird die Anwendung von überschlägigen Berechnungs- und Abschätzungsmethoden als hinreichend genau erachtet. Sie kann jedoch im Falle einer Planung eine genauere Quellenuntersuchung nicht ersetzen. Grundlage dieser Bewertung sind die folgenden Parameter:

Betrachtet wird für jedes Beispielgebäude die vollständige Deckung des Umweltwärmebedarfs jeweils durch eine einzelne Quelle. Kombinationen verschiedener Quellen werden im Zuge dieser Untersuchung nicht berücksichtigt. Befinden sich auf einem Grundstück mehrere Gebäude oder Gebäudeteile, wird jeweils der entsprechende Flächenanteil des Grundstücks für die Nutzung der Wärmequelle angesetzt.

Als Grundlage für die Auslegung der Wärmepumpen dient die Heizlastberechnung nach DIN 12831. Bei Beispielgebäuden mit Normaußentemperaturen unter -10°C wird der Bivalenzpunkt auf -7°C festgelegt, ansonsten auf -5 °C. Bis zu dieser Temperatur soll der Wärmebedarf des Gebäudes komplett mit der

¹ Kermi GmbH (2025): Flachheizkörper Technik. Heizkörperauslegung / Korrekturfaktoren. Hg. v. Kermi GmbH

Wärmepumpe gedeckt werden. Bei einer durchschnittlich angenommenen Normaußentemperatur von -10 °C wird die Wärmepumpenleistung im Bivalenzpunkt als etwa 90 % der Normheizlast abgeschätzt. Daraus ergibt sich die notwendige Entzugsleistung der Wärmequelle. Weiterhin wird die Annahme von 2300 Volllaststunden pro Jahr getroffen.

Wärmequelle Außenluft: Der notwendige Volumenstrom ist im Außenraum in ausreichender Menge vorhanden. Ausschlaggebend für die Aufstellung von Außeneinheiten sind die Abstandsflächen zu Nachbargrundstücken und Geräuschemissionen. Die A/W-Außeneinheit wird gemäß Angaben der Projektteilnehmenden mit exemplarischen Abmessungen von $h \times b = 1,20 \times 2,20$ m angesetzt. Berücksichtigt werden hier die Abstandsflächen nach der jeweiligen Landesbauordnung. Je nach Baugebietsart variieren die zulässigen Abstände gemäß TA Lärm. Hierfür wird der Online-Schallrechner des Bundesverbands Wärmepumpe genutzt, der auf der TA Lärm und dem LAI-Leitfaden basiert¹. Zur Bewertung der Schallemissionen dienen marktverfügbare Geräte mit vergleichbarer Leistung als Referenz. Es werden umlaufend 1 m breite Schutzzonen aufgrund des Kältemittels R290 angenommen, wie sie von zahlreichen Herstellern gefordert sind. Innerhalb dieses Bereichs dürfen weder Gebäudeöffnungen, Zündquellen noch öffentliche Flächen oder Nachbargrundstücke liegen.

Quelle PVT: Die Dimensionierung erfolgt anhand der Größe der Dachfläche sowie der Dachneigung und -ausrichtung der Beispielgebäude. Von der theoretisch verfügbaren Dachfläche werden pauschal 20 % abgezogen, da Befestigungsmittel, etwaige Wartungswege und feste Modulgrößen die volle Flächennutzung verhindern. Für die Auslegung von PVT als Quelle wird die Entzugsleistung bei niedrigen Außentemperaturen und Windstille zugrunde gelegt, um konservative Ergebnisse zu erhalten. Die erforderliche Fläche wird mit den Faustformeln des Unternehmen Triple Solar (Mitglied des Industriebeirats) ermittelt². Fassadenflächen werden für die Belegung mit PVT-Paneeelen nicht berücksichtigt.

Energiezaun: Bei der Auslegung des Energiezauns wird ein 2 m hoher Zaun angenommen, der zu einem Drittel im Erdreich liegt, in diesem eingegrabenen Bereich also als Erdkollektor wirkt³. Die Dimensionierung erfolgt exemplarisch mittels einer Faustformel des Herstellers Viessmann, wobei die minimale Entzugsleistung angesetzt wird. Geeignete Standorte sind vorzugsweise sonnige Abschnitte entlang der Grundstücksgrenze.

Boden/Erdreich als Wärmequelle: Die erforderlichen Abstände zu Grundstücksgrenzen, Gebäuden und Verkehrswegen sowie die Klimazone werden anhand der VDI 4640 und der Landesbauordnungen ermittelt. Ob darüber hinaus Vorgaben der Stadt oder Gemeinde bestehen, wurde nicht geprüft. Die Angaben zu spezifischen Entzugsleistungen des Bodens sowie hydrologische Besonderheiten stammen aus den Geoportalen der Länder und der IHFC Global Heat Flow Database⁴. Größerer Bewuchs wie Hecken und Bäume wird nicht zur verfügbaren Fläche hinzugerechnet. Auch die Flächen vorhandener Wege und kleinerer baulicher Anlagen (z.B. Schuppen) auf dem Grundstück werden nicht als verfügbar angesehen. Theoretisch sind das Entfernen und Wiederherstellen solcher zwar möglich, generiert aber zusätzliche Kosten. Für die Ermittlung aller Wärmequellen der oberflächennahen Geothermie wird ein Abstand von 1 m zu Gebäuden, Grundstücksgrenzen und dem Wurzelraum großer Bäume eingehalten, um Schäden durch Vereisungen zu vermeiden.

Flächenkollektor Erdwärme: Berücksichtigung der überwiegend ebenen und unversiegelten Freifläche nach VDI4640.

¹ BWP Bundesverband Wärmepumpe (2025): Schallrechner. Online verfügbar unter <https://www.waermepumpe.de/werkzeuge/schallrechner/> zuletzt geprüft am 11.11.2025

² Triple Solar (2023): Performance of the Triple Solar PVT heat pump panel. Factsheet

³ Rosenkranz, Alexander (2025): Energiezaun sammelt Umweltenergie für die Wärmepumpe. Hg. v. Viessmann Climate Solutions SE. Online verfügbar unter <https://www.heizung.de/waermepumpe/wissen/energiezaun-sammelt-umweltenergie-fuer-waermepumpen.html>, zuletzt geprüft am 12.11.2025.

⁴ IHFC, Global Heat Flow Data Assessment Group (2016): Viewer Global Heat Flow Database. Online verfügbar unter <https://dataservices.gfz-potsdam.de/web/>, zuletzt geprüft am 12.11.2025.

Erdwärmekorb: Gemäß der Auslegungsvorgaben der VDI 4640 wird hier beispielhaft mit Erdwärmekörben der Größe 1,30 x 1,30 m und Abständen von 4 m zwischen den Körben gerechnet. Daraus ergibt sich der Flächenbedarf auf dem Grundstück. Aufgrund der stärkeren Vereisung eines Erdwärmekorbs und Ringgrabenkollektors werden hier 2 m Abstand zu Gebäuden eingeplant.

Ringgrabenkollektoren: Gemäß der Auslegungsvorgaben der VDI 4640 werden die Ringgräben als 3 m tiefe Gräben mit 20 cm Abstand zwischen den Soleleitungen berechnet.

Erdwärmesonden: Die erforderliche Sondentiefe und -Anzahl wird nach dem überschlägigen Berechnungsverfahren GeoHandlight der Hochschule Biberach ermittelt ¹. Geologische Einschränkungen wie korrosive Gesteine und Wasserschutzzonen werden berücksichtigt. Nur real erreichbare Bereiche auf den Grundstücken mit ausreichenden Rangier- und Lagerflächen für die Baustelleneinrichtung werden als verfügbaren Ort für die Sondenbohrungen angesetzt. Die Wärmequellen Abwasser und Oberflächenwasser werden nicht weiter untersucht, da deren Verfügbarkeit in der Nähe der Beispielgebäude nicht aus öffentlichen Daten ermittelbar (im Falle von Abwasser) bzw. nicht augenscheinlich vorhanden ist.

2.5.1.2 Externe Planungsleistung

Für die Machbarkeitsanalyse wurden externe TGA-Planungsbüros beauftragt, eine Planung für den Umbau der Heizsysteme von 5 der Beispielgebäude durchzuführen. Die Auswahl der Planungsbüros erfolgte über eine beschränkte Ausschreibung mit vorheriger Anfrage an verschiedene Planungsbüros. Das Planungsbüro IG Essen erstellte die Planung für die Beispielgebäude 1 – 3 (Mönchengladbach, Essen, Hannover) und das Planungsbüro Solares Bauen (Freiburg) für die Beispielgebäude 4 und 5 (Schönebeck und Potsdam). Die beiden beauftragten Planungsbüros haben bereits einige Erfahrung mit der Planung von Wärmepumpen für Bestands-Mehrfamilienhäuser.

Die Aufgabenstellung für die Planung enthielt folgende Inhalte:

- Konzepterstellung für den Umbau der Bestandsheizung auf R290-Wärmepumpen mit Variantenbetrachtungen
- Die Planungsleistung bis zu den Leistungsphasen Vorentwurf und Teilen der Entwurfsplanung nach HOAI
- Die Behandlung von Raumheizung und Warmwasser können konzeptabhängig erfolgen
- Abstimmungen und Rücksprache mit den Gebäudeeigentümern. Vorstellung des Planungsergebnisses und Diskussion.

Freigestellt, also nicht von uns vorgegeben wurden folgende Aspekte des Planungskonzeptes:

- Die Art des Systems (zentral/dezentral) für die Raumheizung und Trinkwarmwassererwärmung
- Die Wahl der Wärmequelle(n)
- Die Betriebsweise der Wärmepumpe (monovalent, monoenergetisch, bivalent), die Wahl eventuell erforderlicher zweiter Wärmeerzeuger
- Der Aufstellort der Wärmepumpe im Gebäude oder außerhalb des Gebäudes
- Das Sicherheitskonzept für R290
- Die etwaige Weiterverwendung bestehender Heizungskomponenten und Heizkörper
- Wirtschaftlichkeitsaspekte
- Etwaige Kombinationen mit Photovoltaikanlagen

Den Planungsbüros wurden als Planungsgrundlage folgende Unterlagen zur Verfügung gestellt:

- Anschrift, Katasterplan
- Grundrisse, Schnitte, Ansichten: 1:100 oder 1:50, Pläne im pdf-Format; keine CAD-Dateien.

¹ Königsdorff, R.; Vesper, S. (2008): GEO-Hand light. Berechnung der Auslegung von Erdwärmesonden für Heiz- und Kühlzwecke. Hochschule Biberach, University of Applied Sciences, Institute of Building & Energy Systems, Germany.

- Gebäudesteckbriefe mit Eckdaten der Gebäude, Flächenangaben, Informationen über die installierten Wärmeerzeuger, Speicher und Wärmeverteilung, Heizlast, U-Werte der Hüllfläche, Grundstücksinformationen
- Energieausweis
- Raumweise, wohnungsweise und gebäudeweise Heizlastberechnung nach DIN 12831
- Erfassung der installierten Nominal-Heizleistung der Heizkörper, Bewertung für verschiedene Vorlauftemperaturen
- Abschätzung der Wärmequellenverfügbarkeit für verschiedene Quellen
- Strangschemata der bestehenden Heizungsinstallationen (wo verfügbar)
- Fotodokumentation (teilweise)
- Fiktive Produktliste mit Propan-Wärmepumpen in verschiedenen Leitungsklassen

Die Qualität der Unterlagen entspricht der uns vorliegenden Datenbasis. So wurden beispielsweise die Grundrisse, die wir von der Wohnungswirtschaft zur Verfügung gestellt bekamen, nicht vor Ort mit der aktuellen Raumaufteilung verglichen.

Die Planung der Beispielgebäude 1, 2 und 3 wurde vom Planungsbüro IG Essen (Essen) durchgeführt. Die Beispielgebäude 4 und 5 untersuchte Solares Bauen (Freiburg). Die Planungsergebnisse wurden anschließend den Partnern der Wohnungswirtschaft zur Verfügung gestellt.

2.5.2 Ergebnisse

2.5.2.1 Voruntersuchungen

Ein zentrales Ziel des Projekts ist es, praktische Anwendungsbeispiele für Propan-basierte Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern zu erarbeiten. Um die Übertragbarkeit der untersuchten Lösungen zu beurteilen, wurde der Gebäudebestand der teilnehmenden Wohnungsbaufirmen aus dem Industriebeirat mit dem gesamten deutschen Gebäudebestand verglichen, mit dem Ziel festzustellen, inwieweit dieser repräsentativ ist oder ob atypische Merkmale das Ergebnis beeinflussen. Im folgenden Abschnitt wird ein Vergleich der statistisch erfassten Variablen durchgeführt. Hierfür konnten umfangreiche Daten aus den Gebäudebeständen von 3 der 5 teilnehmenden Wohnungsbaufirmen aus dem Industriebeirat herangezogen werden.

Statistische Einordnung des LCR290 Gebäudeportfolios

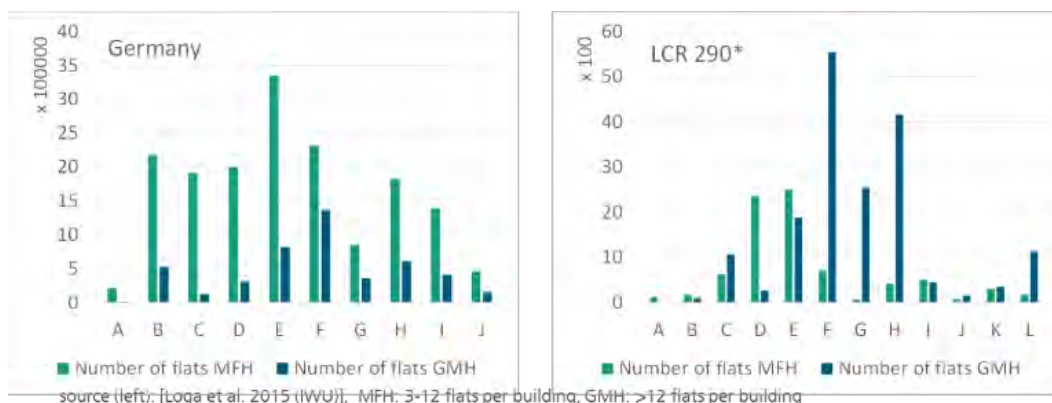


Abbildung 106: Häufigkeitsverteilung der Gebäude nach Baualtersklasse für den gesamten deutschen Gebäudebestand (links) und für das Gebäudeportfolio der Firmen aus dem Industriebeirat (rechts)

Was die Häufigkeitsverteilung der Gebäude nach Baualtersklassen betrifft, unterscheiden sich die Gebäude der Firmen aus dem Industriebeirat vom nationalen Durchschnitt in folgenden Merkmalen: „mittelgroße Mehrfamilienhäuser“ (3 bis 12 Wohneinheiten) kommen seltener vor. Des Weiteren sind im Vergleich zum Durchschnitt eine höhere Anzahl in älteren Baualtersklassen zu finden. Während im nationalen Durchschnitt

Gebäude der Klassen E und F (1958–1978) am häufigsten vorkommen, sind es bei den der Firmen aus dem Industriebeirat die Altersklassen D und E (1949–1968).

Bei großen Mehrfamilienhäusern (GMH, mehr als 12 Wohneinheiten) entspricht die Verteilung stärker dem nationalen Durchschnitt: Das Maximum liegt in der Altersklasse F (1969–1978), mit einer zusätzlichen Konzentration in der Klasse H (1984–1994) im betrachteten Bestand. Somit sind insbesondere die großen Mehrfamilienhäuser ähnlich wie im nationalen Durchschnitt vertreten.

Die Verteilung der Heizsysteme unterscheidet sich je nach Technologie: Während in beiden Fällen etwa die

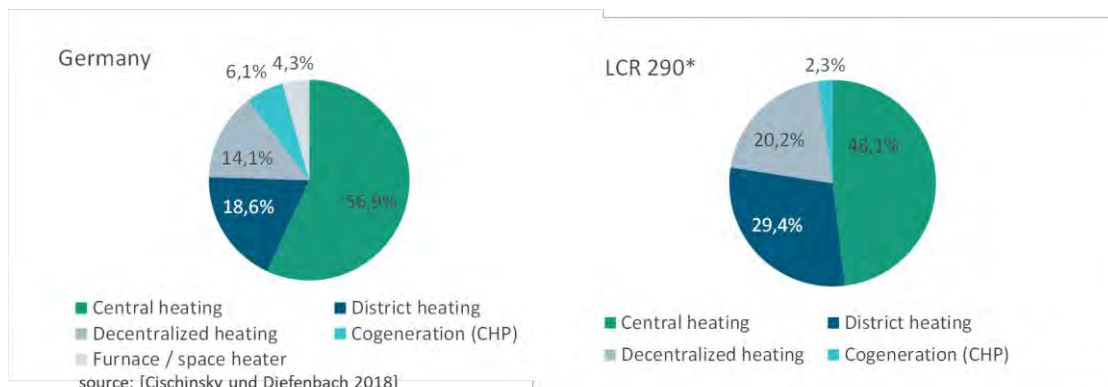


Abbildung 107: Vergleich des Heizsystems im deutschen Gebäudebestand (links) mit dem Gebäudeportfolio der der Firmen aus dem Industriebeirat (rechts)

Hälfte der Gebäude über eine Zentralheizung versorgt wird, ist der Anteil der Gebäude, die mit Fernwärme versorgt werden, im LCR290-Portfolio mit fast 30 % höher als im nationalen Durchschnitt. Gleichzeitig ist auch der Anteil von Gasetagenheizungen höher, während es fast keine Einzelöfen pro Raum gibt. Die im Vergleich zum Durchschnitt leicht verschobene Verteilung ist jedoch unter Berücksichtigung der Betreiber plausibel: Der Gebäudebestand von Wohnungsunternehmen befindet sich typischerweise in städtischen, dicht besiedelten Gebieten, die häufiger mit Fernwärme versorgt werden. In dieser Hinsicht lässt sich hier ein typisches und erwartetes Muster beobachten.

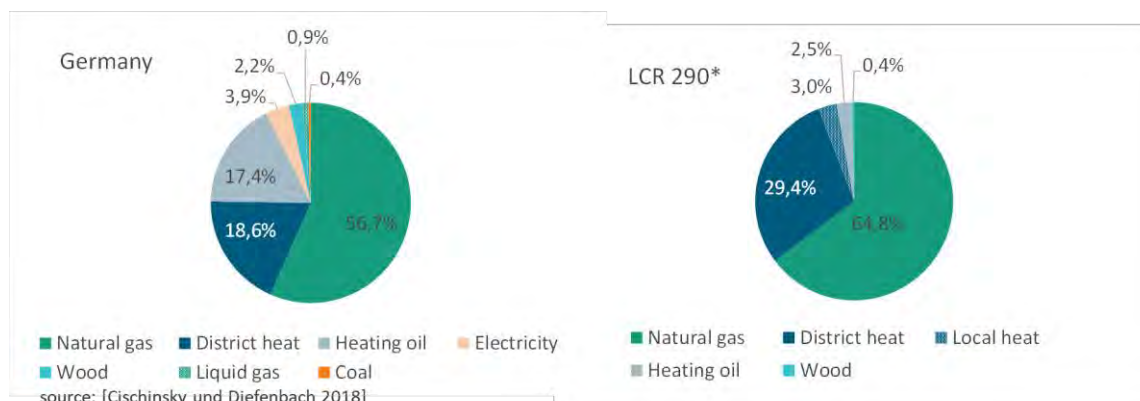


Abbildung 108: Vergleich des Endenergieträgers in MFH in Deutschland (links) und für das Gebäudeportfolio der Wohnungsunternehmen des Industriebeirats (rechts)

Auch bei den Energieträgern sind Unterschiede zu sehen: Auch hier ist der Anteil von Wärmenetzen signifikant höher. Heizöl hingegen wird mit 2,5 % im Vergleich zu 17,4 % seltener genutzt.

2.5.2.2 Beispielgebäude Gebäudebeschreibungen

In den folgenden Kapiteln werden die Beispielgebäude kurz vorgestellt.

Beispielgebäude 1: Mönchengladbach, Eickener Straße 369 - 375

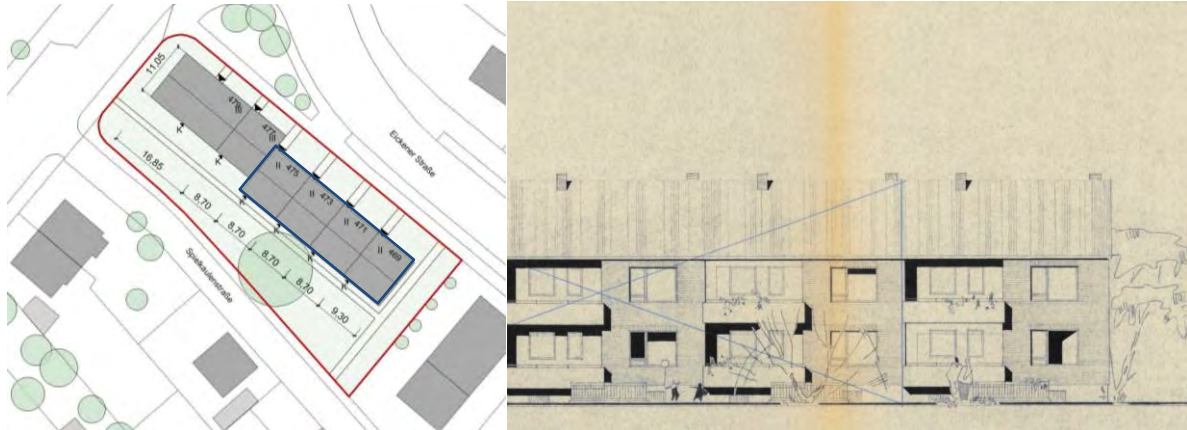


Abbildung 109: Lageplan und Straßenansicht. Quelle: Eigene Darstellung / Ansicht Originalplan

Das Wohngebäude Eickener Straße 469 – 475 ist ein Zeilenbau aus dem Jahr 1962. In dem zweigeschossigen Gebäude befinden sich 8 Wohnungen auf insgesamt 517 m² Wohnfläche. Das Gebäude ist als Einspänner mit einer reihenhaus-ähnlichen Struktur organisiert, bei der vier Treppenhäuser je eine 63,5 m² große Wohnung pro Geschoss erschließen. Das Satteldach ist nicht ausgebaut, im Untergeschoss befinden sich große Mieterkeller und Waschküchen. Raumreserven für die Installation neuer Technikkomponenten sind somit innerhalb der Gebäudehülle vorhanden. Ein weiterer, dreigeschossiger Gebäudeteil schließt direkt daran an, wird hier aber nicht näher betrachtet. Der Großteil des Grundstücks ist unversiegelt und von einer Rasenfläche bedeckt. Die Umgebung ist locker mit Wohn- und Gewerbebauten bebaut. Als Wärmeerzeuger und für Raumheizung und Trinkwarmwasser (TWW) sind Gasetagenheizungen eingebaut. 6 der Gasetagenheizungen befinden sich im Keller unter den Wohnungen, zwei innerhalb der Wohnungen (Küche oder Bad), wobei in einer dieser Wohnungen die Wärmeerzeugung für die Raumwärme und TWW getrennt voneinander in 2 Geräten erfolgt.

Durch die Installation des Großteils der Wärmeerzeuger im Kellergeschoss ist der erste Schritt zu einer Zentralisierung der Anlage bereits geleistet. Die Herausforderung der Schaffung einer neuen Leitungsinfrastruktur entfällt somit trotz der dezentralen Heizungen größtenteils.

Tabelle 20: Kenndaten Beispielgebäude Eickener Straße

Energieverbrauch gem. Energieausweis	95 kWh/m ² a (Bedarf)
Norm-Heizlast nach DIN 12831	19,6 kW, spezifisch: 37,9 W/m ²
Wärmeerzeuger Heizung	Gasetagenheizung, je 21 kW (Angabe GWSG)
Warmwasserbereitung	Über Gasetagenheizung
Gebäude energetisch saniert	Ja, 2013
U-Werte Außenbauteile [W/m ² K]	Dach: 0,15; Wände: 0,18; Kellerdecke: 0,31; Fenster: 0,8

Abbildung 110 zeigt die Nennleistung der installierten Heizkörper (HK) für verschiedene Vorlauf-/Rücklauftemperaturen. Jeder Punkt stellt einen Raum mit der aufsummierten Leistung sich darin befindlichen Heizkörper dar. Auf der x-Achse ist die HK-Leistung angetragen, auf der y-Achse die Raumheizlast des

entsprechenden Raumes. Anhand des Diagramms lässt ablesen, ob die eingebauten Heizkörper NT-ready sind, oder ob gegebenenfalls ein Teil der HK im Zuge des WP-Einbaus ausgetauscht werden sollten, um geringere Vorlauftemperaturen bereitstellen zu können. Für sehr heiße VL/RL von 90/70 °C sind die Werte rot dargestellt, für 75/65 °C orange und für 55/45 °C blau. Alle HK links der Diagonalen sind für die entsprechende Vorlauftemperatur nominal unterdimensioniert. Für das Beispielgebäude in Mönchengladbach gilt das nur für einen knapp unterdimensionierten Heizkörper. Das Gebäude ist für die Absenkung der Vorlauftemperaturen auf 55/45 °C gut geeignet.

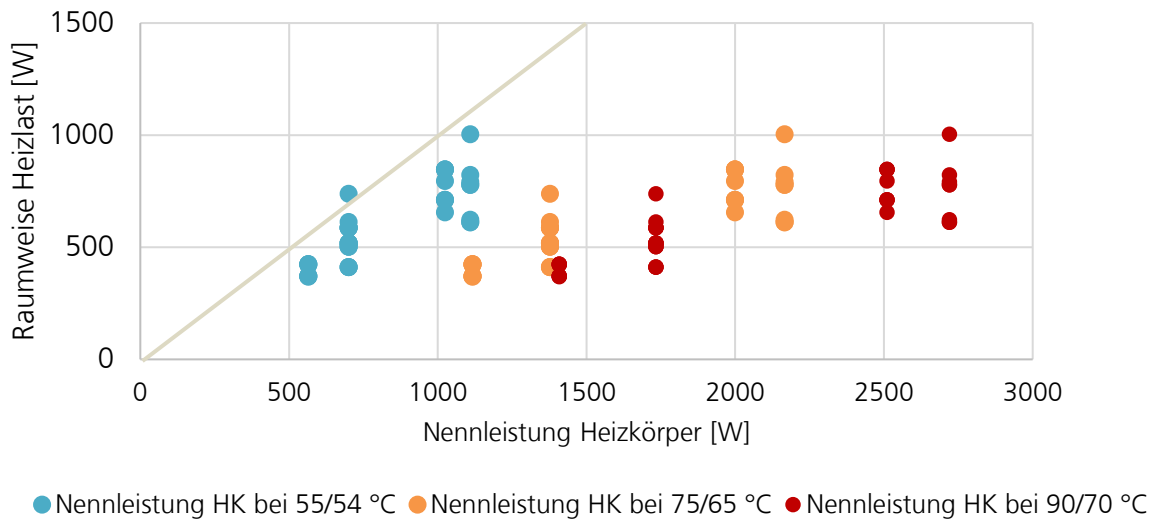


Abbildung 110: Nominalheizlast der Heizkörper bei verschiedenen VL/RL-Temperaturen

Beispielgebäude 2: Essen, Schwanenbuschstraße 141

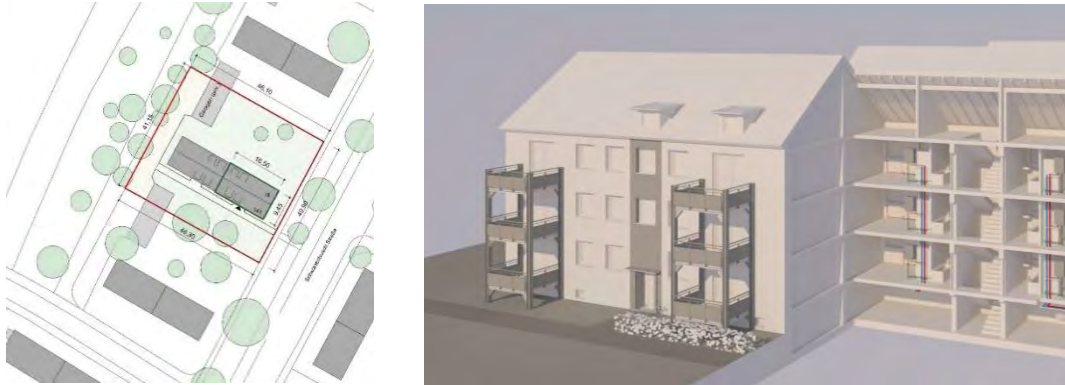


Abbildung 111: Lageplan und Foto Essen, Schwanenbuschstr. 141 Quellen: eigene Darstellung

Die Bebauung aus dem Jahr 1952 steht im Stadtgebiet von Essen. Von 6 nahezu identischen Gebäudezeilen wird hier eine Zeilenhälfte näher betrachtet. Die Gebäude stehen baualtersklassentypisch auf großflächigen Grünflächen und sind orthogonal zur Erschließungsstraße angeordnet. Auf den Freiflächen zwischen den Gebäuden befinden sich zum Teil Garagenhöfe. Die Schwanenbuschstr. 141 enthält 7 Wohnungen auf insgesamt 401 m² Wohnfläche. Die Baukörper sind kompakt, dreigeschossig mit teilausgebautem Satteldach und nachträglich vorgesetzten Balkonen versehen. Die Gebäude sind umfassend energetisch hüllsaniert; das Heizungssystem aus Gasetagenheizungen wurde jedoch in diesem Zuge nicht zentralisiert sondern – untypischerweise - beibehalten. Diese Gas-Brennwertthermen sind innerhalb der Wohnungen in Diele, Küche oder Bad angebracht.

Tabelle 21: Kenndaten Beispielgebäude Schwanenbuschstraße

Energieverbrauch gem. Energieausweis	85,6 kWh/m ² a (Verbrauch)
Norm-Heizlast nach DIN 12831	16,0 kW, spezifisch: 39,9 W/m ²
Wärmeerzeuger Heizung	Gas Brennwertthermen
Warmwasserbereitung	Über die Brennwerttherme
Gebäude energetisch saniert	Ja (Fenster, Wände, Dach)
U-Werte Außenbauteile [W/m ² K]	Dach: 0,25; Wände: 0,24; Kellerdecke: 0,3; Fenster: 1,1

Die Leistung der meisten im Gebäude installierten Heizkörper ist für VL/RL-Temperaturen von 55/45 °C ausreichend groß, siehe Abbildung 112. Die unterdimensionierten HK befinden sich überwiegend in den Badezimmern der Wohnungen. In der Praxis könnte man zunächst ausprobieren, ob der Raum tatsächlich nicht warm genug wird, und erst bei Bedarf die entsprechenden HK tauschen.

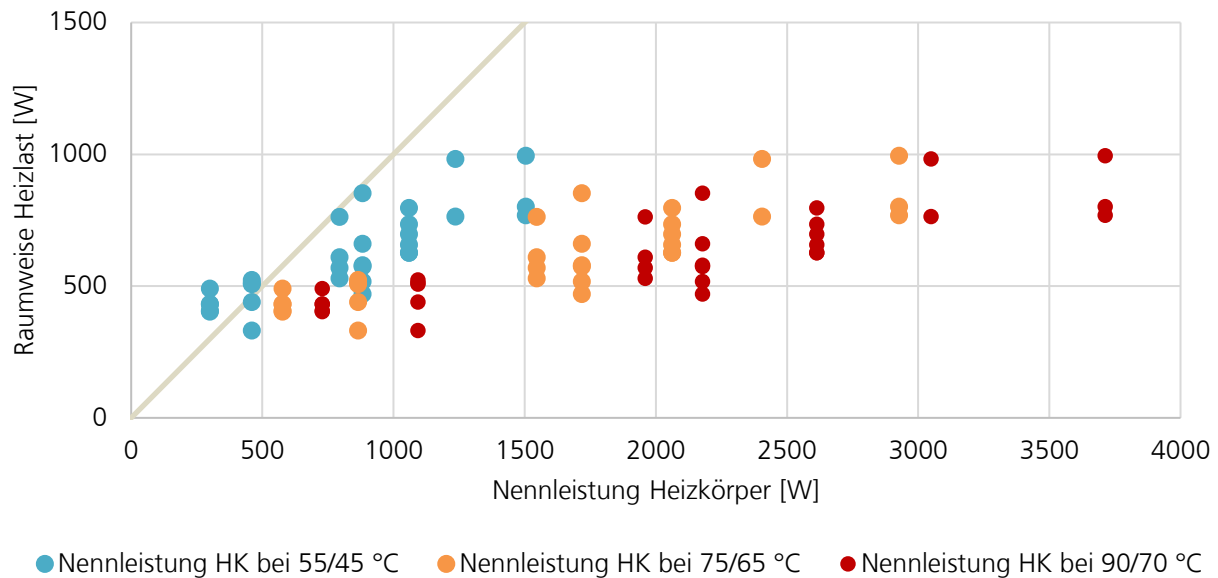


Abbildung 112: Nominalheizlast der Heizkörper bei verschiedenen VL/RL-Temperaturen

Beispielgebäude 3: Hannover Ronnenberg, Löwenberger Straße 1+3

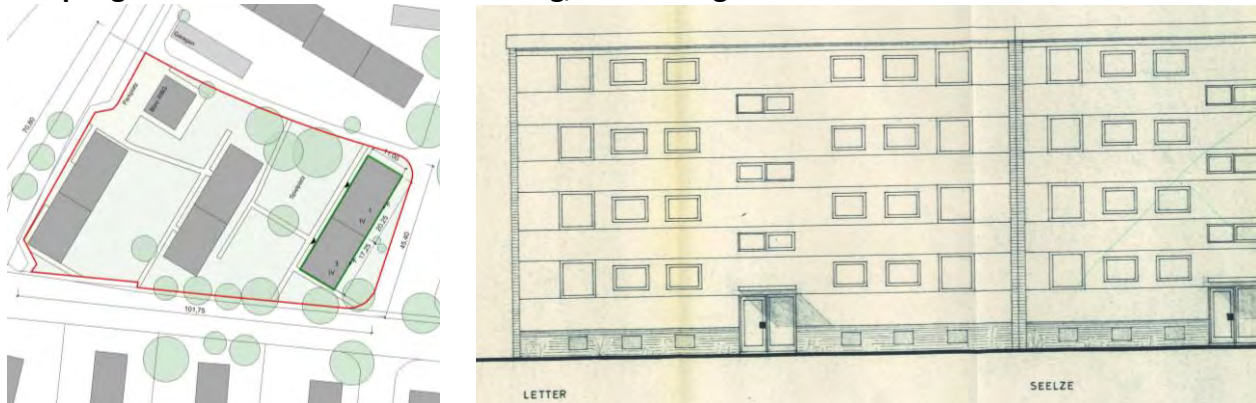


Abbildung 113: Lageplan und Straßenansicht. Quelle: Eigene Darstellung / Ansicht Originalplan

In einem Vorort von Hannover befindet sich diese Bebauung aus dem Jahr 1968. Die schlichte Siedlung aus viergeschossigen Flachdachbauten steht in aufgelockerter Anordnung. Die Hausnummern 1 und 3 bilden zusammen einen Gebäuderiegel und sind energetisch saniert. 16 Wohnungen sind als Zweispänner an je einem Treppenhaus angeordnet und verteilen sich auf 1223 m² Wohnfläche. Die Heizwärme wird durch ein Nahwärmenetz bereitgestellt, welches jedoch stark sanierungsbedürftig ist und darum nicht weiter betrieben werden soll. Für die Warmwasserbereitung sind in den Wohnungen elektrische Durchlauferhitzer installiert.

Tabelle 22: Kenndaten Beispielgebäude Hannover Löwenberger Straße

Energieverbrauch gem. Energieausweis	81 kWh/m²a
Norm-Heizlast nach DIN 12831	38,0 kW, spezifisch: 31,1 W/m²
Wärmeerzeuger Heizung	Wärmenetz
Warmwasserbereitung	Elektro-Durchlauferhitzer
Gebäude energetisch saniert	Ja (Fenster, Wände, Dach)
U-Werte Außenbauteile [W/m²K]	Dach: 0,18; Wände: 0,18; Kellerdecke: 0,4; Fenster: 1,1

Aktuell wird das Gebäude mit einem Wärmenetz mit sehr hohen Vorlauftemperaturen beheizt. Alle Heizkörper sind aber ausreichend groß, um das Heizsystem auf geringere Temperaturen umzustellen, siehe Abbildung 114. In den meisten Räumen sind deutliche Reserven enthalten.

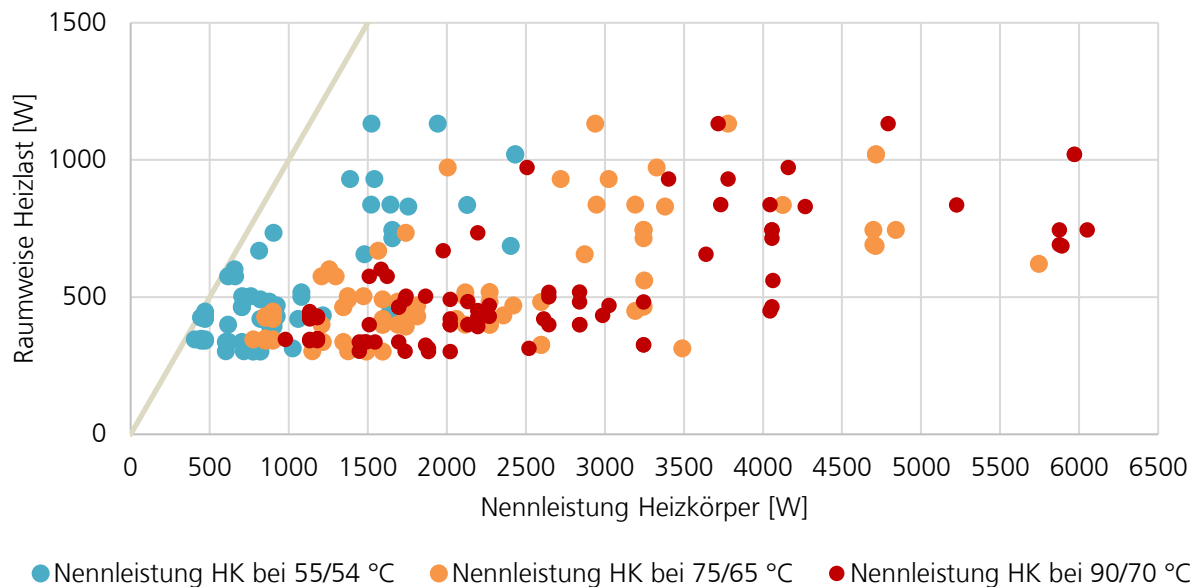


Abbildung 114: Nominalheizlast der Heizkörper bei verschiedenen VL/RL-Temperaturen

Beispielgebäude 4: Potsdam, Großbeerenstraße und Heinrich-von-Kleist Straße



Abbildung 115: Lageplan und Straßenansicht. Quelle: Eigene Darstellung / Ansicht Gebäudeplan

Beim Beispielgebäude in der Großbeerenstraße 64 und der Heinrich-von-Kleist-Straße 23 in Potsdam handelt es sich um ein Gründerzeitbauwerk aus dem Jahre 1915. Es liegt sich in einem dicht bebauten, urbanen Quartier mit drei- bis viergeschossiger Blockrandbebauung. In der Erdgeschosszone befinden sich zwei kleinere Gewerbeflächen (Ladenlokale), die hier als Wohnungen betrachtet werden. Das Eckgebäude umfasst 18 Wohneinheiten mit insgesamt 1.074 m² Wohnfläche und verfügt nur über eine geringe Grundstücksfläche. Das Mansarddach ist vollständig ausgebaut und bewohnt. Das Gebäude steht nicht unter Denkmalschutz, trägt jedoch mit seiner typischen Kubatur, Dachneigung und Fassadengliederung zu einem einheitlichen gründerzeitlichen Straßenbild bei. An der Großbeerenstraße grenzt es direkt an den Gehweg; an der Heinrich-von-Kleist-Straße trennt lediglich ein schmaler Streifen Abstandsgrün das Gebäude vom öffentlichen Raum. Rückseitig befindet sich ein ummauerter Innenhof mit Fahrradhaus, einem Baum und Erschließungsflächen. Das Gebäude ist nicht energetisch hüllsaniert. Trotz der zwei verschiedenen Anschriften verfügt das Gebäude über eine gemeinsame Gas-Zentralheizung, welche sowohl die Wärme für die Raumheizung als auch für die Warmwasserversorgung bereitstellt.

Die Herausforderung für den Umbau auf eine Wärmepumpe liegt an der Kombination aus der großen Heizlast, dichten Umgebungsbebauung und kleinen Grundstücksfläche; wodurch das Aufstellen einer Wärmepumpe im Außenraum erschwert wird.

Tabelle 23: Kenndaten Beispielgebäude Potsdam

Energieverbrauch gem. Energieausweis	172 kWh/m ² a (Verbrauch)
Norm-Heizlast nach DIN 12831	89,2 kW, spezifisch: 83,1 W/m ²
Wärmeerzeuger Heizung	Gaszentralheizung
Warmwasserbereitung	Zentral
Gebäude energetisch saniert	Nein
U-Werte Außenbauteile [W/m ² K]	Dach: 0,25; Wände: 1,45; Kellerdecke: 0,88; Fenster: 2,1

Im Gegensatz zu den hüllsanierten Beispielgebäuden 1-3 lässt sich im Gebäude in Potsdam die Systemtemperatur nicht nennenswert reduzieren. Bei 55/45 °C sind nominell die HK fast aller Räume zu klein dimensioniert. Selbst bei VL/RL-Temperaturen von 75/65 °C gibt es noch einzelne kritische Räume. Diese befinden sich vor allem in den Wohnungen im Dachgeschoss und Erdgeschoss.

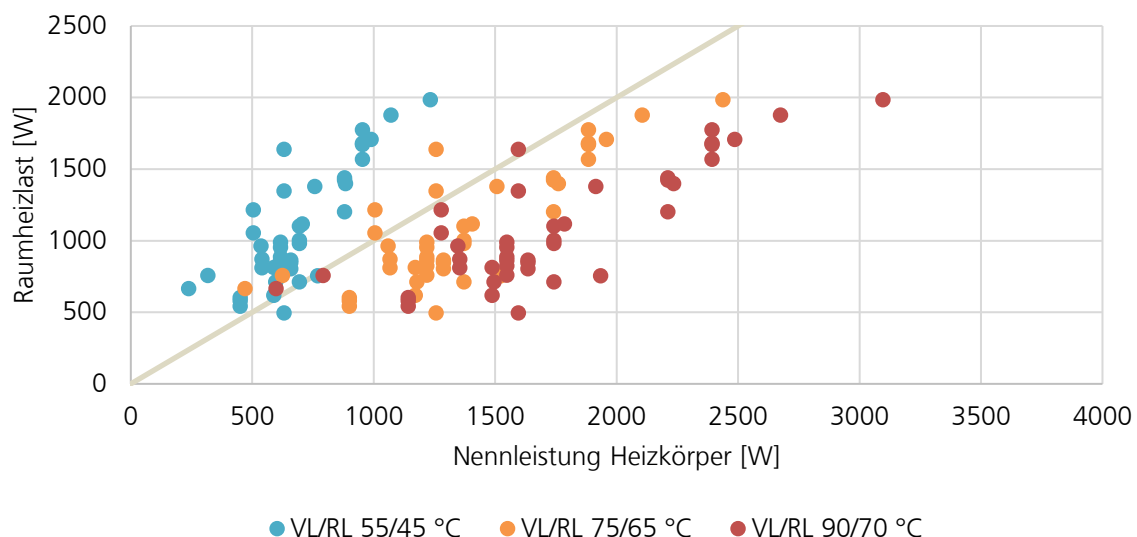


Abbildung 116: Nominalheizlast der Heizkörper bei verschiedenen VL/RL-Temperaturen

Beispielgebäude 5: Schönebeck, Leipziger Straße 26-28



Abbildung 117: Lageplan und Straßenansicht.

Die Wohnbebauung in der Leipziger Straße 26 – 28 in Schönebeck bei Magdeburg enthält 23 Wohnungen, die sich auf drei separat erschlossene Gebäudeteile mit je 3 Geschossen und insgesamt 1090 m² Wohnfläche verteilen. Es handelt sich dabei überwiegend um kleine 2 Zimmer-Wohnungen mit einer durchschnittlichen Wohnfläche von 41 m² und wenige 4-Zimmer-Wohnungen um die 80 m². Im nicht ausgebauten Walmdach befinden sich Mieterverschläge, im Kellergeschoss Lagerräume und Waschküchen. Die Gasetagenheizungen sind in den Küchen installiert. Zu der Blockrandbebauung von 1938 gehört ein großes Grundstück im Hinterhof mit gepflasterten Stellplätzen, einem Spielplatz und privat genutzten Gartenparzellen.

Die Herausforderung bei diesem Gebäude liegt im Umgang mit den Gasetagenheizungen. Das Platzangebot innerhalb der Wohnungen ist sehr begrenzt, darum liefert dieses Beispiel ein gutes Untersuchungsobjekt für den Umgang mit begrenztem Raum.

Tabelle 24: Kenndaten Beispielgebäude Leipziger Straße

Energieverbrauch gem. Energieausweis	134,6 kWh/m ² a (Verbrauch)
Norm-Heizlast nach DIN 12831	72,3 kW, spezifisch: 66,3 W/m ²
Wärmeerzeuger Heizung	Gas-Niedertemperatur-Thermen von 1996
Warmwasserbereitung	Über die Gastherme, mit TWW-Speicher
Gebäude energetisch saniert	nein
U-Werte Außenbauteile [W/m ² K]	Dach: 1,28; Wände: 1,1; Kellerdecke: 0,82; Fenster: 1,5

Auch das Gebäude in Schönebeck ist hinsichtlich der Bestands-Heizkörper nicht für die Absenkung der Vorlauftemperaturen auf 55/45 °C geeignet, da in einem Großteil der Räume dann der HK bei Normaußentemperatur unterdimensioniert wäre, siehe Abbildung 118.

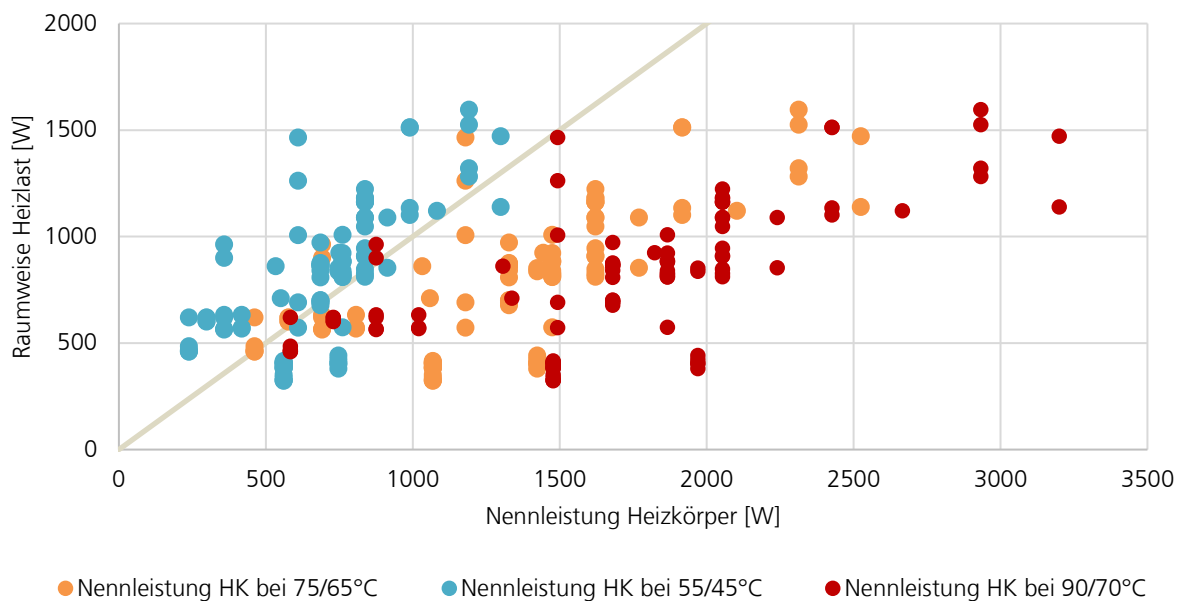


Abbildung 118: Nominalheizlast der Heizkörper bei verschiedenen VL/RL-Temperaturen

Quellenverfügbarkeit

Um eine Übersicht über die typischen Varianten der Quellerschließung zu bekommen, wurde für jedes der Beipielgebäude eine Abschätzung gemacht. Betrachtet wurde ausschließlich die Deckung des gesamten Wärmebedarfs bis zum Bivalenzpunkt durch eine alleinige Wärmequelle. Die Möglichkeit der Nutzung verschiedener Quellen als Mehrquellensystem wurde in diesem Zuge nicht analysiert, um die Komplexität und die Anzahl der möglichen Varianten einzugrenzen. Auch die Auswirkung der Nutzung einer kleiner dimensionierten Wärmepumpe in einem bivalenten System mit einem zweiten Wärmeerzeuger wurde nicht tiefer beleuchtet. Ein weiterer Erkenntnisgewinn durch diese Betrachtung wäre für die Analyse der Quellenverfügbarkeit nicht gegeben.

In Tabelle 25 sind die Ergebnisse der Wärmequellenverfügbarkeit für die verschiedenen Beipielgebäude zusammengefasst. Grün markierte Felder bedeuten eine ausreichende Verfügbarkeit der Wärmequelle auf dem Grundstück, um damit genügend Umweltwärme für die Wärmepumpe bereitstellen zu können. Die genutzten Methoden und Parameter sind in 2.5.1.1 beschrieben. Stehen auf einem Grundstück mehrere Wohngebäude, so wird nur mit dem entsprechenden Flächenanteil für das betrachtete Wohngebäude gerechnet. Dunkelrot markierte Felder bedeuten, dass die Wärmequelle für dieses Gebäude nicht verfügbar ist, z.B. weil die nutzbare Freifläche zu klein für die benötigte Anzahl von Erdwärmesonden ist. Ein hellrotes Feld bedeutet, dass die Quelle zwar theoretisch ausreichend verfügbar ist, aber andere Einschränkungen die Nutzung verhindern, das träfe beispielsweise für eine Grundwassernutzung im Wasserschutzgebiet zu.

Das Gebäude Eickener Straße in Mönchengladbach hat aufgrund des guten Dämmstandards einen im Verhältnis zur Energiebezugsfläche geringen Wärmebedarf und steht auf einem überwiegend unbebauten, großzügigen Grundstück. Die Aufstellung einer Luft-Wasser-Wärmepumpe ist hinsichtlich der Platzverfügbarkeit und des Schallschutzes unbedenklich. Das fensterlose Satteldach in Ost-West-Richtung begünstigt die PVT-Nutzung. Auch die geologischen Bedingungen begünstigen sowohl die Nutzung der oberflächennahen Geothermie als auch die von Grundwasser. Da sich das Grundstück aber in einem Wasserschutzgebiet (Zone IIIA) befindet, ist die Nutzung von Erdwärmesonden und Grundwasser als Wärmequelle üblicherweise nicht gestattet. Für einen konventionellen Flächenkollektor ist die verfügbare Fläche zu klein. Ein kompakt in Form von Körben oder Gräben gestalteter Erdwärmekollektor wäre theoretisch möglich, ist aber vermutlich aufgrund des Wasserschutzgebietes mit Auflagen verbunden, wie einem Verzicht auf Glykol als Soleflüssigkeit. Eine Genehmigung der zuständigen Behörden wäre hier notwendig.

Für das Beispielgebäude 2 in Essen kommen alle hier betrachteten Wärmequellen außer Grundwasser in Frage, da es weder besondere Auflagen noch Einschränkungen aus Gründen der Platzverfügbarkeit gibt. Das Beispielgebäude 3 in Hannover befindet sich in einem reinen Wohngebiet, was mit strengeren Grenzwerten des Schallschutzes einhergeht. Aufgrund des großzügigen Grundstücks sind dennoch mehrere Orte für die Aufstellung von Luft-Wasser-WP geeignet. Für Erdkollektoren und Ringgrabenkollektoren die nutzbare Grundstücksgröße zu klein. Erdwärmesonden könnten zwar ausreichend Wärme für eine B/W-WP liefern, aufgrund des vorherrschenden Sulfatgesteins herrscht jedoch eine erhöhte Korrosionsgefahr. Hinsichtlich der Nutzung der Umweltwärme birgt das Wohngebäude in Potsdam, Großbeerenstraße, die meisten Herausforderungen. Aufgrund des zum einen sehr kleinen und zum anderen überwiegend genutzten und versiegelten Grundstücks ist die Nutzung von Erdwärme als alleinige Quelle ausgeschlossen. Die Dachfläche ist zu klein für PVT. Selbst die Aufstellung von A/W-WP stellt sich aufgrund der dichten Bebauung, der großen zu erbringenden Leistung und der damit einhergehenden Gerätegröße und Geräuschbelastung als schwierig dar und muss im Detail geprüft werden. Anhand der angegebenen Schallemissionspegel aus technischen Datenblättern in Frage kommender Produkte wäre bei einer Außenaufstellung im Innenhof eine Schallschutzeinhausung notwendig. Das 5. Beispielgebäude (Schönebeck, Leipziger Straße) kann mit A/W-WP, B/W-WP mit Erdsondennutzung und W/W-WP mit Grundwassernutzung beheizt werden. Da das Gebäude die Längsseiten nach Norden und Süden ausgerichtet hat kann für PVT nur die Südseite sinnvoll verwendet werden, wodurch die Fläche nicht ausreicht. Erdkollektoren und Energiezaun als Wärmequelle scheiden ebenfalls aus.

Tabelle 25: Eignung der Beispielgebäude für die Nutzung verschiedener Wärmequellen. Grün = Eignung, Hellgrün/Hellrot = eingeschränkt geeignet, Rot= keine Eignung

	1 - MGL, Eickener Straße	2 - Essen, Schwanenbuschstraße	3 - Hannover, Löwenberger Straße	4 - Potsdam, Großbeeren / H.v.Kleist Str.	5 - Schönebeck, Leipziger Straße
Außenluft			Reines Wohngebiet > erhöhte Schallschutzanforderung	Aufstellung kritisch aufgrund dichter Bebauung	
PVT auf Dach	Gebäude in Ost-West-Ausrichtung	Gebäude in Ost-West-Ausrichtung	Flachdach	Pseudo-Mansarddach	Nord-Süd-Ausrichtung, nur Süddach angerechnet
Energiezaun	Wasserschutzgebiet				
Erdkollektor					
Erdwärmekorb	Wasserschutzgebiet				
Ringgrabenkollektor	Wasserschutzgebiet				
Erdwärmesonde	Wasserschutzgebiet. 5 Sonden à 90 m	Gute Wärmeleitfähigkeit. 4 Sonden à 85 m	Eingeschränkte Nutzung, Sulfatgestein (Korrosionsgefahr). 8 Sonden à 98 m	Sehr gute Wärmeleitfähigkeit. 20 Sonden à 99 m	16 Sonden à 98 m
Grundwasser	Ausgiebige Vorkommen aber Wasserschutzgebiet	Geringe Grundwasservorkommen, schwach sulfatig	Geringe Grundwasservorkommen	Ausgiebige Vorkommen aber zu kleine Grundstücksfläche	Sehr ergiebige Vorkommen

2.5.2.3 Mögliche Sanierungsvarianten

Im Zuge des Forschungsprojektes wurden Lösungsansätze für die Quellerschließung- und Verteilung für Etagenwärmepumpen erarbeitet. Die Betrachtung der Umsetzung aus baulicher und regulativer Sicht wird hier exemplarisch anhand zweier Beispiele aufgezeigt.

Grundsätzlich wird bei der Untersuchung verschiedener Lösungsansätze von einer zentralen Quelle und der Verteilung durch ein Quellnetz im Gebäude ausgegangen. Eine lokale, wohnungsweise Erschließung (z.B. direkt über die Fassade) wird jedoch ebenfalls evaluiert. In gut 10% der bestehenden Mehrfamilienhäuser in Deutschland erfolgt die Bereitstellung der Wärme für Heizung und Warmwasser mit dezentralen Wärmeerzeugern wie Gasetagenheizungen ¹. In der Praxis ist die Sanierung von Gebäuden mit Gasetagenheizungen von besonders vielen Unsicherheiten geprägt, wie sowohl die bilateralen Gespräche mit den Unternehmen des Industriebeirats als auch die Rückmeldung vieler MessebesucherInnen zeigten. Innerhalb eines dezentral beheizten Mehrfamilienhauses befinden sich häufig Gasthermen unterschiedlichen Baualters und Erhaltungszustands, die sukzessive erneuert wurden. Das Interesse liegt dementsprechend auf der Möglichkeit eines schrittweisen Austauschs der Wärmeerzeuger. So kann entweder im Zuge eines Mietwechsels oder einer Havarie der Bestandsheizung der Heizungstausch vorgenommen werden. Von besonderer Bedeutung ist für die Wohnungsbaugesellschaften, dass aus dem Umbau kein Platzverlust innerhalb der Wohnungen resultieren.

Sollen Etagenheizungen durch Wärmepumpen ersetzt werden, so kommen grundsätzlich unterschiedliche Konzeptvarianten in Frage. Sowohl die Erschließung der Wärmequelle (WQ) als auch die Wärmepumpen (WP) können entweder als zentrale Anlage das gesamte Gebäude oder als dezentrale Anlage einzelne Wohnungen oder Räume versorgen.

Wärmepumpen dezentral mit dezentraler Quellerschließung

Jede Wohnung erhält eine eigene Wärmepumpe als Wärmequelle. Die Außeneinheiten werden an der Fassade oder auf dem Grundstück platziert; Schallschutzrichtlinien und propanbedingte Schutzabstände sind einzuhalten. Der Vorteil ist die zeitlich unabhängige Installation je Wohnung.

Wärmepumpen dezentral mit zentraler Quellerschließung

In jeder Wohnung wird eine Wärmepumpe als Ersatz der Gasetagenheizung installiert, die Wärmequelle wird zentral erschlossen und über ein Quellnetz angebunden. Die Montage ist in bestehenden oder neuen Schächten im Gebäude oder an der Fassade möglich. Durch die zentrale Quellerschließung erweitern sich die Möglichkeiten für die Wärmequellerschließung und EE-Einbindung gegenüber der dezentralen Quellerschließung.

Zentrale Niedertemperatur-Wärmepumpe mit wohnungsweiser Wärmepumpe

Eine zentrale Niedertemperatur-Wärmepumpe speist ein Verteilnetz, die Wohnungen nutzen jeweils eine kleine Wärmepumpe, die diese Niedertemperaturwärme anhebt. Die elektrische Anschlussleistung je Wohnung ist geringer als bei „dezentrale Wärmepumpe – zentrale Wärmequelle“. Ein noch zu untersuchendes Feld liegt dabei in der Hydraulik der Quellleitungen. lässt sich der Betrieb störungsfrei durchführen, wenn zu Beginn nur wenige Wärmepumpen angeschlossen sind? Wie groß ist die Mindestanzahl an angeschlossenen Wärmepumpen?

Einbau einer zentralen Wärmepumpe

¹ Loga, T.; Stein, B.; Diefenbach, N.; Born, R. (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Hg. v. IWU. Darmstadt. Online verfügbar unter https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/episcopo/2015_IWU_LogaEtAl_Deutsche-Wohngeb%C3A4udetypologie.pdf.

Eine zentrale Wärmepumpe versorgt das gesamte Gebäude; das Heiz- und ggf. Trinkwarmwassernetz muss neu erstellt werden. Die Maßnahme erfolgt zeitgleich in allen Wohnungen und eignet sich besonders im Zuge umfassender Sanierungen. Vorteile liegen im geringeren Wartungsaufwand gegenüber dezentralen Lösungen.

Der Fokus der hier vorgestellten Untersuchungen liegt auf wohnungsweisen, dezentralen Wärmepumpen als Ersatz für Etagenheizungen, und eine zentrale Erschließung der Wärmequelle(n). Für die Beispielgebäude werden unterschiedliche Arten der Quellanbindung betrachtet. Eine Prüfung der Machbarkeit einer dezentralen Quellenerschließung erfolgt zudem am Beispielgebäude Leipziger Straße.

Betrachtung Beispielgebäude 1, Mönchengladbach, Eickener Straße

Konzept

Die dezentralen Gasetagenheizungen werden in jeder Wohnung durch Wärmepumpen ersetzt, die sowohl die Raumheizung als auch das Trinkwarmwasser erwärmen. Zur Quellerschließung wird eine Luft-Außeneinheit eingesetzt. Sie arbeitet mit einem Sole-Zwischenkreis, da lange Kältemittelleitungen die zulässigen Volumen-Obergrenzen von Propan überschreiten. Die Außeneinheit wird auf dem Grundstück aufgestellt. Die Einhaltung der notwendigen Abstände nach TA Lärm wurde mit dem Schallrechner des BWP anhand verschiedener Wärmepumpen im vergleichbaren Leistungsbereich überprüft.

Leitungsführung im Gebäude

Die Wärmepumpen in den Wohnungen werden an die Quelleitungen angebunden, welche neu gebaut werden müssen. Um die Leitungsinstallation gering zu halten, sind möglichst kurze Leitungswege anzustreben. In einem der Kellerräume, vermutlich in der ehemaligen Waschküche der Hausnummer 469, werden Umwälzpumpe, Hydraulikeinheit und Pufferspeicher für die Quelleitungen installiert. Von dort aus erfolgt die horizontal im Untergeschoss verlaufende Verteilung in die verschiedenen Häuser, um die einzelnen Wohnungen anzubinden.

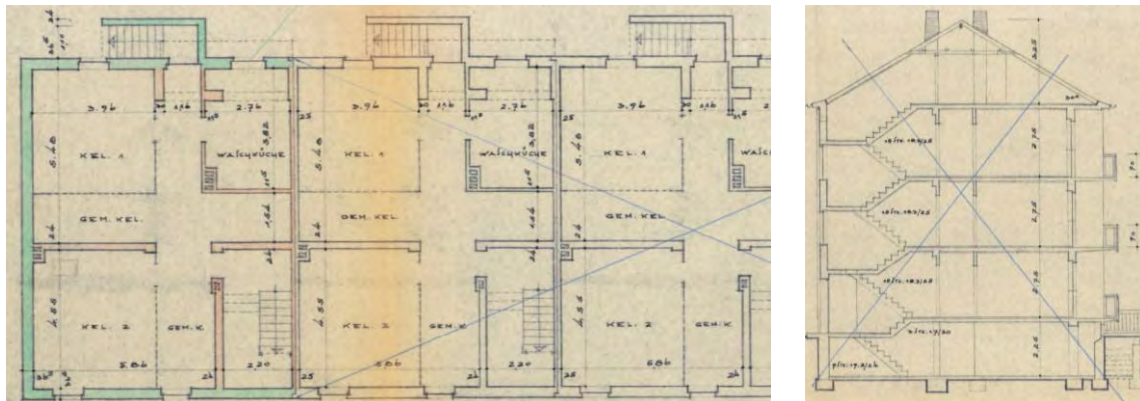


Abbildung 119: Kellergrundriss und Schnitt. Gebäudepläne aus der Bauzeit

Für die vertikale Anbindung gibt es mehrere Möglichkeiten:

Bestehender Steigschacht für die Erschließung, z.B. Schornstein

Sofern es im Gebäude einen bestehenden Schacht gibt, der nicht bereits mit anderen Medien belegt ist, können Sole- oder Heizleitungen dort verlegt werden. Über die Belegung der Schächte in der Eickener Straße liegen keine Informationen vor, so dass die Möglichkeit der Nutzung ungewiss ist. Schornsteine, die nicht mehr in Betrieb sind, sind häufig mit Elektro- oder Telekommunikationskabeln belegt.

Neubau von Steigschacht im Gebäude (in Wohnung oder Treppenhaus)

Der Neubau von Schächten in den Wohnungen stellt eine Beeinträchtigung durch Platzverlust, Lärm- und Schmutzbelastungen dar. Die Alternative ist der Bau eines neuen Schachtes im Treppenhaus. Hierfür müssen keine privaten Räumlichkeiten betreten werden, die notwendigen Fluchtwegbreiten sind jedoch weiterhin zu

gewährleisten. Der Platzbedarf für einen Schacht, mit zwei schwitzwassergedämmten DN75 Soleleitungen inkl. Abzweigungen, ist etwa mit 35*40 cm anzusetzen. Im Treppenhaus der Beispielgebäude ist dieser Platz nicht vorhanden, darum entfällt diese Option.

Leitungsstrang außenseitig an der Fassade, wohnungsweise Durchdringung der Außenwand

Ist die Installation einer vertikalen Verteilung im Gebäude nicht möglich, so können Leitungen auch an der Fassade angebracht oder teilweise in die Fassadendämmung eingelassen werden. Für jeden Gebäudeteil ist ein Leitungspaar (Vorlauf und Rücklauf) erforderlich. Zu beachten ist ein guter Vandalismusschutz in zugänglichen Bereichen. Pro Wohnung werden für die Anbindung Kernlochbohrungen durch die Außenwand gebohrt. In der Praxis wird diese Variante selten gebaut, obwohl sie eine zeitlich gestaffelte Anbindung an jede Wohnung ermöglicht.

Leitungsführung im Gebäude

Die Leitungsführung im Gebäude funktioniert auf die gleiche Weise, wenn anstelle der Quellleitungen Soleleitungen von Niedertemperatur-Wärmepumpen eingebaut werden. Der größte Unterschied liegt in der Art und Stärke der Dämmung der Sole- bzw. Wasserleitungen. Quellleitungen transportieren ein kaltes Medium und müssen darum in den Innenräumen mit Dämmung vor Oberflächenkondensat geschützt werden. Die Leitungen der Niedertemperatur-Wärmepumpe hingegen erhalten in Außenräumen und unbeheizten Bereichen eine Wärmedämmung gegen Temperaturverluste. Hier sind zudem bei langen Leitungswegen Leitungsverluste problematisch.

Regulatorische Anforderungen

Im Folgenden wird das Konzept mit der Anordnung der Quellleitungen an der Fassade hinsichtlich der baulichen und regulatorischen Anforderungen betrachtet.

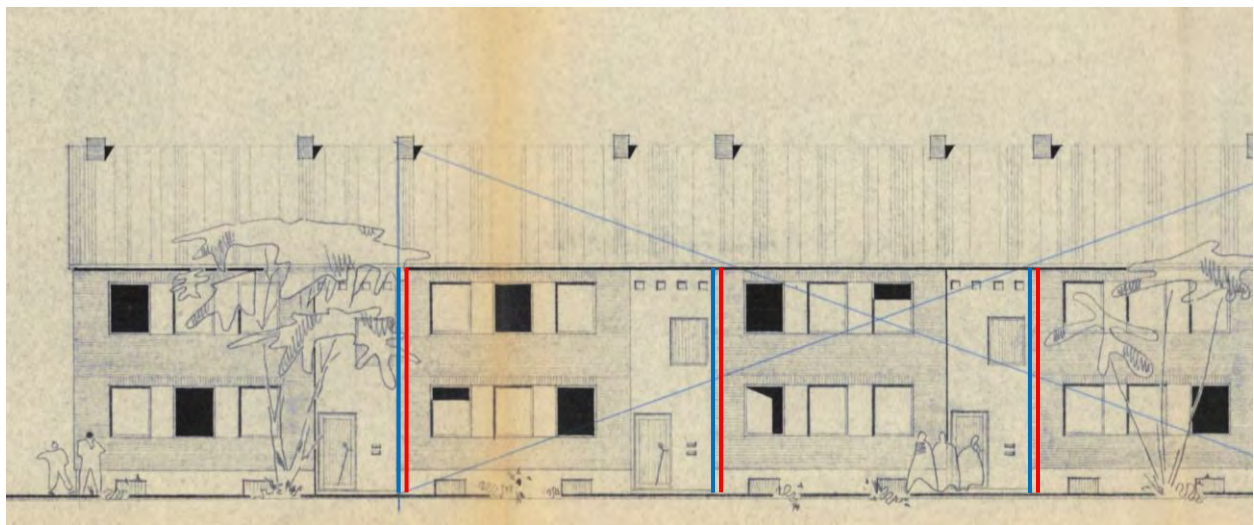


Abbildung 120: Ansicht Eickener Straße mit Leitungsführung an der Fassade. Quelle: Ansicht Originalplan, bearbeitet

Brandschutz

Durchdringen Leitungen raumabschließende Bauteile wie Geschossdecken, Wohnungstrennwände und Treppenhauswände, so stellen mit Brandschutzabschottungen sicher, dass die Durchdringung mindestens dem Feuerwiderstand des Bauteils entspricht. Die einzelnen Gebäudeteile der Eickener Straße 469 – 475 werden der Gebäudeklasse 2 zugeordnet. Als Anforderungen an die Wand- und Deckenschotts gilt hier darum:

- Durchdringung Haustrennwand UG: Abschottung R90, feuerbeständig
- Durchdringung Kellerdecke und Geschossdecke: R30, feuerhemmend
- Durchdringung tragende Wände: R30, feuerhemmend
- Durchdringung von Wänden innerhalb der Wohnung: keine Anforderung

Anbauten an der Fassade, also auch Leitungen inkl. Dämmung, müssen ab Gebäudeklasse 4 schwerentflammbar oder nicht brennbar sein (hier nicht zutreffend).

Die relevanten Regelwerke sind hierbei: Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie MLAR, Pkt. 4; Musterbauordnung MBO, §40, Abs. 1 und §34, Abs. 5; Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen MVV-TB Anhang 4; bzw. die Entsprechungen für NRW; DIN 4102-4, 9, 11 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; DIN EN 13501-2 Klassifizierungen der Brandschutzabschottungen.

Wärmeschutz / Bauphysik

Ein Teil der Quellteilungen befindet sich außerhalb des Gebäudes. Leitungsdämmung ist dort nicht erforderlich (gewünschter Effekt: die ungedämmte Leitung wirkt als Luftkollektor).

Leitungen im Gebäude, die ein warmes oder kaltes Medium (Wasser, Sole, Kältemittel, Luft) führen, müssen gemäß GEG §69, 70, 71 Anlage 8 außenseitig gedämmt werden. Die Mindestdicken der Dämmung liegt in Abhängigkeit vom Leitungsdurchmesser bei mindestens 20mm mit 0,035 W/(m²K). Die Soleleitungen in Innenräumen werden, um Kondensatbildung an der Oberfläche vorzubeugen, mit alukaschierter oder geschlossenzelliger Dämmung gegen Oberflächentauwasser geschützt.

Schallschutz

In der DIN 4109-4, 7 und 10 sind Mindestanforderungen hinsichtlich des Schallschutzes an schutzbedürftige Räume wie Wohn-, Arbeits- und Schlafräume definiert. Bei der Montage der Wärmepumpe an Trennwänden zu schutzbedürftigen Räumen kann es zu unerwünschten Schallübertragungen kommen. Falls möglich, sollte die WP an einer Trennwand zu Nebenräumen oder dem Treppenhaus angebracht werden, um Körperschallübertragungen zu vermeiden. Im vorliegenden Beispiel bietet sich die Küchenwand zum Treppenhaus an. Um eine Schallübertragung zu verringern, werden schallentkoppelte Befestigungsmittel und Schalldämmung in Vorsatzschalen eingesetzt.

In schutzbedürftigen Innenräumen sind tagsüber Grenzwerte von 35 dB(A) und nachts von 25 dB(A) als Immissionsbelastung zulässig, mit kurzzeitigen Überschreitungen bis 10 dB (TA Lärm 6.1, Bundesimmissionsschutzgesetz BImSchG).

Positionierung und Platzbedarf

Zur Vermeidung unnötiger Installationskosten ist die Entfernung zwischen der Wärmequelle, dem Versorgungsschacht und den Wärmepumpen möglichst gering zu wählen. Da in den Quellteilungen kaltes Wasser/Sole transportiert wird, spielen im betrachteten Fall Leitungsverluste eine untergeordnete Rolle. Durch die Anordnung im Außenraum kommt es den Wohnungen zu keinem Platzverlust.

Aufwand Baumaßnahme

Aufzählung der Einzelmaßnahmen: Aufstellung der Außeneinheit inkl. Fundament; Erdarbeiten für den Leitungsgraben in den Keller; Installation von Sole-Pufferspeichern, Hydraulikeinheit und Umwälzpumpe im Keller; Anbringen der Leitungen und Abzweigen mittels Rohrschellen an der Fassade; Schaffen und nachträgliches Abdichten neuer Wanddurchbrüche, Verlegen von Leitungen in der Wohnung bis zur WP, Anbringen von Dämmung und Brandschutzmaßnahmen, Putz- und Malerarbeiten zum Ausbessern.

Die Leitungen an der Fassade lassen sich ohne Zutritt zu den Wohnungen montieren, für die Montage ist eventuell ein Gerüst notwendig. Ein zeitlich gestaffelter Einbau der Wärmepumpen in den Wohnungen ist möglich, sofern die hydraulischen Voraussetzungen dazu gegeben sind. Das Anbringen von Leitungen an der Fassade ist nicht genehmigungspflichtig, da in diesem Falle keine Denkmalschutzauflagen und keine Gestaltungssatzung vorliegen.

Zusammenfassung

Bei Modernisierungen und Umbauten müssen die neu installierten Bauteile und Komponenten immer den aktuellen Baugesetzen und Richtlinien entsprechen. Das dargestellte Konzept ist aus baulicher Sicht ohne große Schwierigkeiten durchführbar. Die Wartung vieler, dezentraler WP ist jedoch aufwändiger als die einer zentralen Anlage, zumal man hier für die Wartung viele verschiedene Wohnungen betreten muss, was im einem erhöhten Koordinationsaufwand resultiert.

Betrachtung Beispielgebäude 5, Schönebeck, Leipziger Straße

Konzept

Am Beispielgebäude Schönebeck wurde gedanklich eine Sanierung mit wohnungsweisen Wärmepumpen mit dezentraler Quellerschließung durchgespielt, um die Herausforderung im Zusammenhang mit R290 aufzuzeigen. Besonders die Anbringung von A/W-Außeneinheiten mit mehr als 150g Propan führt zu Schwierigkeiten, welche diese Option nahezu ausschließen, wie man an Abbildung 121 erkennen kann:



Abbildung 121: Fassade der Leipziger Str. 27 mit Außeneinheiten und propanbedingten Schutzabständen. Bildquelle: GWG Schönebeck, bearbeitet

Außeneinheiten in Wohnungsnähe an der Fassade zwischen oder unter/ über Fenstern

Der Propan-bedingte Schutzabstand von 1 m um die Außeneinheiten kann aufgrund des kleinen Fensterabstands weder an der Nord- noch an der Südfassade eingehalten werden. Da Mehrfamilienhäuser in der Regel viele kleinere Räume mit mindestens einem Fenster pro Raum beinhalten, ist dieses Problem bei den meisten Mehrfamilienhäusern zu erwarten. An den Stirnseiten des Gebäudes befinden sich keine Fenster, dort lassen sich ohne Einschränkungen Geräte installieren. An diese Fassaden grenzen jedoch nur 6 der 23 Wohnungen, für die übrigen bleibt das Problem ungelöst. Abgesehen von diesen technischen Aspekten ist auch aus gestalterischer Sicht das Anbringen zahlreicher Außeneinheiten an der recht harmonisch gestalteten Straßenfassade kritisch zu betrachten. Hinzu kommt die Vielzahl an Geräuschquellen, die sich in unmittelbarer Nähe zu Wohn- und Schlafräumen befänden.

Option Außeneinheiten auf dem Dachboden:

Als ebenfalls unpraktikabel stellt sich die Aufstellung von Wärmepumpen auf dem Dachboden dar. Im Dachraum der Leipziger Straße sind Abstellräume untergebracht, die für die Aufstellung der Wärmepumpe (teilweise) entfallen müssten. Große Zu- und Abluftöffnungen stellen die Belüftung sicher. Die Dichtigkeit gegen eintretende Niederschläge muss dabei gewährleistet werden. Im Falle einer Leckage dürfen keine Propanansammlungen im Gebäude entstehen. Im Umkehrschluss bedeutet das, dass dieselben strengen Sicherheitsanforderungen wie bei einer Innenaufstellung im Keller gelten müssen. Anfallendes Kondensat muss kontrolliert in einen Siphon abgeleitet werden, um den Gaseintritt ins Leitungsnetz zu verhindern. Zudem sind die Leitungswege vom Dachboden die unteren Wohnungen lang und würde zu Leitungsverlusten führen. Auf die Einhaltung der Schallschutzvorgaben ist besonders zu achten, da Holzbalkendecken auf Schwingungen besonders sensibel reagieren.

Das Problem der aufwändigen Leitungsführung ergibt sich auch bei der *Aufstellung auf der Dachhaut*. Zudem muss bei dieser Variante gewährleistet werden, dass kein austretendes Propan in darunter liegende Fenster gelangen kann, was in der Praxis nur schwer zu realisieren sein dürfte.

Möglich ist die *Aufstellung im Außenbereich*, zum Beispiel als Turm oder Reihe mehrerer Anlagen. Die räumliche Nähe zu den einzelnen Wohnungen ist dabei jedoch nicht gegeben. Als Folge ist mit langen Leitungswegen und Leistungsverlusten zu rechnen. Innerhalb des propanbedingten Schutzbereichs sind jegliche Zündquellen verboten. Dies verhindert eine Aufstellung propanführender Geräte auf, vor oder unter Balkonen, da auf diesen geraucht oder gegrillt werden kann.

Grundsätzlich sind auch *Mischvarianten* möglich, bei denen jeweils ein naheliegender, sicher und einfach zu erreichender Aufstellort des Außengeräts gewählt wird. Je nach Lage und Erreichbarkeit der Wohnung erfolgt eine "von-Fall-zu-Fall-Entscheidung", zum Beispiel: Montage an Gebäude-Stirnseiten, Erdgeschossfassaden unterhalb der Fenster und auf dem Dach. Durch die verschiedenen Arten der Aufstellung und Leitungsführung, ist jedoch ein erhöhter Planungs-, Montage- und Wartungsaufwand gegeben.

Zusammenfassung

Der große Vorteil von Lösungen, bei denen in jeder Wohnung eine separate A/W-WP installiert wird, liegt in einem möglichen zeitlich gestaffelten Einbau. Neuere Etagenheizungen könnten noch einige Jahre in den Wohnungen verbleiben, und ältere bereits durch Wärmepumpen ersetzt werden. Insbesondere für Wohnungseigentümergeinschaften (WEG) wäre das ideal. Sowohl die Schallschutz- als auch die R290-bedingten Sicherheitsaspekte sind bei zahlreichen dezentralen Geräten jedoch schwerer in den Griff zu bekommen als bei einer zentralen Lösung.

2.5.3 Extern durchgeführte Planungen

2.5.3.1 Überblick der Planungen

Zwei Planungsbüros führten zwischen Januar und August 2025 fiktive Planungen für den Einbau von Wärmepumpen für fünf der Beispielgebäude durch. Die Anforderungen an die Planung und die bereitgestellten Unterlagen werden in 2.5.1.2 beschrieben. An dieser Stelle wird ein Überblick über die Ergebnisse gezeigt und einige Themen genauer diskutiert. In den Kapiteln 2.5.3.1 sind für jedes der Beispielgebäude die spezifischen Herausforderungen und Besonderheiten vorgestellt – ohne im Detail auf jede Einzelheit der Planung hinzuweisen. Die Angaben und Abbildungen sind ohne Veränderung den Planungsunterlagen der Planungsbüros entnommen.

In Tabelle 26 sind die fünf Beispielgebäude des Gebäudebestands nochmals übersichtlich dargestellt. In den darunter liegenden Spalten sind Kernaspekte der favorisierten Planungsvariante der Planungsbüros aufgeführt. Die nachfolgenden Kapitel heben für die einzelnen Planungen nochmals Besonderheiten und Herausforderungen hervor.

Tabelle 26: Kennzahlen Gebäudebestand und Planungsergebnis

	 1. MGL	 2. Essen	 3. Hannover	 4. Potsdam	 5. Schönebeck
Ist-Zustand					
Baujahr/ Sanierung	1962 / ja	1952 / ja	1968 / ja	1915 / nein	1938 / nein
Gebäudeheizlast	19,6 kW	16,0 kW	38,0 kW	89,2 kW	72,3 kW
Bestehendes Heizsystem	Dezentral (Gas)	Dezentral (Gas)	Wärmenetz	Zentral (Gas)	Dezentral (Gas)
System TWW	Gas Durchlauferhit- zer	Dezentral (Gas)	El. Durchlauferhit- zer	Zentral (Gas)	Dezentral (Gas)
Anzahl Whg	8	7	16	21	23
Planungsergebnisse					
Wärmepumpe (A2/W35 / B10/W65)	8,6 kW	8,6 kW	16,7 kW	50 kW	80 kW (Kaskade 27 + 53)
System TWW	Frischwassersta- tion	Wohnungssta- tion	bestehende Durchlauferhit- zer	Frischwassersta- tion	Frischwassersta- tion
Wärmequelle	Luft	Luft	Luft	Luft	Grundwasser
VL/RL Temp	50/40	55/45	50/40	75/65	65/55
2. Wärmeerzeu- ger	8 kW Heizstab	12 kW Heizstab	12 kW Heizstab	55 kW Gas- Brennwert	-
Pufferspeicher	600 l	750 l	750 l	700 l	530 l
TWW Speicher	750 l	750 l	-	825 l	2x 530 l
PV	-	-	-	10 kWp	29 kWp

Beispielgebäude 1 Mönchengladbach

Aufgrund der bereits gut gedämmten Gebäudehülle, überwiegend ausreichend großer Heizkörper und großzügiger, unbebauter Freiflächen im Außenraum eignet sich das Gebäude gut für den Umbau auf ein Wärmepumpen-Heizsystem. Das Beispielgebäude in Mönchengladbach weist eine Besonderheit hinsichtlich der Anordnung der Gas-Etagenheizungen auf. Zwar hat jede Wohnung einen eigenen Wärmeerzeuger, diese befinden sich jedoch (mit zwei Ausnahmen) im Untergeschoss, da sie bereits im Zuge früherer Sanierungen dorthin verlegt wurden. Ein Teil der Leitungsführung, die für eine Zentralisierung des Heizsystems nötig ist, ist hier also schon erfolgt. Abbildung 122 zeigt die Grundrisse des Kellergeschosses und 1. Obergeschosses mit dem Ist-Zustand der Etagenheizungen.



Abbildung 122: Grundriss Keller und 1. Obergeschoss mit aktuellem Standort der Gas-Etagenheizungen und potenziellem neuen Technikraum (Nr. 269). Quelle: GWSG Mönchengladbach, bearbeitet von IG Essen

Diese Anordnung der Etagenheizungen erleichtert den Aufwand für eine Zentralisierung des aktuell dezentralen Heizsystems deutlich: nur zwei Wohnungen müssen für die Umbaumaßnahme betreten werden, für die übrigen kann der Umschluss im Keller erfolgen. Vorgeschlagen wird darum der Bau einer AWW-WP als zentrale Lösung, mit Pufferspeicher, TWW-Speicher und Frischwasserstation. Die Leitungsführung im Keller muss bis zum Standort der jetzigen Etagenheizungen ergänzt werden. Ein Teil des Kellers der Hausnummer 469 wird für die Installation der Hydraulikeinheit und der Pufferspeicher abgezweigt (siehe Grundriss). Da gemäß überschlägiger Berechnungen das Leitungsvolumen zwischen den jetzigen Etagenheizungen und den Zapfstellen in den Wohnungen 3 l nicht überschritten wird, ist es erlaubt, die TWW-Zirkulationsleitung ausschließlich im Kellergeschoss zu verlegen, wodurch sich die Zirkulationsverluste reduzieren lassen¹. Herausfordernd ist die geringe lichte Raumhöhe von 2 m im Untergeschoss. Maßgeblich für die Auswahl der Pufferspeicher ist darum ein möglichst geringes Kippmaß. Das Anlagenschema soll in Anlehnung an Abbildung 123 erfolgen.

¹ BMJV (2023): Trinkwasserverordnung. TrinkwV. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/trinkwv_2023/index.html, zuletzt geprüft am 15.12.2025

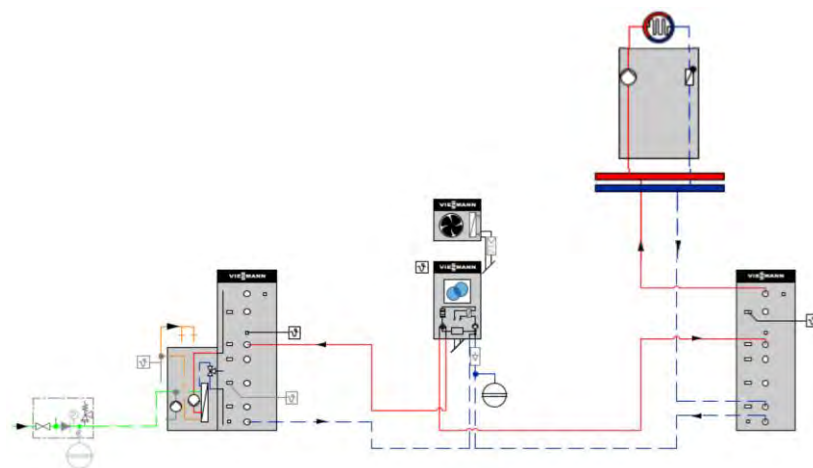


Abbildung 123: Konzeptschema: A/W-WP mit Pufferspeicher, TWW-Speicher und Frischwasserstation. Aus: Erläuterungsbericht IG Essen

Als weitere Variante wird eine Wärmepumpe in Verbindung mit Wohnungsstationen geprüft. Aufgrund der höheren Installations- und Wartungskosten sowie der günstigen Anordnung der Etagenheizungen wird diese Variante aber als weniger geeignet bewertet. Da das Gebäude in der Wasserschutzzone 3A liegt, muss nach Aussage von IG Dornemann auch für eine Luft-Wasser-Wärmepumpe eine Genehmigung für die Aufstellung beantragt werden. Üblicherweise wird dieser stattgegeben; für die Terminplanung der Planungs- und Installationszeit muss dies jedoch berücksichtigt werden.

Beispielgebäude 2 Essen

Auch das Beispielgebäude in der Schwanenbuschstr. 141 in Essen wird aktuell mit Gasetagenheizungen (Brennwertthermen) beheizt, die sich je nach Wohnung in den Dielen oder Badezimmern befinden, siehe Abbildung 124.

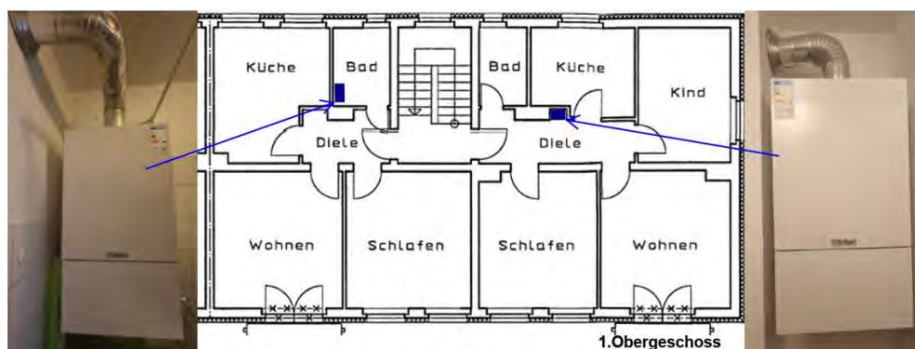


Abbildung 124: Grundriss mit Bestandsthermen. Quelle: Plan IME Essen (bearbeitet), Fotos IG Essen

Das bevorzugte Sanierungskonzept sieht eine zentrale A/W-WP mit 8,6 kW bei A2/W35 bzw. 12,3 kW bei A-7/W35 vor, die im Außenraum des Gebäudes aufgestellt wird. Die notwendigen Schutzabstände von 1 m rund um die Außeneinheit stellen keine besondere Schwierigkeit dar, da ausreichend Abstand zu Gebäuden und Wegen gewahrt werden kann. Aufgrund der bisherigen Versorgung mit Gasetagenheizungen existiert bislang kein zentrales Leitungsnetz für Heizung und TWW im Gebäude. Um nur die Heizleitungen, nicht aber TWW- und Zirkulationsleitungen nachrüsten zu müssen werden Wohnungsstationen vorgeschlagen, die an der Position der bisherigen Etagenheizungen angebracht werden. Begünstigt wird diese Variante durch die Grundrissorganisation in den Wohnungen, bei denen die Bäder und Küchen jeweils direkt nebeneinander liegen und dadurch kurze Leitungswege gewährleisten. Das Leitungsnetz bis zu den neuen Wohnungsstationen wird neu errichtet. Dort erfolgt die Wärmeübergabe an das bisherige Wohnungs-Verteilnetz. Das Konzept

entspricht dem Schema in Abbildung 125. Die Wohnungsstationen werden hydraulisch abgeglichen. Ein hydraulischer Abgleich der Heizkörper und eine Installation einer TWW-Zirkulation wird dadurch nicht benötigt. Außerdem vorteilhaft ist der geringe bauliche Eingriff, da nur eine Vor- und Rücklaufleitung neu installiert werden muss. Als Nachteil werden die aufgrund der sieben wohnungsweisen Geräte höheren Investitions- und Wartungskosten gewertet.

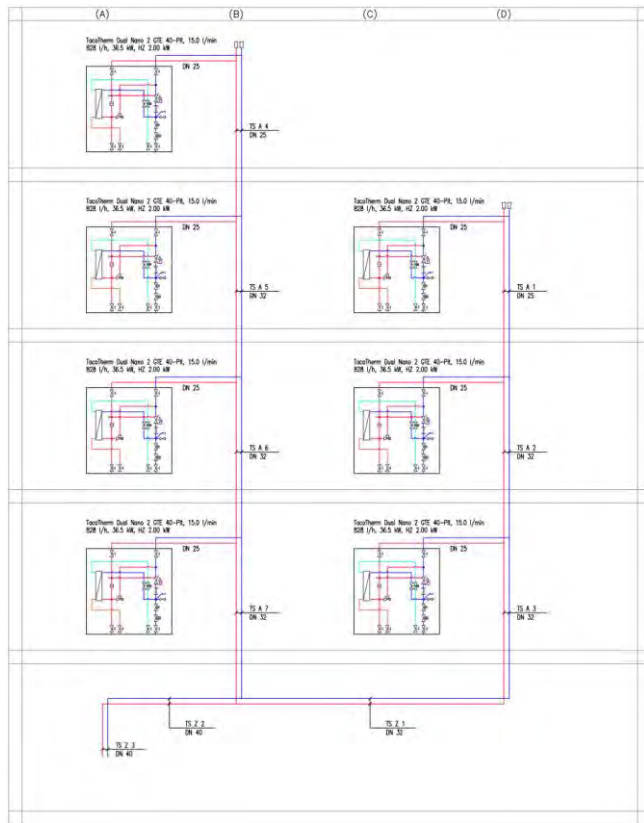


Abbildung 125: Strangschemata Beispielgebäude 2

Vergleicht man die Norm-Heizlast, sowie die Nennleistung der Heizstäbe und die Speichervolumina der Beispielgebäude 1 MGL und 2 Essen, so erkennt man einen "größeren" Heizstab sowie Speicher in Essen trotz der kleineren Norm-Heizlast. Der Grund hierfür liegt nach Aussage der Planerin darin, dass im Zeitraum zwischen der zuerst durchgeführten Planung für das Wohngebäude in Essen und der Planung des Gebäudes in MGL ein Entwicklungssprung in der Anlagentechnik des ausgewählten Herstellers erfolgte. Die neuere Anlagengeneration erlaubt eine kleinere Komponentendimensionierung.

Als weitere Variante wird ein komplett dezentrales WP-System mit A/A-Klimasplitgeräten untersucht. Hierfür gehen die Planenden gedanklich davon aus, dass es marktverfügbare Anlagen mit Propan als Kältemittel gibt. An der Außenwand jeder Wohnung wird eine Außeneinheit montiert, und in den Räumen mit mehr als 10m² Grundfläche die Inneneinheit. Kleinere Räume und Feuchträume erhalten Elektro-Heizkörper als Wärmeerzeuger. Das Konzept sieht elektrische Durchlauferhitzer für die TWW-Erwärmung vor. Die vorhandenen Heizleitungen werden entleert und stillgelegt. Diese Variante birgt sowohl Vor- als auch Nachteile für die Nutzenden. Die Möglichkeit, das System im Sommer für die Raumkühlung zu verwenden, bringt Komfortvorteile mit sich. Zudem kann je nach Bedarf Wohnung für Wohnung umgebaut werden. Nachteilhaft sind die höheren Betriebskosten und der hohe Wartungsaufwand aller einzelner Komponenten.

Beispielgebäude 3 Hannover

Die besondere Herausforderung beim Gebäude in der Löwenbergerstr. 1+3 in Hannover, liegt in der aktuellen Wärmeversorgung über ein Nahwärmenetz. Dieses ist mittlerweile marode, so dass sich die Sanierung nicht mehr rentiert. Genaue technische Daten des Bestandssystems liegen nicht vor – so ist sowohl die Temperaturspreizung des Leitungsnetzes als auch der aktuelle Verbrauch unbekannt. Eine größere Dimensionierung der Hauptleitungen im Keller wird darum angedacht. Da aktuell kein Heizungskeller, sondern nur ein Übergaberaum existiert, muss ein Technikraum neu erstellt werden, und dafür das Untergeschoss räumlich umorganisiert werden. Im Technikraum muss für (je nach Variante) ein bis zwei Pufferspeicher und die hydraulischen Komponenten ausreichend Platz sein.

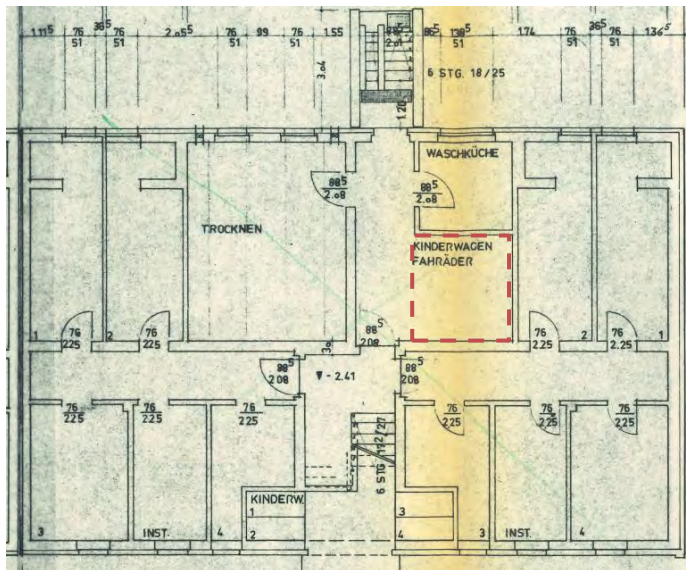


Abbildung 126: Grundriss Kellergeschoss mit möglichem Ort für Heizungsraum

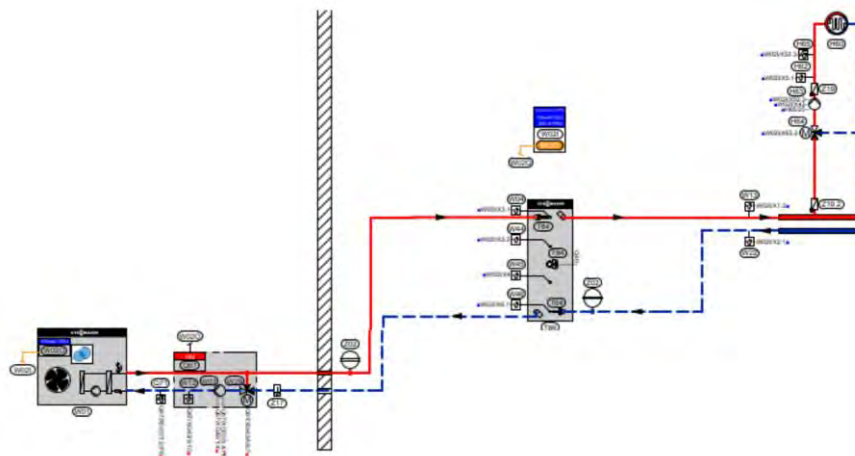


Abbildung 127: Konzeptschema: A/W-WP mit Pufferspeicher und bestehenden el. Durchlauferhitzer. Quelle: Bericht IG Essen

Die beschriebene Sanierungsvariante sieht den Einsatz einer zentralen Luft/Wasser-Wärmepumpe vor. Nach dem Austausch dreier Heizkörper kann das Heizsystem auf ein Temperaturniveau von 50/40 °C abgesenkt

werden. Möglich wird das insbesondere dadurch, dass für die dezentrale Trinkwarmwasserbereitung die vorhandenen elektrischen Durchlauferhitzer (DLE) in den Wohnungen verbleiben. Die Wärmepumpe muss auf diese Weise nicht die hohen Temperaturen bereitstellen, die ansonsten für die Trinkwasserhygiene erforderlich sind. Zudem reduziert diese Variante die Anzahl der einzubauenden Leitungen und somit die Investitionskosten, und verhindert Leitungsverluste im Trinkwassersystem durch Zirkulationsleitungen. Auch vereinfacht diese Variante die Abrechnung, da die Durchlauferhitzer über den Haushaltsstrom der MieterInnen abgerechnet werden. Diese können auf diese Weise jedoch nicht vom Wärmepumpenstromtarif für die Erwärmung des Warmwassers profitieren.

Eine weitere Variante sieht vor, auch die Wärme für die TWW-Versorgung mit der Wärmepumpe bereitzustellen. Hierfür wird ein Speicher mit einer Kaskade aus zwei Frischwasserstationen eingeplant.

Beispielgebäude 4 Potsdam

Die Herausforderungen ergeben sich bei diesem Gebäude aus der großen Gebäudekubatur und Heizlast in Kombination mit einer verhältnismäßig kleinen Grundstücksfläche. Um das Heizverhalten besser zu verstehen, wurden im Februar 2025 für eine Woche Wärmemengenzähler an im Heizungskeller angebracht. Ein Zählerpaar wurde direkt hinter dem Gaskessel und ein Paar am Warmwasserabzweig angebracht. Die gemessenen Daten sind in Abbildung 128 dargestellt. Der Verlauf der Vor- und Rücklauf-Temperatur in rot und blau zeigt eine konstante Spreizung von etwa 12 K und die Nachtabsenkung. Die Vorlauftemperatur schwankt tagsüber zwischen 70°C und 80°C. Die gelbe Linie zeigt den Verlauf der Außentemperatur im gemessenen Zeitraum, die sich zwischen -8°C und 5°C bewegen.

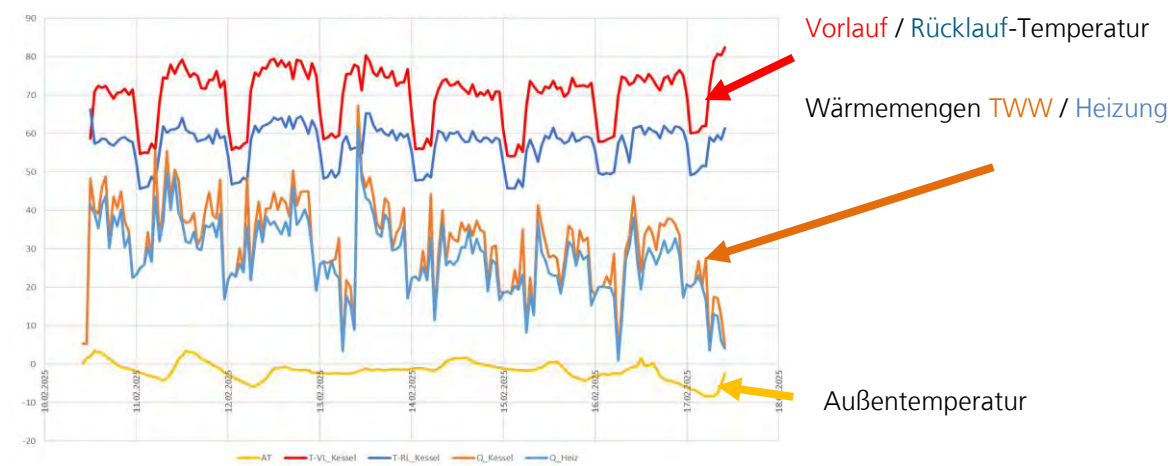


Abbildung 128: Messung Bestandssystem. Quelle: Solares Bauen

Anhand dieser Messung zogen die Planer folgende Schlussfolgerungen:

- Aktuell werden bei -5°C Außentemperatur sehr warme Vorlauftemperaturen von 80°C benötigt
- Bei Temperaturen von 0°C liegt die Leistung bei 45 kW
- Durch die Extrapolation ergibt sich für die Normaußentemperatur von -12°C eine Leistung von 73 kW
- Der schlechte Energiestandard der Fassade und Fenster sowie die Nominalleistung der Heizkörper lassen eine deutliche Reduzierung der Vorlauftemperatur ohne umfangreiche Maßnahmen am Übergabesystem nicht zu. Die marktverfügbaren Wärmepumpen in der benötigten Leistungsklasse können diese hohen Temperaturen jedoch nicht zur Verfügung stellen.

Vorgeschlagen wurde aus dem Grund ein bivalentes System aus einer Luft-Wasser-Wärmepumpe und einem Gaskessel. Sowohl die Wärmepumpe als auch der Gaskessel stellen Wärme für die Heizung und die

Trinkwarmwasserversorgung bereit. Das Ziel ist jedoch der vorrangige Einsatz der Wärmepumpe, und eine Betriebsstrategie, welche den Gaskessel als Spitzenlastkessel zuschaltet. Die Planer empfehlen zudem perspektivisch energetische Optimierungen der Gebäudehülle, und in diesem Zuge eine Überprüfung des Hybridsystems und gegebenenfalls die Abschaltung des Gaskessels. Das Hybridsystem ist hydraulisch so konzipiert, dass die Wärmepumpe ohne weitere Umbauten das Gebäude alleine mit Wärme versorgen könnte.

Da im Innenhof oder das Platzangebot für die Außenaufstellung der Luft-Wasser-WP nicht ausreicht, wird eine Dachaufstellung angedacht. Die Versorgungsleitungen werden vor der Fassade bis in den Heizungskeller geführt. Dort überträgt ein Sole-Wasser-Wärmetauscher die Wärme auf den Heizkreislauf. Das Anlagenschema dieser Variante ist in Abbildung 129 dargestellt.

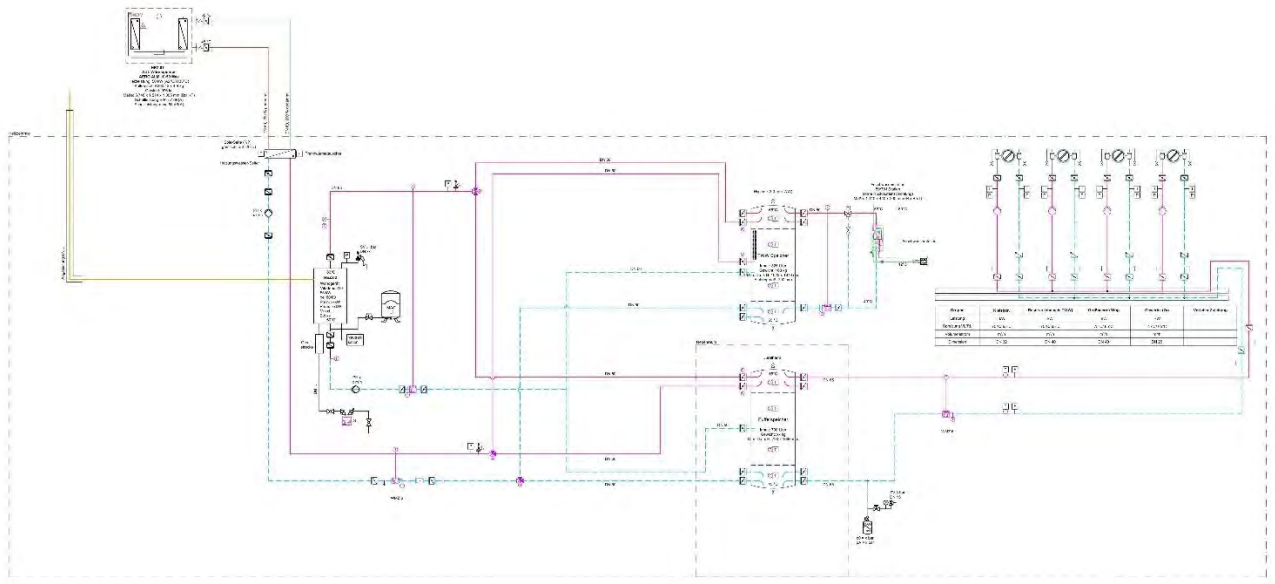


Abbildung 129: Anlagenschema (Vorabzug). Quelle: Solares Bauen

Beispielgebäude 5 Schönebeck

Die Planung für das Beispielgebäude 5 in Schönebeck beinhaltet als einzige eine innen aufgestellte Wärmepumpe mit Grundwasser als Wärmequelle. Die Wahl fiel aufgrund der guten zu erwartenden Effizienzen auf Grundwasser als Wärmequelle. Durch die R290-W/W-WP kann die für dieses Gebäude hohe erforderliche Vorlauftemperatur von 65 °C bereitgestellt werden. Der erforderliche Grundwasser-Volumenstrom beträgt nach überschlägigen Auslegungen ca. 15 m³/h. Wird ein deutlich höheres Potenzial festgestellt, so kann mit der Erschließung der Grundwasserbrunnen zugleich auch das fast baugleiche Nachbargebäude in der Magdeburger Straße versorgt werden. Eine hydrogeologische Sondierung der Wassermenge, -Fließrichtung und -Qualität muss noch erfolgen. Die Marktverfügbarkeit von R290-W/W-WP mit einer großen Leistung und hohen garantierten Vorlauftemperaturen ist bislang begrenzt. Die Recherchen des Planungsbüros ergaben, dass zum Zeitpunkt der Planung nur zwei Hersteller solche Wärmepumpen im Portfolio haben.

Aufgrund der Innenaufstellung der Wärmepumpe in einem geschlossenen Raum sind besondere Maßnahmen erforderlich, die im Falle eines Propanaustritts die Ansammlung von Propan im Gebäude verhindern. Das Sicherheitskonzept sieht ein geschlossenes Gehäuse der Wärmepumpe vor, welches das Gas im Havariefall in den Außenraum ausbläst und so eine Ansammlung von Propan innerhalb des Gebäudes verhindert. Die Ausblasung wird durch eine Gaswarn-Sensorik aktiviert, welche zugleich die Anlage abschaltet. Für diesen Zweck führen eine Zu- und eine Abluftleitung vom WP-Gehäuse bis an eine unbedenkliche Stelle im Außenraum.

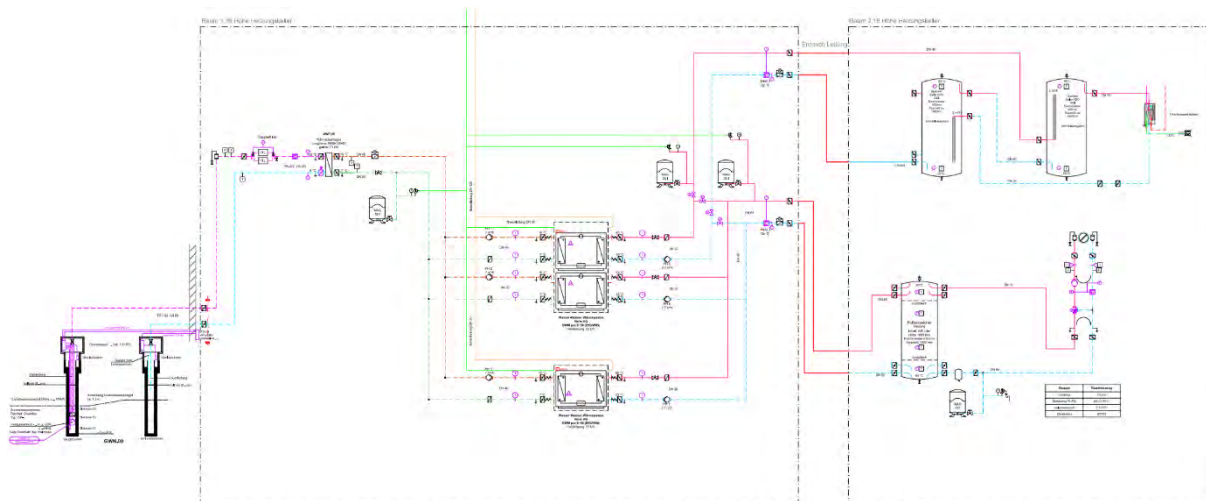


Abbildung 130: Anlagenschema (Vorabzug). Quelle: Solares Bauen.

Umgang mit Trinkwarmwassererwärmung: Hohe bereitzustellende Temperaturen fürs TWW-System reduzieren die Effizienz von Wärmepumpen signifikant. Die DIN1988-200 sieht hier eine einzuhaltende Temperatur von 55 °C im Zirkulationsrücklauf vor, wodurch eine Legionellenvermehrung vermieden werden soll. Um die Trinkwassertemperatur und die Zirkulationsverluste möglichst gering zu halten, werden von den Planern elektronische Zirkulationsventile mit kontinuierlichem Monitoring vorgeschlagen. Deren Verwendung erlaubt gemäß dem aktuellen Entwurf der DVGW551-1 eine Absenkung der Zirkulationstemperatur um 5 K auf dauerhaft 50 °C im Rücklauf. Die Fernüberwachung gilt als VDI/DVGW-konformer Nachweis der Trinkwasserhygiene.

2.5.3.2 Kostenvergleich

Das Diagramm in Abbildung 131 zeigt die Investitionskosten der Kostenberechnungen der in Relation zur jeweils installierten Leistung. Die Kostenermittlungen beider Büros basieren auf Einzelpreisen abgeschlossener Sanierungsprojekte. Sie bildet auf dieser Ebene den vorliegenden Planungsstand ab, der noch keine exakten Leitungslängen etc. berücksichtigt; die Kostenschätzung ist also als überschlägig zu werten. Eventuelle Förderungen sind nicht mit eingerechnet. Der Zeitraum der Erstellung bewegt sich zwischen April 2025 und August 2025. Aufgrund verschiedener Vorgehensweisen der Planungsbüros unterscheiden sich die Berechnungsansätze und sind nur eingeschränkt vergleichbar. Um die Tendenz zu veranschaulichen, werden sie hier dennoch gemeinsam dargestellt. Der türkisblaue Punkt zeigt die Werte der Luft-Wasser-Wärmepumpe aus Mönchengladbach und der lilafarbene aus Essen. Das Projekt in Essen, hier als dunkelblauer Punkt dargestellt, enthält keine Investitionskosten für Trinkwarmwasser, da dort mit der Weiterverwendung der elektrischen Durchlauferhitzer geplant wurde. Orange markiert ist die Grundwasser-Wärmepumpe des Projektes Schönebeck, inklusive Quellerschließung und Bau eines Verteilnetzes (bedingt durch die vorhandenen Gasetagenheizungen im Bestand). Die umfassenden Umbauarbeiten und die aufwändige Quellerschließung zeigen sich in den höheren Investitionskosten der Anlage. Grün markiert ist die Hybridanlage in Potsdam aus 55 kW Gas-Brennwert und 50 kW Luft/Wasser-Wärmepumpe (im Diagramm aufsummiert als 105 kW-Anlage dargestellt). Der Anteil für den Einbau des Gaskessels ist in den Kosten enthalten. Der hellgrüne Punkt zeigt ebenfalls das Projekt in Potsdam, jedoch nur für die Leistung der Wärmepumpe ohne den Gaskessel.

Generell nicht in den Kosten enthalten ist eine eventuelle Erweiterung des Elektro-Hausanschlusses sowie Planungshonorare. Bei den drei kleineren Projekten (türkisblau, dunkelblau, lila dargestellt) sind zudem die Fundament- und Erdarbeiten sowie die Elektrikerkosten (z. B. Zählerumbau) nicht enthalten. Für das Beispielgebäude 5 (Schönebeck) ist noch ein hydrogeologisches Gutachten und gegebenenfalls eine Probebohrung zur chemischen Analyse des Wassers erforderlich. Die tatsächlich zu zahlenden Kosten dürften demnach etwa 10-20 % höher liegen als hier dargestellt.

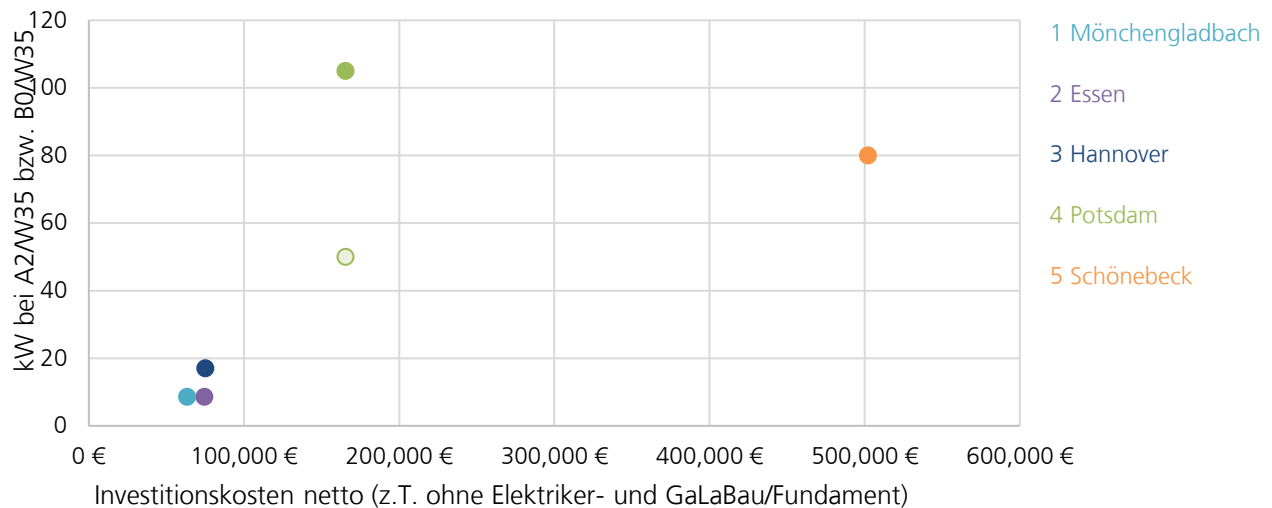


Abbildung 131: Investitionskosten im Verhältnis zur Leistung des neuen Wärmeerzeugers

Die spezifischen Investitionskosten liegen zwischen 1.575 €/kW und 7.368,5 €/kW, mit einem Mittelwert von 5.665 €/kW. Die Hybridanlage in Potsdam (grün / hellgrün) weist sowohl mit als auch ohne Hinzurechnung der Nennleistung des Gaskessels das günstigste Verhältnis zwischen den Kosten und der installierten Leistung auf. Nimmt man das Beispielgebäude in Schönebeck mit der Grundwasser-Wärmepumpe aus, so lässt sich die Tendenz ablesen, dass mit steigender Anlagengröße die spezifischen Investitionskosten pro kW Anlagenleistung tendenziell sinken.

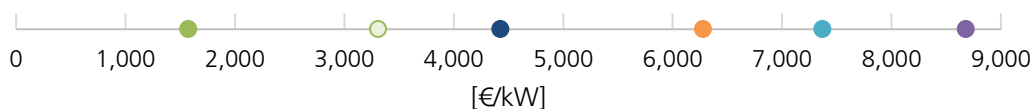


Abbildung 132: Spezifische Investitionskosten in €/kW installierter Leistung bei A2/W35 bzw. B0/W23

Hierbei ist anzumerken, dass die reinen Investitionskosten ohne eine Betrachtung der Betriebs-, Kapital- und Wartungskosten keine Rückschlüsse auf Amortisationszeiten erlauben. Diese sind insbesondere für eine Bewertung von Aspekten wie der Nebenkostenentwicklung für die MieterInnen und die Warmmietenneutralität der Sanierungsmaßnahme wichtig. Beide Planungsbüros stellten Kostenvergleiche der Betriebskosten auf. Da die sehr unterschiedlichen Untersuchungsansätze und die mit einbezogenen Kosten der beiden Planungsbüros jedoch keinen direkten Vergleich der 5 Varianten zulassen, wird das hier nicht weiter diskutiert.

2.5.3.3 Diskussion Ökonomische Aspekte

Um allgemeingültige Aussagen über die Investitionskosten des Einbaus von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern zu treffen ist die Anzahl der Beispielgebäude aufgrund der kleinen Anzahl und Heterogenität nicht als repräsentativ zu betrachten. Zudem handelt es sich nicht um Abrechnungskosten fertiger Projekte, sondern um eine Kostenschätzung. Hier wird aus diesem Grund nur die ablesbare Tendenz diskutiert und eingeordnet.

Die Kostenentwicklung der Investitionskosten in Relation zur Gebäudegröße verhält sich bei Wärmepumpen anders als bei Gasheizungen. Der Hauptgrund hierfür ist, dass mit zunehmender Anlagenleistung in Wärmepumpensystemen sowohl die (maßliche) Größe der Wärmepumpen und die Menge der zu entnehmenden Umweltmenge als auch die Anzahl bzw. das Volumen der Pufferspeicher und somit die

Komplexität des hydraulischen Systems steigen. Zudem steigt die Wahrscheinlichkeit, dass die elektrischen Anschlussleistung des Gebäudes verstärkt werden muss. Der Platzbedarf für die Anlagentechnik und die Quellerschließung vergrößert sich mit der Gebäudegröße, was bei Gasheizungen nicht im selben Maße der Fall ist. In sehr großen Mehrfamilienhäusern reicht der Platz im Heizungskeller, der bisher für eine Gasheizung ausreichte, oft nicht aus, um die neuen Komponenten darin zu installieren. Das Um- oder Neubauen zusätzlicher Technikflächen erfordert oft eine Neuorganisation ehemals privater Abstellflächen, woraus neben den Baukosten auch ein administrativer Aufwand entsteht. Mit wachsender Gebäudegröße können sich also bestimmte Herausforderungen vergrößern. Einige Wärmepumpenhersteller haben dieses Problem erkannt und reagieren darauf mit vorgefertigten Modulen, die alle notwendigen Komponenten enthalten und auf dem Grundstück eines Mehrfamilienhauses platziert werden können.

Umgang mit dezentral beheizten Gebäuden

In allen drei betrachteten Planungsszenarien von dezentral beheizten Beispielgebäuden wurde eine Umstellung der bestehenden dezentralen Wärmeversorgung auf ein zentralisiertes Wärmepumpensystem vorgesehen. Die Zentralisierung Heizsysteme wurde von den Planungsbüros als technisch und wirtschaftlich vorteilhaft eingestuft. Ausschlaggebend hierfür waren die zu erwartenden Einsparungen bei den Investitions- und Betriebskosten, die höhere energetische Effizienz zentraler Systeme sowie die Vereinfachung von Wartungsprozessen. Der zentrale Umbau erfordert jedoch einen erhöhten logistischen und organisatorischen Aufwand, da sämtliche Wohneinheiten betreten und die bestehenden Wärmeverteilungen angepasst werden müssen. Für Gebäude im Eigentum von Wohnungseigentümergeinschaften (WEGs) könnten sich dagegen andere Rahmenbedingungen ergeben. Hier kann ein etappenweiser, zeitlich gestaffelter Umbau einzelner Einheiten als zweckmäßiger angesehen werden, um die unterschiedliche Entscheidungsbereitschaft und finanzielle Situation der Eigentümer zu berücksichtigen. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Zentralisierung in vielen Bestandsgebäuden eine technisch und ökonomisch geeignete Lösung darstellt, während in spezifischen Anwendungsfällen auch dezentrale Ansätze mit wohnungsweisen Wärmepumpensystemen eine tragfähige Alternative bieten. Insbesondere eine Art "Rucksacklösung" mit der Leitungsführung außerhalb des Gebäudes bietet das Potenzial für die schrittweise Sanierung der Wohnungen, bei der ein Teil der Wohneinheiten noch über das Bestandssystem und ein Teil schon mit Wärmepumpen beheizt wird. Vorgestellt wurde ein solches System in der Planungsvariante von 2.5.2.3. Hinsichtlich der genauen Untersuchung der technischen, hydraulischen und regulatorischen Rahmenbedingungen besteht noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Norm-Heizlastberechnung nach DIN 12831

Am Beispielgebäude 5, Potsdam zeigt sich die Diskrepanz, die zwischen der Norm-Heizlastberechnung nach DIN 12831 und der Realität auftreten kann. Die Messung bildet das tatsächliche Verhalten des Heizsystems ab und erfasst das tatsächliche Nutzendenverhalten. Im vorliegenden Fall ergibt sich aus den Messergebnissen eine Heizlast von 73 kW bei Normaußentemperatur. Die Heizlastberechnung nach DIN liegt mit knapp 90 kW deutlich darüber. Dieser Vergleich zeigt auf, dass in der Norm-Heizlastberechnung der Wärmebedarf eines Gebäudes tendenziell zu hoch angegeben wird. Solare und interne Wärmegewinne fließen nicht in die Norm-Heizlastberechnung ein, außerdem übersteigen die in der Berechnung typischerweise angesetzten Lüftungsverluste die realen Verluste. Im Gegensatz zu Heizsystemen mit modulierenden Gas- oder Ölkesseln ist die Überdimensionierung von Wärmepumpen besonders nachteilhaft, da sie zu häufigem Takten führen kann. Als Instrument zur Auslegung von Wärmepumpen eignet sich die Heizlastberechnung nach DIN 12831 darum nur eingeschränkt.

3. Geplante oder erfolgte Veröffentlichungen

Während der Projektlaufzeit entstanden folgende Veröffentlichungen:

Lena Schnabel, Thore Oltersdorf, Hannes Fugmann: "A Proposal of Sustainability Figures illustrating the Status of the European Domestic Heat Pump Market", 26th International Congress of Refrigeration (ICR) – Paris, France, 21.-25.08.2023

Annette Uhl, Bruno Bavia Bampi, Björn Nienborg, Peter Engelmann: "Propan-Wärmepumpen im Bestand – Über die Eignung von Mehrfamilienhäusern für den Umbau auf Propan-Wärmepumpen", nbau 3 (2024) | Heft 4

Björn Nienborg, Bruno Bavia, Annette Uhl, Marek Miara, Peter Engelmann: "Wärmepumpen für bestehende Mehrfamilienhäuser – Multikriterielle Bewertung unterschiedlicher Optionen", DKV-Tagung 2024 – Dresden, Germany, 20.-22.11.2024

Björn Nienborg, Beatrice Rodenbücher, Annette Uhl, Peter Engelmann: "Propane-based Heat Pump Solutions for Existing Multi Family Houses – Requirements and Possible System Solutions", EuroSun 2024 – Limassol, Cyprus, 26.-30.08.2024

Björn Nienborg, Beatrice Rodenbücher, Annette Uhl, Hannes Fugmann, Peter Engelmann: "Outlining the Requirements for Propane-based Heat Pump Solutions for Existing Multi Family Houses", 16th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, College Park, USA, 11.-14.08.2024

Hannes Fugmann, Clemens Dankwerth: "R290 Wärmepumpen Entwicklungen in Europa Technologien und Sicherheitsmaßnahmen, DKV-BV, München Deutschland, 09.12.2024

Timo Methler, Annette Uhl, Björn Nienborg: „Wärmepumpen mit Propan – ein Lösungsweg“, Zeitschrift Die Wohnungswirtschaft, 05/2025

Timo Methler: „Propan als Kältemittel in Mehrfamiliengebäuden – Sicherheitsaspekte und Lösungsansätze“, Berliner Energietage, Berlin, 27.05.2025

Björn Nienborg: „Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern - Erkenntnisse zur Planung und Auslegung“, Berliner Energietage, Berlin, 27.05.2025

Alexandre Schütze (Solares Bauen): „Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern - Erfahrungen aus der Planungspraxis“, Berliner Energietage, Berlin, 27.05.2025

Björn Nienborg: „Wärmepumpenlösungen für den Austausch von fossilen Heizungen im Mehrfamilienhaus -Bestand“ KK Fachtagung (online), 14. Mai 2025

Björn Nienborg, Mu Huang*, Annette Uhl, Bruno Bavia Bampi, Peter Engelmann: "Multi-criteria analysis of different heat pump solutions using natural refrigerant propane for existing multi-family buildings", CLIMA 2025 "Decarbonized, healthy and energy conscious buildings in future climates" – Milan, Italy, 4-6 June 2025

Clemens Dankwerth, Björn Nienborg: "Sicherer Einsatz brennbarer Kältemittel", cciZeitung, 09/2025

Timo Methler: „ Charge optimization of a 30kW propane heat pump“ Atmos Summit, Padua, Italy, 24.-25.11.2025

Mu Huang, Sebastian Gamisch, Ritesh Pathak, Björn Nienborg: „Von der Gas-Etagenheizung zur Propan-Wärmepumpe“, DKV-Tagung 2025, Magdeburg, November 2025

Marcus Heeg, Timo Methler: „Füllmengenoptimierung einer 30kW Propan Wärmepumpe“, DKV-Tagung 2025, Magdeburg, November 2025

Bruno Bavia Bampi , Mert Avci , Jeannette Wapler , Danny Günther , Björn Nienborg: "Investigation of the effect of storage operation in Single-Family Homes with Separate Tanks for Space Heating and DHW", 15th IEA Heat Pump Conference, 26-29 May 2026, Vienna, Austria

Thore Oltersdorf, Timo Methler, Martin Kreutz, Eric Laurenz, Hannes Fugmann, Lena Schnabel: "Indoor R-290 Heat Pump Safety Concepts: Development, Measurement and Evaluation", 15th IEA Heat Pump Conference, 26-29 May 2026, Vienna, Austria

A. Baranwal, J. Esmaelian, T. Oltersdorf, T. Methler, E. Laurenz, B. Palm, L. Schnabel: "Comparison of experimental and simulated investigations for the release of R-290 in indoor heat pumps", 15th IEA Heat Pump Conference, 26-29 May 2026, Vienna, Austria

Björn Nienborg: "Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern: Status Quo, Erfahrungen, Möglichkeiten", Fachforum: Heizungserneuerung mit der Wärmepumpe in Mehrfamilienhäusern, Offenburg am 6. März 2026

Folgende Veröffentlichungen sind noch geplant:

Mu Huang, Sebastian Gamisch, Björn Nienborg: „Techno-economic assessment of retrofitting in-apartment propane heat pump systems in existing German multi-family buildings“, Energy and Buildings

Timo Methler, Hannes Fugmann, Björn Nienborg: „Hürden im Einsatz von wohnungsweisen Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern - vom Gebäude bis zur Komponente“, DKV Tagung, Deutschland 2026

Timo Methler, Marcus Heeg, Hannes Fugmann, Lena Schnabel: “Charge reduction of a 30 kW propane heat pump and efficiency optimization in underfill operation“, Gustav Lorenzen, August 2026, Hamilton, New Zealand