

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

08/05/2026

Projekttitel:

„CLEAR“

Create an additional way to extract information
from a refrigerant circuit

Projektnummer: 914926

Energieforschungsprogramm - Energieforschung 2023

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	Energieforschung 2023
Projektstart	01/10/2024
Projektende	28/02/2026
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	17 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Technische Universität Graz – Institut für Wärmetechnik Technische Universität Graz – Institut für Elektrische Messtechnik und Sensorik
AnsprechpartnerIn	Prof. René Rieberer
Postadresse	Inffledgasse 25/B, 8020 Graz
Telefon	+43 316 873 7302
E-mail	rene.rieberer@tugraz.at
Website	http://www.iwt.tugraz.at

CLEAR

Create an additional way to extract information from a refrigerant circuit

AutorInnen:

Gerhard Pertiller

Dr. Markus Neumayer

Prof. René Rieberer

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	4
1 Einleitung	5
1.1 Motivation für eine Zustandsorientierte Diagnostik bei kleinen und mittelgroßen Kälteanlagen und Wärmepumpen	5
1.2 Aufgabenstellung	8
1.2.1 Helmholtz-Resonanz-Verfahren	8
1.2.2 Akustische Eigengeräusche	8
1.2.3 Ultraschallverfahren	8
1.2.4 Eigenschwingungsverfahren	8
1.3 Schwerpunkte des Projektes	9
2 Prüfstandsbeschreibung	10
2.1 Mockup 1: Wasser/Luft-Prüfstand	10
2.2 Mockup 2: Behälter mit gesättigtem Kältemittel (flüssig/gasförmig)	11
2.3 Mockup 3: Test der Messverfahren unter realen Betriebsbedingungen	11
3 Messtechnische Methodenentwicklung und Analyse	13
3.1 Messdatenerfassung (DAQ)	13
3.2 Messaufbauten und Signalauswertung	14
3.2.1 Auswertung der akustischen Eigengeräusche und des Helmholtz-Resonanz-Verfahrens	14
3.2.2 Auswertung Ultraschallverfahren	15
3.2.3 Auswertung des aktiv angeregten Eigenschwingungsverfahrens	17
4 Bewertung der Messprinzipien	19
4.1 Erkenntnisse mit Mockup 1 & 2	19
4.1.1 Akustische Eigengeräusche und des Helmholtz-Resonanz-Verfahren	19
4.1.2 Ultraschallverfahren	19
4.1.3 Eigenschwingungsverfahren	20
4.2 Erkenntnisse mit Mockup 3	20
4.2.1 Messkampagne	20
4.2.2 Ultraschallverfahren	21
4.2.3 Durch betriebsbedingte Vibrationen passiv angeregtes Eigenschwingungsverfahren	22
4.2.4 Durch Anschlag aktive angeregtes Eigenschwingungsverfahren	22
4.3 Simulation des Sammlergefäßes	23
5 Schlussfolgerungen	24
6 Literaturverzeichnis	25
7 Kontaktdaten	27

1 Einleitung

Das Sondierungsprojekt „CLEAR“ wurde im Energieforschungsprogramm des Klima- und Energiefonds durchgeführt. Das Programm zielt auf sichere, nachhaltige und leistbare Energielösungen entlang der Wertschöpfungskette und verlangt substanzielle Beiträge zur Klimaneutralität; CLEAR adressiert diese Ziele durch Sensortechnik und Auswerteverfahren zur effizienten und sicheren Betriebsführung in Wärmepumpen-/ und Kälteanwendungen. Thematisch liegt CLEAR im Ausschreibungskorridor für Methoden und Technologien, die den effizienten Anlagenbetrieb unterstützen; die Sondierung dient der Risikoreduktion vor einer F&E-Weiterentwicklung.

Natürliche Kältemittel gewinnen durch regulatorische Vorgaben an Bedeutung; zugleich steigen die Anforderungen an Füllmengenüberwachung und Leckageerkennung, insbesondere in kleinen bis mittleren Anlagen, für die bislang praxistaugliche, kostengünstige und nachrüstbare Lösungen fehlen. Hier setzt CLEAR an: Es werden nicht-invasive Mess- und Auswerteverfahren zur Füllstandserfassung in Kältemittelsammlern untersucht. Sowohl die kontinuierliche Erfassung des Flüssigkeitspegels als auch die Erfassung eines Grenzstandes stellen eine Verbesserung des Status quo dar. Die nicht-invasiven Messverfahren werden unter praxisnahen Bedingungen untersucht und validiert, um ein (oder mehrere) robustes Messverfahren für die weiterführende Sensorentwicklung zu identifizieren.

1.1 Motivation für eine Zustandsorientierte Diagnostik bei kleinen und mittelgroßen Kälteanlagen und Wärmepumpen

Zuverlässigkeit und Effizienz von Wärmepumpen und Kälteanlagen sind entscheidend für ihren erfolgreichen Einsatz in zukünftigen Energiesystemen. Ein möglicher Fehler, der das Betriebsverhalten beeinflusst, ist der Verlust von Kältemittel durch Leckagen (Barandier & Cardoso, 2023). Eine unzureichende Kältemittelfüllmenge („Unterfüllung“) kann zu einer Verringerung der Anlagenleistung und -effizienz führen (Pelella et al., 2025). Dies erhöht den Energieverbrauch und führt – abhängig vom Kältemittel – zu direkten und indirekten Umweltwirkungen. Um diesen Problemen präventiv zu begegnen, bewegt sich die Industrie in Richtung zustandsorientierter Überwachung (Condition-Based Maintenance, CBM, Barandier & Cardoso, 2023). Die technische Basis hierfür bilden Systeme zur Fehlererkennung, Diagnose und Bewertung (Fault Detection, Diagnosis, and Evaluation, FDDE). Sie nutzen Messdaten, um Fehler in Echtzeit zu erkennen, zu identifizieren und zu bewerten (Pelella et al., 2025).

Ein verlässliches FDDE-System verwendet ein Basismodell, das den Regelbetrieb basierend auf Eingangsgrößen wie Umgebungstemperatur, „Last“, usw. vorhersagt. Ein Fehler (z. B. Kältemittelleckage, verschmutzter Wärmetauscher usw.) liegt vor, wenn gemessene Größen (Indikatoren) vom durch das Basismodell vorhergesagten Vergleichswert abweichen. Damit beruht die indirekte Fehlererkennung auf dem Prinzip der Abweichungsanalyse (Zhou et al., 2009). Ein Fehler wird nicht an einem absoluten Messwert festgemacht, sondern an einer signifikanten Abweichung eines Indikators von einem erwarteten aus einem Basismodell abgeleiteten Vergleichswert der dem Regelbetrieb entspricht. Ein geeignetes Basismodell könnte durch Versuch am Prüfstand oder in Simulationsmodellen gefunden werden. Es gibt

verschiedene mit dem Kältekreislauf assoziierte Größen die sich als Indikatoren zur Fehlererkennung anbieten würden.

Mögliche Indikatoren für ein FDDE-System lassen sich in drei Gruppen einteilen:

Betriebsbedingungen:

- Beschreibung: Externe, nicht beeinflussbare Faktoren, aus denen sich die Betriebssituation der Anlage ergibt.
- Beispiele: Umgebungs- und Innenlufttemperaturen, Luftfeuchte, Verschmutzung von Wärmetauschern, Nutzereinstellungen.
- Rolle: Haupt-Eingangsgrößen des Basismodells eines FDDE-Systems; Keine Fehlersymptome.

Regelungsindikatoren:

- Beschreibung: Aktive Stellgrößen der Regelung, mit denen die Anlage die geforderte Leistung bereitstellt; sie zeigen die Reaktion des Systems auf verschiedenen Betriebsbedingungen um die definierten Sollwerte zu erreichen.
- Beispiele: Verdichterdrehzahl, Öffnungsgrad des Expansionsventils, Lüfterdrehzahl.
- Rolle: Abweichungen von aus dem Basismodell abgeleiteten Größen (z. B. höhere Verdichterdrehzahl als für eine gegebene Last erwartet) deuten auf einen leistungsreduzierenden Fehler hin (Boahen et al., 2023).

Thermodynamische Zustandsindikatoren:

- Beschreibung: Messdaten, die den resultierenden thermodynamischen Zustand des Kältekreislaufs beschreiben.
- Beispiele: Überhitzung (Abbildung 1-1, Zustandsänderung von Pos 7 nach 1), Unterkühlung (Zustandsänderung von Pos 4 nach 5), Verdampfungs- (p_1) und Verflüssigungsdruck (p_2), Verdichteraustrittstemperatur (t_2).
- Rolle: Klassische Symptome, die die Auswirkungen eines Fehlers sichtbar machen.

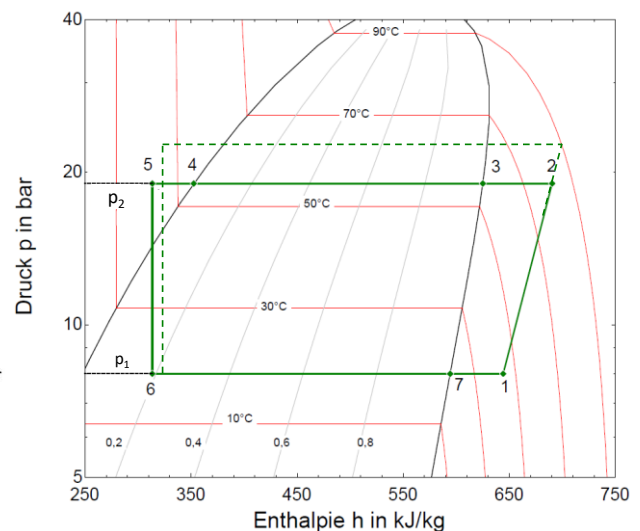
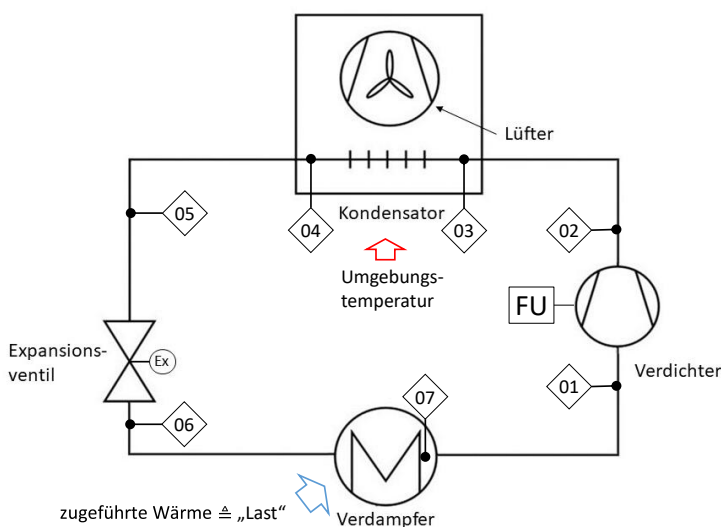


Abbildung 1-1: Einfacher Kältekreislauf bestehend aus Verdichter, Kondensator, Expansionsorgan und Verdampfer (links); $\log(p)/h$ -Diagramm des Kältekreislaufes (R290) bei unterschiedlicher Kondensatorverschmutzung (rechts)

Szenario 1: in einem Kältekreislauf verändert sich der Hochdruck (p_2) bei konstanter Umgebungstemperatur und einem verschmutzten Kondensator, qualitativ von der grün durchgezogenen Linie in Abbildung 1-1 (rechts) hin zur grün strichlierten Linie. Damit wäre der Hochdruck in diesem Kreislauf ein geeigneter thermodynamischer Zustandsindikator für die Verschmutzung des Kondensators.

Szenario 2: In einem Kältekreislauf in dem die Überhitzung (Abbildung 1-1) mittels elektronischem Expansionsventil geregelt wird, verändert sich durch eine fortschreitende Verschmutzung des Verdampfers, die Stellung des Expansionsventils, da dieses reagieren muss, um den vorgegebenen Wert (z.B.: 20 K) zu erreichen. Dabei verändern sich – bei einem ausreichend großen Kondensator und ansonsten konstanten Betriebsbedingungen – die Zustände innerhalb des Kältekreislaufes kaum. Damit wäre die Stellung des Expansionsventils ein geeigneter Regulationsindikator für die Verschmutzung des Verdampfers.

Die Aussage der Indikatoren über mögliche Fehler (z.B.: Verlust von Kältemittel) und wie sich ein Fehler auf die verschiedenen Indikatoren auswirkt hängt unter anderem von der Anlagenkonfiguration ab – insbesondere davon, ob ein Kältemittel-Sammler vorhanden ist oder nicht. In Abbildung 1-2 (rechts) ist das Schema eines Kältekreislaufes mit Hochdrucksammler zu sehen. Abbildung 1-2 (links) zeigt qualitativ das Verhalten des Indikators „Hochdruck“ bei einer theoretischen Variation der Kältemittelfüllmenge im Kältekreislauf. Wenn der Sammler mit flüssigem Kältemittel voll ist, steigt bei weiterer Zugabe von Kältemittel der Hochdruck (Abbildung 1-2, links, Bereich I). Verliert die Anlage Kältemittel stellt sich – solange ein Flüssigkeitsspiegel im Sammler vorliegt – der gleiche Hochdruck ein und es kann keine Veränderung des Indikators (Hochdruck) identifiziert werden (Abbildung 1-2, links, Bereich II). Ab dem Zeitpunkt, wenn kein Flüssigkeitsspiegel im Sammler vorliegt – dieser „leer“ ist – sinkt bei fortschreitender Leckage der Hochdruck (Abbildung 1-2, links, Bereich III), der Kältemittelverlust kann über den Indikator „Hochdruck“ identifiziert werden.

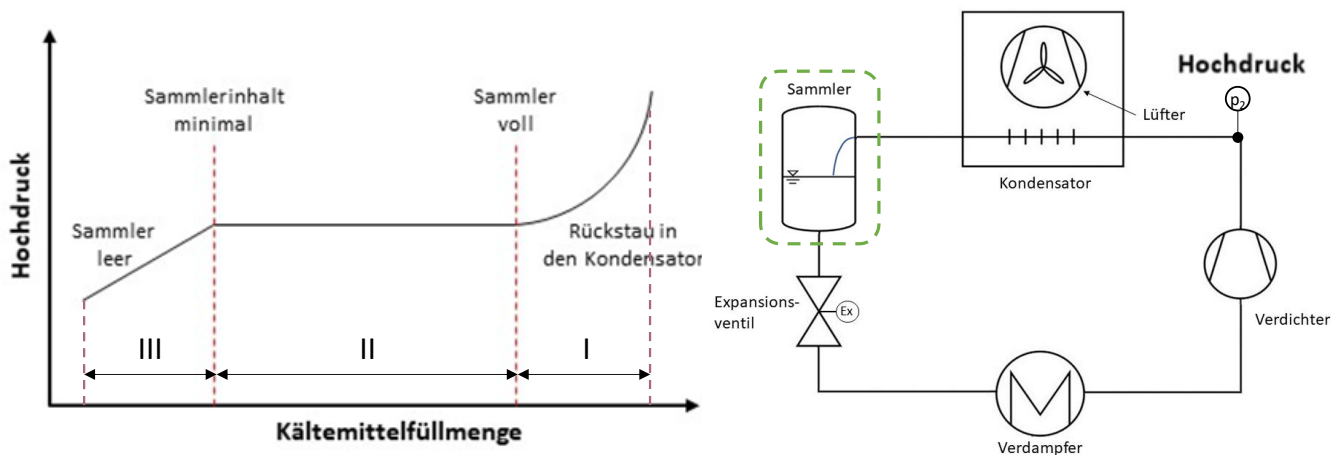


Abbildung 1-2: Druckverlauf des Hochdrucks über der Kältemittelfüllmenge (Links; Webasto, 2000); Exemplarischer Kältekreislauf mit Hochdrucksammler (Rechts)

Der Sammler wirkt als Puffer und „verdeckt“ den Fehler – beispielsweise den Verlust an Kältemittel. Bei einer Leckage „speist“ der Sammler Flüssigkeit nach und kompensiert den Verlust; dadurch bleiben erste Symptome aus. Für eine frühe Leckerkennung, bevor die Anlagenperformance beeinträchtigt ist, wird daher ein vierter Indikatortyp benötigt: ein „Inventarindikator“ der Kältemittelfüllmenge. Ein Füllstandsensorm am Sammler leistet genau dies: Er misst den Flüssigkeitsfüllstand des Kältemittels im Sammler direkt.

Eine Abweichung des Füllstandes gegenüber dem Basismodell ist ein klares Frühwarnsignal für eine Leckage (Mtibaa et al., 2023).

Zur Vollständigkeit sei angemerkt, dass bei Anlagen ohne Sammler jeder Kältemittelverlust zu einer Veränderung des Kreislaufes und damit zu einer Abweichung zwischen einem aus dem Basismodell abgeleiteten Wert und der Messung führt, die Bereiche I und III aus Abbildung 1-2 gehen direkt ineinander über. Der Indikator Hochdruck kann, für Anlagen ohne Sammler, als Anzeichen zur Fehlererkennung genutzt werden können.

1.2 Aufgabenstellung

Ziel war die Identifikation und Validierung eines nicht-invasiven, kostengünstigen Messverfahrens zur Bestimmung des Sammlerfüllstands, dass sich für den Betrieb in realen Kältekreisen eignet und im besten Fall als Nachrüstlösung umsetzbar ist. Die Validierung umfasst den Aufbau von Prüfständen und Versuche im realen R290-Kältekreis, inklusive Betrachtung relevanter Quereinflüsse (z. B. Druck, Montage, Schwingungen). Im Laufe der Sondierung wurden die im folgenden vorgestellten Messverfahren untersucht.

1.2.1 Helmholtz-Resonanz-Verfahren

Bei diesem Verfahren wird ein Messmikrofon an einem Einlass des Sammlergefäßes genutzt, um die durch einen Luftstrom an einer zweiten Öffnung des Sammlers erzeugt Geräusche, zu erfassen. Aus den aufgenommenen Mikrofongeräuschen soll auf den Füllstand rückgeschlossen werden.

1.2.2 Akustische Eigengeräusche

Dieses Verfahren ist dem Helmholtz-Resonanz-Verfahren ähnlich, allerdings wird keine erzwungene Gasströmung verwendet. Stattdessen werden ausschließlich die natürlichen Betriebsgeräusche des Sammlers analysiert. Das Verfahren stellt somit ein passives Verfahren dar, da keine aktive Anregung eingesetzt wird.

1.2.3 Ultraschallverfahren

Hierbei werden Ultraschall-Transducer an der Sammleraußenseite montiert. In den Untersuchungen wurde sowohl die Fähigkeit zur kontinuierlichen Füllstandsmessung als Grenzstandsschalter evaluiert. Dafür wurden Experimente mit unterschiedlichen Anregungen und Auswertungen durchgeführt.

1.2.4 Eigenschwingungsverfahren

Hierbei werden Schwingungen des Sammlergefäßes durch Beschleunigungssensoren am Sammlergefäß erfasst. Die Schwingungssignale können durch eine geeignete Signalverarbeitung einen Rückschluss auf den Füllstand im Sammler ermöglichen. Dieses Verfahren wird in weiterer Folge noch durch die Art der Anregung unterschieden. Bei der „passiven“ Anregung werden die Schwingungen des Systems (z. B. Verdichter, Ventilator, Kältemittelmassenstrom etc. (Abbildung 1-3 links) genutzt, um einen Rückschluss auf den Füllstand zu ermöglichen (Klebig, 2024). Bei der „aktiven“ Anregung wird das System mit einem Impuls gezielt angeregt und das nachfolgende Schwingungsverhalten analysiert (vgl. Eder 2025,

Abbildung 1-3, rechts) dabei ist wichtig, dass trotz unterschiedlicher Quereffekte, wie betriebsbedingten Schwingungen, ein zuverlässiger füllstandsabhängiger Zusammenhang gefunden werden kann.

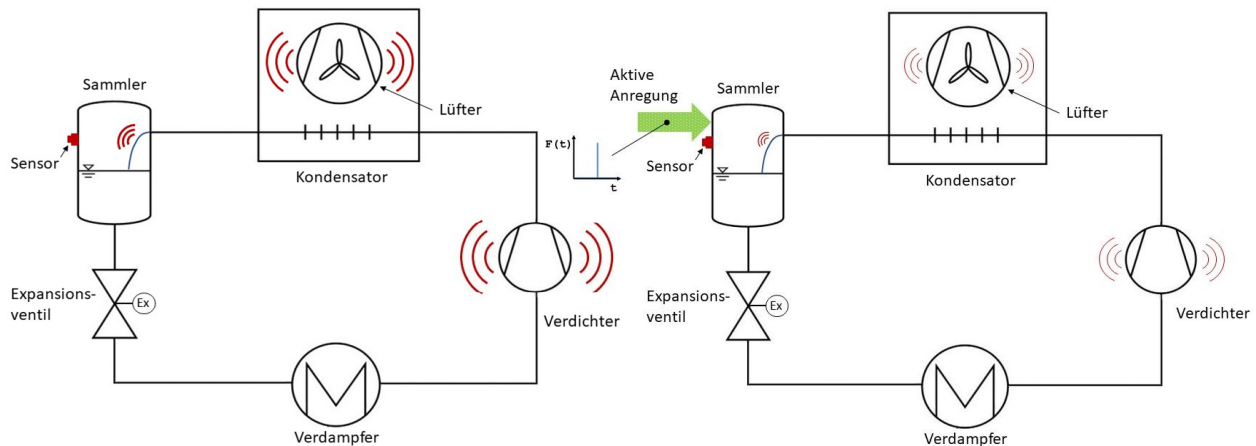


Abbildung 1-3: Schema des Kältekreislaufs mit betriebsbedingten Anregungsquellen (links) und mit aktiver Anregung (rechts) (Donà, 2026)

1.3 Schwerpunkte des Projektes

Schwerpunkte der Untersuchung war es, das grundsätzliche Potenzial unterschiedlicher Messprinzipien zu bewerten und jene Verfahren zu identifizieren, die unter den gegebenen Randbedingungen eine robuste, kostengünstige und im besten Fall nachrüstbare Füllstandserfassung ermöglichen. Dafür wurden – dem Projektantrag folgend – die unter 1.2 beschriebenen Messprinzipien auf unterschiedlichen Prüfständen evaluiert. Die Ergebnisse wurden hinsichtlich messtechnischer Kriterien wie Rückführbarkeit, Signalqualität, Kalibrierbarkeit, Messbereich, Querempfindlichkeiten etc. bewertet, um mögliche Verfahren sowohl zur kontinuierlichen Füllstandsmessung als auch zur Grenzstandserkennung zu identifizieren. Um die gefundenen Erkenntnisse zu stützen wurde eine simulationsbasierte Modalanalysen des Sammlers (mit/ohne Sensoreinfluss) inklusive Modenzuordnung zur Messung durchgeführt.

2 Prüfstandsbeschreibung

Der Aufbau und Betrieb Versuchsstände (nachfolgend als „Mockups“ bezeichnet) war ein wesentlicher Teil des Projekts. Erste Experimente wurden an einem Sammlergefäß mit Wasser und Luft durchgeführt (Mockup 1). An Mockup 2 wurde bereits ein typisches Sammlergefäß für kleine Kompressionskältekreisläufe sowie ein natürliches Kältemittel (R290, Propan) für die Untersuchungen verwendet. Der finale Mockup 3 beinhaltet schlussendlich einen vollständigen Kompressionskältekreislauf zur Untersuchung der Verfahren im Realbetrieb. Alle Mockups wurden darüber hinaus mit geeigneter Referenzmesstechnik ausgestattet. Für jedes der ausgewählten Messprinzipien wurden Testaufbauten auf Basis von Laborequipment realisiert, Experimente definiert und durchgeführt sowie geeignete Signalauswertungsmethoden für die Messdaten entwickelt. Detaillierte methodische und experimentelle Inhalte sind in den Masterarbeiten Eder (2025) und Donà (2026) zu finden.

2.1 Mockup 1: Wasser/Luft-Prüfstand

Abbildung 2-1 zeigt den aufgebauten Versuchsaufbau des Mockups 1, bestehend aus einem stählernen Sammlergefäß (22 Liter), mit dem grundlegende Untersuchungen der identifizierten Messprinzipien durchgeführt wurden. Die Experimente erfolgten mit Wasser und Luft, um unter vereinfachten und gut kontrollierbaren Randbedingungen erste messtechnische Analysen zu ermöglichen.

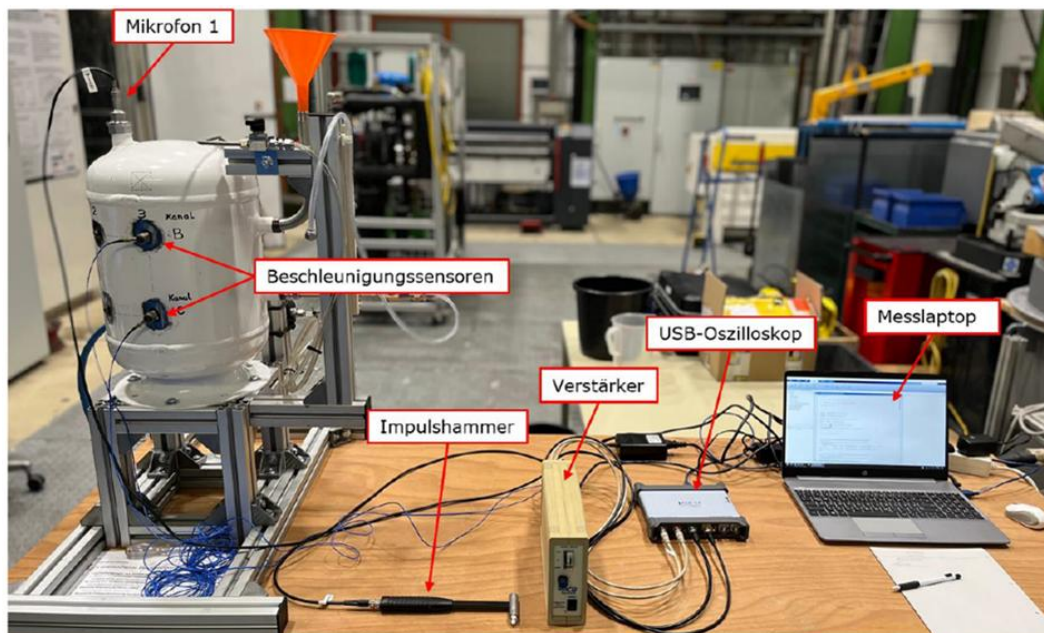


Abbildung 2-1: Versuchsaufbau des Mockups 1 mit stählernem 22 Liter Sammlergefäß für Untersuchungen mit Luft und Wasser. (Eder, 2025)

Der Sammler wurde mit einem transparenten Schlauch ausgestattet, der als Referenzmessung zur visuellen Bestimmung des Wasser-Füllstands diene. Zusätzlich wurde das Sammlergefäß mit den für die Untersuchung der unterschiedlichen Messverfahren erforderlichen Sensoren instrumentiert. Der Mockup 1 wurde genutzt um den in Abschnitt 3 erarbeiteten Workflow zu erproben und zu verbessern. Die Erfassung und Speicherung der Messsignale erfolgte über ein PC-basiertes Messsystem in Kombination

mit einem Laptop. Es ist anzumerken, dass das Sammlergefäß des Mockups 1 oben (gegenüber Atmosphäre) offen ist, d. h. noch nicht Teil eines geschlossenen Kreislaufs ist. Dies erlaubt auch die Untersuchung von Prinzipien, deren Umsetzung in einem geschlossenen Kreis zusätzliche Instrumente (z.B.: Mikrofon) erfordern würde.

2.2 Mockup 2: Behälter mit gesättigtem Kältemittel (flüssig/gasförmig)

Um den Füllstand im Messsammler (0,88 Liter) einstellen zu können, wurde für Mockup 2 (und auch für Mockup 3, vgl. Abbildung 2-3) der Ansatz der kommunizierenden Gefäße umgesetzt. Zu diesem Zweck wurde ein „Reservoirsammler“ (0,88 Liter) auf einer höhenverstellbaren Halterung montiert. Dieser wurde über flexible Kältemittelschläuche an die Ausgleichsleitungen der Gas- und Flüssigphase angeschlossen. Abbildung 2-2 zeigt den Versuchsaufbau von Mockup 2. Zu erkennen ist die Aufhängung des höhenverstellbaren Reservoirsammlers (1, vgl. Abbildung 2-2) und der auf der Waage platzierte Messsammler (2). An Letzterem wurden zwei Beschleunigungsaufnehmer montiert. Die Signalerfassung der Beschleunigungsaufnehmer erfolgte – nach vorhergehender Verstärkung – durch das Oszilloskop (3), welches mit dem Messlaptop (4) über eine USB-Schnittstelle verbunden war. Mockup 2 besaß gegenüber Mockup 1 bereits die typischen Verrohrungen. Dies ist insbesondere für das Eigenschwingungsverfahren relevant, da die Verrohrung eine potenzielle Beeinflussung des Schwingungsverhaltens darstellt.

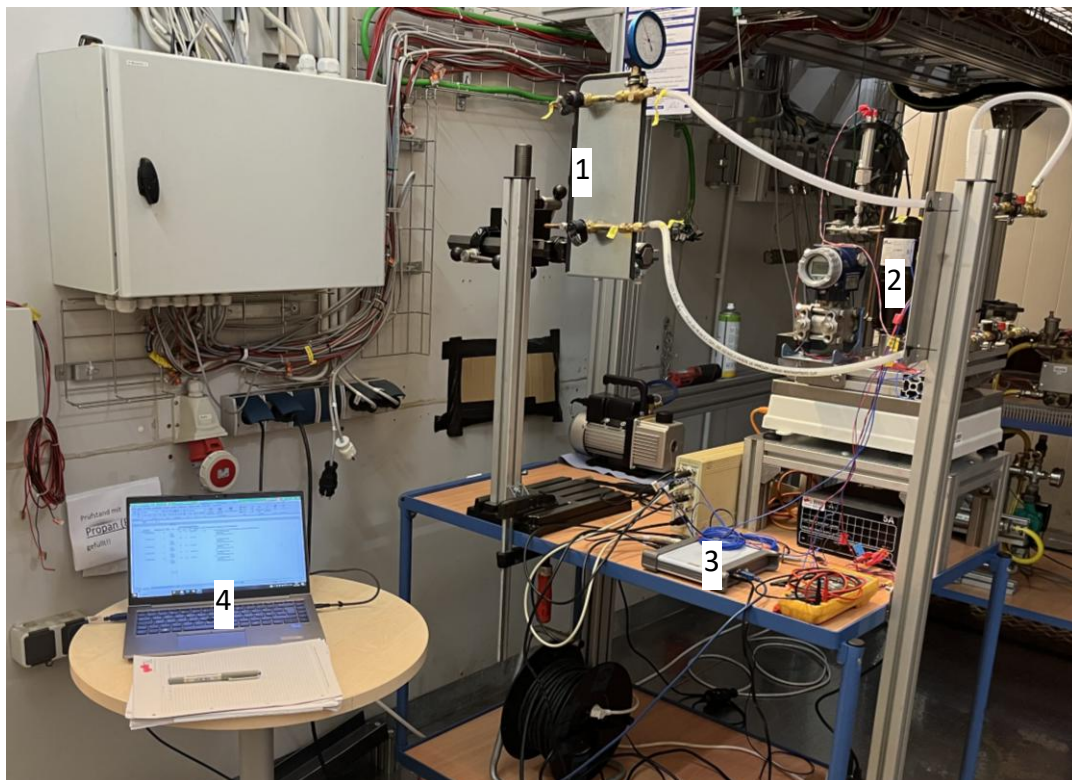


Abbildung 2-2: Mockup 2 in Klimakammer mit Messtechnik.

2.3 Mockup 3: Test der Messverfahren unter realen Betriebsbedingungen

Um die Messverfahren in einem realen Umfeld beurteilen zu können, wurden drei Messprinzipien in einem laufenden Kältekreislauf bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen untersucht. Zu diesem Zweck wurde

mit Mockup 3 ein Prüfstand aufgebaut, der es ermöglicht, den Füllstand im Hochdrucksammler eines aktiven Kältekreislaufes zu verändern, ohne die Betriebsparameter (z.B.: Verdichterfrequenz, Umgebungstemperatur, Wärmequellentemperatur, Stellung des Expansionsventils, etc.) zu verändern (Pertiller et al., 2025). Der Füllstand wird durch eine Referenzmessung erfasst, welche die Grundlage für die Validierung und Beurteilung der getesteten Messverfahren bildet.

Abbildung 2-3 (rechts) zeigt einen mit dem notwendigen Messequipment (Position 01 bis 07) ausgestatteten Kältekreislauf. Dieser ist mit dem natürlichen Kältemittel R290 (Propan) befüllt. Der Aufbau ermöglicht eine Einstellung der Betriebsbedingungen durch eine regelbare Wärmequelle (50%-Monoethylenglykol-Wasser) und die Positionierung in einer Klimakammer, die auch als Wärmesenke (Luft) genutzt wird. Das Schema zeigt den Kältekreislauf, der mit der notwendigen Sensorik für die Untersuchung der Messprinzipien ausgestattet wurde.

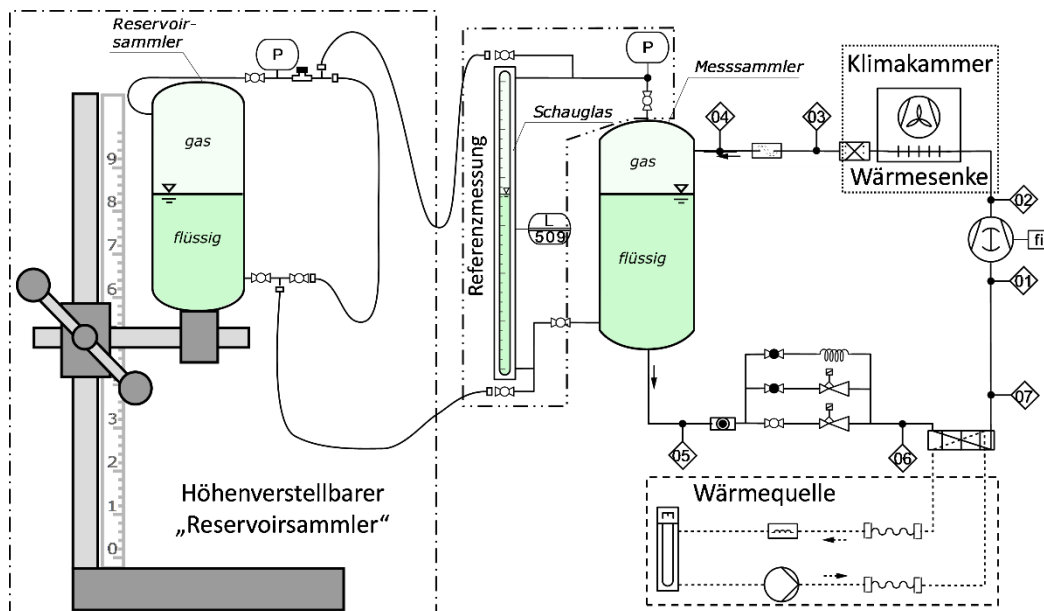


Abbildung 2-3: Schema des Versuchsstandes mit Reservoirsammler (links), Referenzmessung (Schauglas, Mitte) und Kältekreislauf inkl. Wärmequelle und Senke (rechts). (Pertiller et al., 2025)

Der in Abbildung 2-3 (rechts) schematisch gezeigte Kältekreislauf war, mit hochwertiger Sensorik ausgestattet die zur Charakterisierung des Verhaltens von Kältekreisläufen geeignet ist. Für das Projekt „CLEAR“ wurde diese Sensorik zur Beurteilung von verschiedenen Quereffekten genutzt. Die Verdichtung von 01 nach 02 erfolgt durch einen Rollkolbenverdichter (Hubvolumen 17,2 cm³). Die Drehzahl des Verdichters kann durch einen Frequenzumrichter (30 bis 120 Hz) variiert werden. Von 02 nach 03 wird die Wärme über einen Microchannelkondensator an die Umgebungsluft (Klimakammer) abgegeben. Im Messsammler (04 nach 05, Hochdrucksammler) erfolgt – solange ein Flüssigkeitsspiegel vorhanden ist – eine Trennung von Gas- und Flüssigphase des Kältemittels. Das flüssige Kältemittel wird im unteren Bereich des Sammlers entnommen und strömt zur Drosselstelle. Von 05 nach 06 wird das Kältemittel über ein elektronisches Expansionsventil – welches als Fixdrossel genutzt wird – expandiert, von 06 bis 07 wird dem Kältekreis Wärme über einen Solekreislauf (regelbare Wärmequelle) zugeführt. (Pertiller et al., 2025)

3 Messtechnische Methodenentwicklung und Analyse

Die Messtechnische Methodenentwicklung und Analyse erstreckte sich über die gesamte Projektlaufzeit und hatte hinsichtlich Versuchsdurchführung, sowie den Aufbau der Prüfstände einen unterstützenden Charakter. Betrachtet wurden:

- Automatisierung der Prüfstandsmessungen und Auswerteverfahren zur Analyse von Messserien
- Identifizierung geeigneter Signalauswerteverfahren für die unterschiedlichen Messprinzipien
- Bereitstellung angepasster Auswerteverfahren für die Messungen
- Ableitung modellbasierter Analysemethoden zur Bewertung der aufgenommenen Messsignale
- Entwicklung vereinfachter Modellierungsansätze für die Verwendung in Messanwendungen

3.1 Messdatenerfassung (DAQ)

Aufgrund des zu erwartenden Messumfangs und der großen Datenmengen wurden sämtliche Messkampagnen soweit möglich automatisiert durchgeführt. Hierfür wurde gemäß der in Abbildung 3-1 dargestellten Struktur ein Framework für die Durchführung von Experimenten mit den Mockups sowie die zugehörige Messdatenerfassung definiert und implementiert.

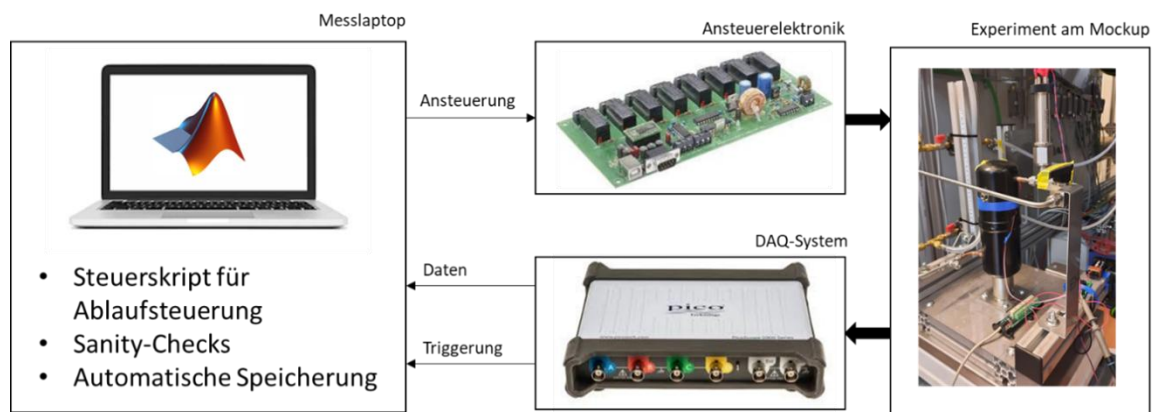


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung des zugrundeliegenden Messsystems für die automatisierte Durchführung aller Messungen.

Alle Messexperimente wurden von einem zentralen Messlaptop aus gesteuert. Die spezifischen Experimente zu den einzelnen Verfahren wurden über geeignete Schnittstellen, z. B. Relaiskarten oder Digitalschnittstellen, vom Laptop aus gestartet. Für die Datenerfassung wurde ein DAQ-System verwendet. Die Reihenfolge und der Ablauf der Experimente wurden in einem Steuerskript definiert und vorab erprobt. Die Aufzeichnung der Messdaten konnte entweder kontinuierlich oder triggerbasiert erfolgen. Die Speicherung der Daten erfolgte automatisch gemäß dem im Steuerskript definierten Messprogramm. Das implementierte Framework wurde im Verlauf der Messungen den unterschiedlichen Mockups angepasst bzw. erweitert.

Auf Basis dieses Frameworks konnten sämtliche Experimente mit hoher Automatisierungsunterstützung durchgeführt werden. Zusätzlich wurden am Messlaptop erste Auswertungen zur Plausibilisierung der aufgenommenen Daten (Sanity-Checks) implementiert. Manuelle Fehler, etwa beim Abspeichern der

Daten, sind dadurch ausgeschlossen. Auf Basis der automatisierten Messdatenspeicherung kann auch die weiterführende Auswertung weitgehend automatisiert erfolgen.

3.2 Messaufbauten und Signalauswertung

Im Folgenden werden die spezifisch ausgewählten Analyseansätze, weiterführenden Implementierungsvarianten sowie Modellierungsarbeiten zu den einzelnen Messverfahren beschrieben und ausgewählte Experimente und Ergebnisse diskutiert.

3.2.1 Auswertung der akustischen Eigengeräusche und des Helmholtz-Resonanz-Verfahrens

Für die Erfassung der notwendigen Signale wurde für das Helmholtz-Resonanz-Verfahren (siehe Abschnitt 1.2.1) und der akustischen Eigengeräusche (siehe Abschnitt 1.2.2) ein Mikrofon eingesetzt, die Beschreibung, sowie die Umsetzung können Eder (2025) Aufbau entnommen werden.

Die Signalauswertungen der akustische Eigengeräusche und des Helmholtz-Resonanz-Verfahren basieren auf Spektralanalysen der aufgenommenen Messsignale. Aufgrund des stochastischen Charakters der Signale wurden insbesondere Leistungsdichtespektren (Power Spectral Density, PSD) mittels nichtparametrischer Eigenschwingungsverfahren (Welch-Methode) untersucht. Abbildung 3-2 zeigt eine beispielhafte Auswertung einer Messung (Helmholtz-Resonanz-Verfahren), die aufgrund des stark ausgeprägten Messeffekts gewählt wurde.

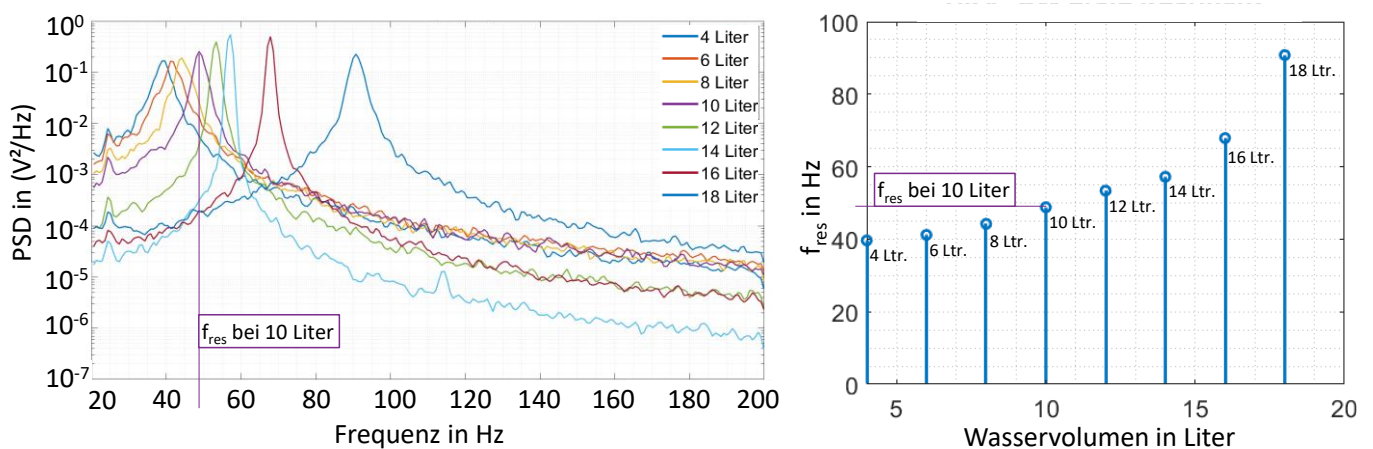


Abbildung 3-2: Spektralanalysen der Messsignale des Helmholtz-Resonanz-Verfahrens und gemessene Tonfrequenz bei verschiedenen Füllständen. (Mockup 1)

Die Kurvenscharen im linken Diagramm zeigen das Auftreten eines dominanten Tons (bei der Resonanzfrequenz, f_{res}), dessen Frequenz sich mit dem Füllstand ändert. Als Ablesebeispiel wurde die Resonanzfrequenz bei 10 Litern in beiden Diagrammen eingezeichnet. Das rechte Diagramm in Abbildung 3-2 zeigt den gemessenen Zusammenhang zwischen der ermittelten Resonanzfrequenz (dominanten Ton) und dem Füllstand bzw. Wasservolumen im Sammler des Mockups 1. Bei den passiven akustischen Eigengeräuschen tritt dieser Ton ebenfalls auf. Da der Messeffekt bei den akustischen Eigengeräuschen jedoch nicht aktiv angeregt wird, sind die Signalstärken geringer und zusätzliche Störanteile dominanter. Dennoch können auch bei den Messungen der akustischen Eigengeräusche die gleichen Spektralkomponenten identifiziert werden.

Die Modellbildung dieses Effekts basierte auf analytischen Formeln für die Helmholtz-Resonanz von Gefäßen. Hierbei wurde die Grundformel:

$$f = \frac{c}{2\pi} * \sqrt{\frac{A}{V * L}}$$

verwendet, wobei c die Schallgeschwindigkeit, A die Querschnittsfläche des Sammlers, V das Leervolumen und L die effektive Halslänge bezeichnet. Zur Berücksichtigung der tatsächlichen Sammlerform sowie des Auslasses wurden zusätzliche Korrekturfaktoren untersucht. Mit diesen Beziehungen konnte das gemessene Verhalten der Resonanzfrequenz über einen weiten Füllstandsbereich für die Untersuchungen an Mockup 1 beschrieben werden. Da die Messungen mit dem Helmholtz-Resonanz-Verfahren und den akustischen Eigengeräuschen ab Mockup 2 keine nutzbaren Ergebnisse lieferten (siehe Abschnitt 4.4.1), wurde keine weiterführende Detailmodellierung durchgeführt.

3.2.2 Auswertung Ultraschallverfahren

Die messtechnische Methodenentwicklung für Ultraschallverfahren umfasste Ansätze zur kontinuierlichen Füllstandsmessung sowie Ansätze, die zur Phasendetektion (Grenzstandsschalter) genutzt werden können. Sie erstreckte sich über alle Mockups. Für die Untersuchung der Ultraschallverfahren wurde mit Ultraschall-Transducern ein Setup zur Durchführung von Reflexions- und Transmissionsmessungen aufgebaut. Abbildung 3-3 zeigt Fotos der verwendeten Ultraschall-Transducer, die eingesetzte Messschaltung sowie einen Testaufbau an einem Aluminiumblock im Labor. Durch den gewählten Aufbau können alle in der Literatur bekannten Ultraschallmessansätze (z.B.: Laufzeitmessung, Nachhallprinzip; Strohrmann, 2000) untersucht werden.

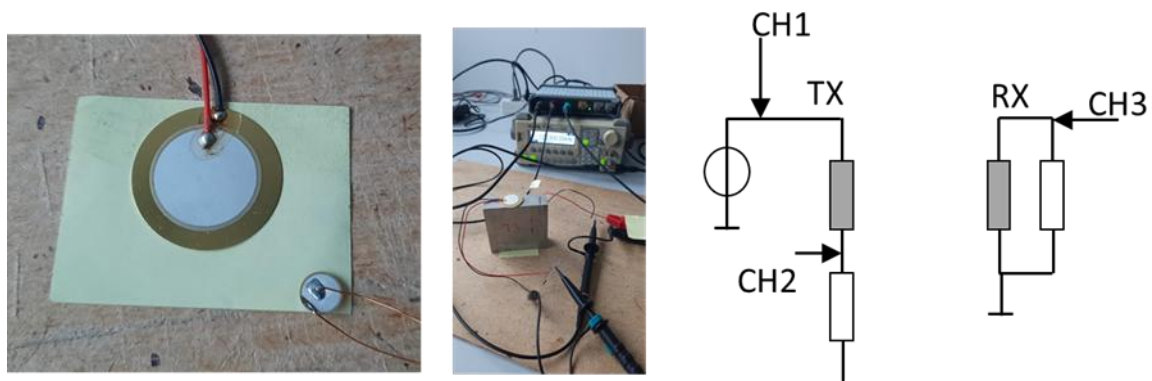


Abbildung 3-3: Fotos und Messschaltung des aufgebauten Setups zur Untersuchung der Ultraschallmesstechnik.

Für die ersten Untersuchungen mit dem in Abbildung 3-3 gezeigten Messschaltkreis wurden spektroskopische Auswertungen der Transducerimpedanz mittels digitaler I/Q-Demodulation durchgeführt. Dieser Ansatz ermöglicht eine Analyse des Sensorverhaltens über einen weiten Frequenzbereich und dient als Grundlage für die Ableitung angepasster Auswerteverfahren. Abbildung 3-4 zeigt beispielhafte Ergebnisse dieser Auswertungen, wobei die Diagramme den Betrag (Z) und die Phase (angle) nach der digitalen I/Q-Auswertung über der Frequenz darstellen.

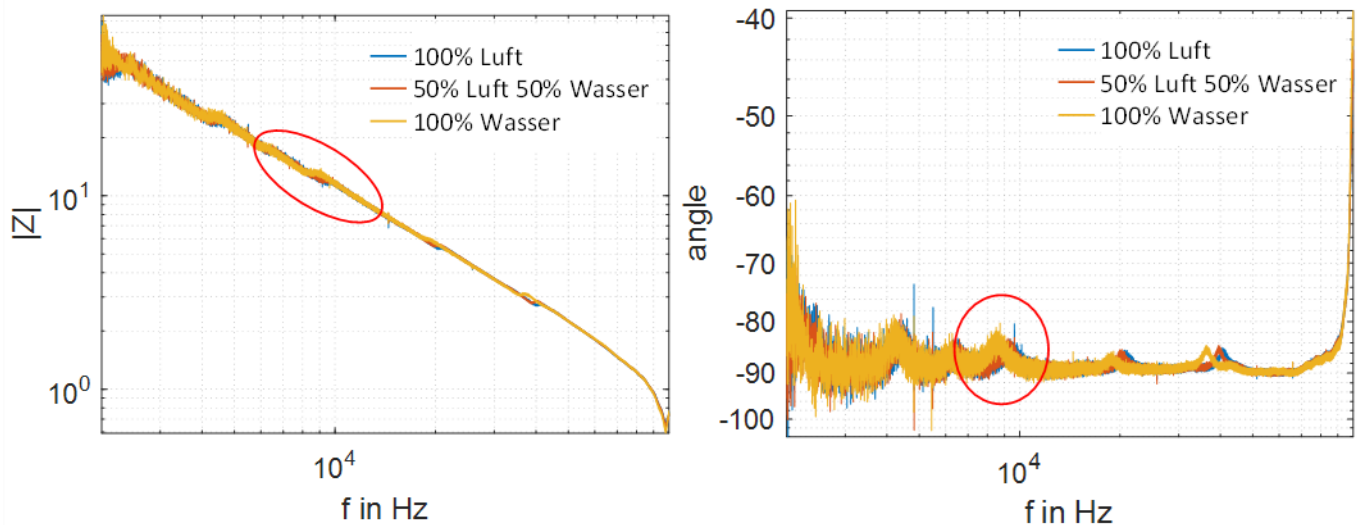


Abbildung 3-4: Impedanzspektroskopische Analyse der Ultraschall-Transducer-Impedanz. Der Füllstand im Sammler führt zu einer Verschiebung der Resonanz. Aufgrund der geringen Reproduzierbarkeit wurde der Ansatz nicht weiterverfolgt. (Mockup 1)

Die gemessenen Verläufe zeigen eine Verschiebung der Sensorresonanz in Abhängigkeit vom Füllstand (leer = 100% Luft, halbvoll = 50% Luft & 50% Wasser, voll = 100% Wasser) im Sammler. Für die Modellbildung der Ultraschallerfassung kann die Interaktion zwischen dem Transducer, dem Sammlergefäß und dem Medium im Inneren des Sammlers als gedämpftes Feder-Masse-System beschrieben werden. Eine Veränderung des Füllstands beeinflusst die Energieabgabe des Transducers in das Sammlerinnere, was sich in einer Verschiebung der Resonanzfrequenz äußert. Die gewonnenen Messergebnisse stimmen grundsätzlich mit dem formulierten Modellverhalten überein. Allerdings zeigten mehrfach durchgeführte Messreihen eine geringe Reproduzierbarkeit, sodass das Verfahren für eine kontinuierliche Füllstandsmessung als nicht geeignet eingestuft wurde.

Zur weiteren Nutzung des Ultraschallverfahrens wurde daher die Erfassung eines Grenzstandes durch eine Phasendetektion weiterverfolgt. Zur Anregung des Ultraschall-Transducers wurde eine geeignete Pulsanregung mit Laborgeräten realisiert. Abbildung 3-5 (links) zeigt schematisch den aufgebauten Schaltkreis. Zur Auswertung wurde das Spannungssignal direkt am Ultraschall-Transducer mit einem Oszilloskop erfasst. Es ist anzumerken, dass bei einer industriellen Umsetzung eine entkoppelte Signalerfassung zu bevorzugen ist; für die durchgeführten Untersuchungen ist der gewählte Ansatz jedoch geeignet, eine Beschreibung des Ansatzes ist in Neumayer et al. (2025) zu finden.

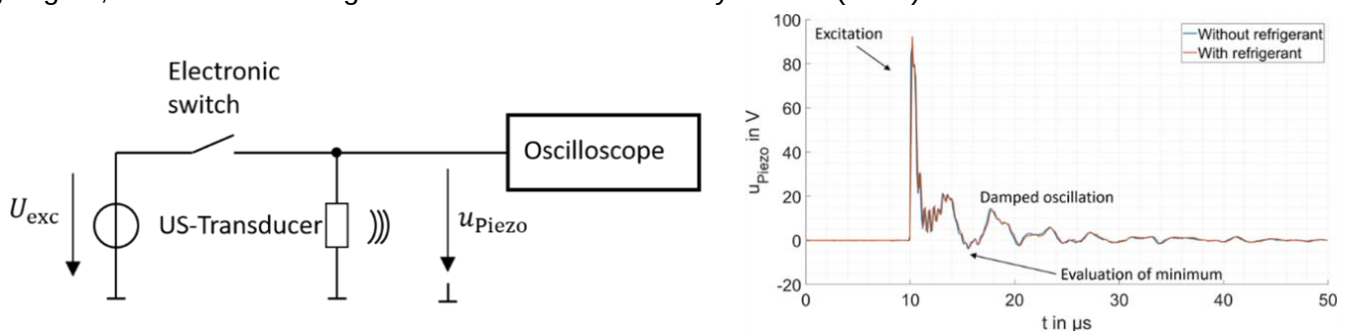


Abbildung 3-5: Schematische Darstellung der Messschaltung und gemessene Signale für eine Phasenerkennung mit einem Ultraschall-Transducer. (Mockup 2)

Abbildung 3-5 (rechts) zeigt zwei exemplarische Spannungssignale nach einer Pulsanregung. Der blaue Verlauf entspricht dem Verlauf, wenn sich auf der Innenseite des Sammlers auf Höhe des Sensors gasförmiges Kältemittel befindet, der rote Verlauf jenem, wenn sich auf der Innenseite des Sammlers auf Höhe des Sensors flüssiges Kältemittel befindet. Das Schwingungssignal nach der Pulsanregung wird – entsprechend dem erwähnten Feder-Masse-System – durch den Füllstand des Mediums (Flüssigkeitshöhe) im Sammler beeinflusst (Dämpfung, Frequenzverschiebung). Als einfacher Auswertungsansatz wurde das Spannungsminimum der Schwingung gewählt. Dieses bildet die dichteabhängige Dämpfung ab und erwies sich in den Experimenten als zuverlässige Messgröße zur Erkennung des Aggregatzustands (gasförmig oder flüssig) des Mediums innerhalb des Sammlers. Aufgrund des geringen Auswerteaufwands kann dieser Ansatz auch für eine spätere Realisierung in Betracht gezogen werden.

3.2.3 Auswertung des aktiv angeregten Eigenschwingungsverfahrens

Das Eigenschwingungsverfahren nach aktiver Pulsanregung basiert auf der Annahme, dass der Sammler als gedämpftes Feder-Masse-System beschrieben werden kann, dessen Schwingungsverhalten vom Füllstand und somit von der Masse des Kältemittels abhängt. Im Laufe des Projekts wurde diese Hypothese relativiert: Die erfassten Signale wurden als Oberflächenschwingungen identifiziert, die ebenfalls eine Abhängigkeit vom Flüssigkeitsstand im Sammler zeigen. Zur Erfassung der Schwingungen wurde der Sammler mit Beschleunigungssensoren instrumentiert. Die Anregung erfolgte mittels Impulshammer, wobei diese Anregung bei den Versuchen im aktiven R290-Kältekreislauf (Mockup 3) automatisiert umgesetzt wurde. Dieser experimentelle Ansatz erlaubt – ähnlich zur zuvor diskutierten spektroskopischen Impedanzmessung am Ultraschall-Transducer – eine breitbandige messtechnische Untersuchung zur Bewertung des Verfahrens und bildet die Grundlage für die Ableitung angepasster Verfahren im Rahmen einer potenziellen Sensorentwicklung.

Ein relevanter Aspekt des Eigenschwingungsverfahrens ist der Einfluss der externen Verrohrung auf das Schwingungsverhalten des Sammlers. Die Untersuchungen an Mockup 2 (mit externer Verrohrung) zeigen, dass die gemessenen Schwingungen hauptsächlich Oberflächenschwingungen des Sammlergefäßes sind (im Sinne lokaler Wand-/Schalenmoden). Nach einem Abgleich mit vereinfachten analytischen Modellen wurden weiterführende Analysen mittels Finite-Elemente-Simulationen durchgeführt (Donà, 2026). Die beobachtete Unabhängigkeit von Verrohrung und Montagesituation lässt sich dadurch erklären, dass die ausgewerteten Frequenzen (nach aktuellem Erkenntnisstand) Eigenfrequenzen dieser Oberflächenschwingungen sind. Der ursprünglich angedachte Ansatz eines gedämpften Feder-Masse-Systems hätte hingegen einen relevanten Quereinfluss der Verrohrung und der Montage erwarten lassen. Aufgrund der möglichen Modenausbildungen ist die Beschreibung, Modellierung und messtechnische Analyse dieses Messeffekts jedoch komplexer, da bei den Impulsanregungen mehrere Moden gleichzeitig angeregt werden.

Für die Methodenentwicklung und die Auswertung der aufgenommenen Messsignale nach der Pulsanregung wurde eine Signalauswertung auf Basis einer Prony-Analyse eingesetzt. Die Prony-Analyse zerlegt das gemessene Signal nach dem Anschlag mit dem Impulshammer in gedämpfte Schwingungen.

Das linke Diagramm in Abbildung 3-6 zeigt beispielhaft ein gemessenes Signal sowie das aus der Prony-Analyse rekonstruierte Signal. Die identifizierten Schwingungen wurden anschließend hinsichtlich ihrer Signalenergie gereiht, um ihre messtechnische Relevanz zu bewerten und relevante Moden zu identifizieren. Zur Trennung verschiedener Moden wurden die Analysen zusätzlich mit unterschiedlichen Vorfilterungen durchgeführt. Die rechte Grafik in Abbildung 3-6 zeigt exemplarisch den gemessenen Frequenzverlauf einer Mode über den gesamten Füllstandsbereich.

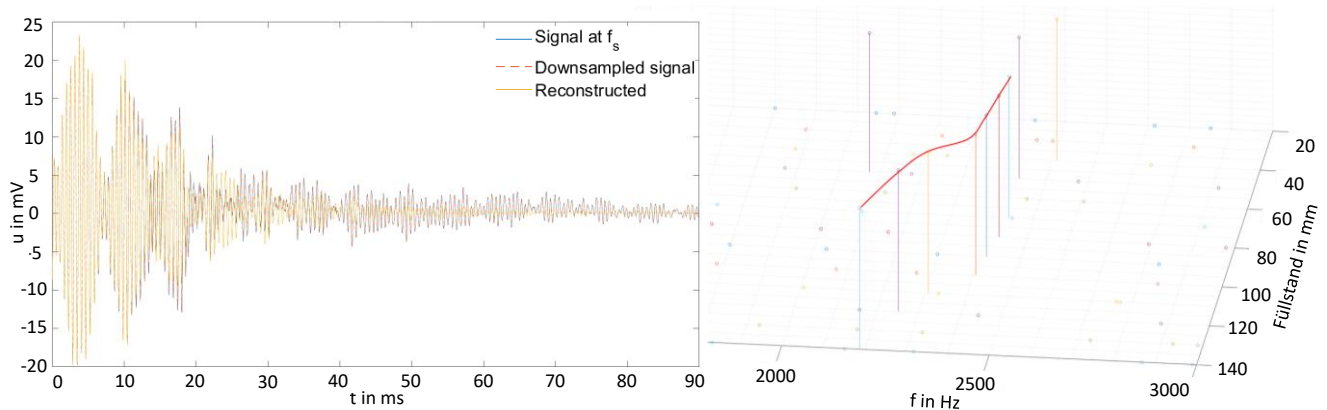


Abbildung 3-6: Gemessener Signalverlauf nach der Anregung mit dem Impulshammer und Frequenzverhalten über der Füllstandsvariation an Mockup 3.

Der stetige Zusammenhang der gemessenen Mode eröffnet grundsätzlich die Möglichkeit einer stetigen Füllstandsmessung mit dem Eigenschwingungsverfahren. Allerdings flacht der Verlauf sowohl bei leerem als auch bei vollem Sammlergefäß ab, was zu einer Einschränkung des nutzbaren Messbereichs führt.

4 Bewertung der Messprinzipien

Dem Antrag folgend wurde das Projekt sequenziell durchgeführt. Basierend auf den Erkenntnissen aus den Mockups 1 und 2 wurden die verschiedenen Messprinzipien bewertet bzw. ausgeschieden. Am finalen Mockup 3 wurde eine umfangreiche Testkampagne durchgeführt, um die übriggebliebenen Messverfahren zu bewerten. Diese Ergebnisse werden im Folgenden komprimiert beschrieben. Details zu den Mockups und den Auswertungen siehe Eder (2025) und Donà (2026).

4.1 Erkenntnisse mit Mockup 1 & 2

4.1.1 Akustische Eigengeräusche und des Helmholtz-Resonanz-Verfahren

Spektralanalysen der Mikrofonssignale für akustische Eigengeräusche und das Helmholtz-Resonanz-Verfahren zeigten, dass die an Mockup 1 aufgenommenen Signale Töne (Schwingungen) enthalten, deren Resonanzfrequenz eindeutig vom Füllstand im Sammler abhängen. Dabei treten bei beiden Verfahren die gleichen Frequenzkomponenten auf. Dies deckt sich mit der Theorie, da die auftretenden Frequenzkomponenten durch das vorhandene Luftvolumen im Sammler bestimmt werden. Dieser Effekt war jedoch nur unter idealisierten Bedingungen bei Mockup 1 zu beobachten. Die Bedingungen weichen sowohl von der geplanten Realanwendung als auch von den weiteren Prüfständen mit geschlossenem Kreislauf ab.

In Mockup 2 wurde untersucht, ob im Ausgangssignal eines Drucksensors, die an Mockup 1 identifizierten Frequenzkomponenten identifiziert werden können. In den aufgenommenen Ausgangssignalen konnten jedoch keine technisch nutzbaren Signalkomponenten für eine Füllstandsmessung identifiziert werden. Dies kann am Sensorinstallationsort bzw. am verwendeten Drucksensor liegen oder daran, dass im Mockup 2 kein Kältemittelmassenstrom mit resultierenden Geräuschen vorlag.

4.1.2 Ultraschallverfahren

Die Untersuchungen zeigten, dass gasförmiges oder flüssiges Medium auf Höhe des Transducers das Schwingverhalten eines an der Außenseite angebrachten Transducers signifikant beeinflusst. Messungen des Transmissionsverhaltens (siehe Abbildung 3-4) zwischen zwei Ultraschall-Transducern zeigten keinen technisch nutzbaren Effekt. Dies lässt sich durch den dominanten akustischen Kopplungspfad über das Sammlergehäuse erklären und deckt sich mit der Literatur. Eine kontinuierliche Erfassung des Füllstands ist daher nur schwer realisierbar. In weiterer Folge wurden Ultraschallverfahren daher mit Blick auf die Phasenerkennung (Grenzstandsschalter) untersucht.

Das modifizierte Ultraschallverfahren zur Phasenerkennung konnte an Mockup 2 erfolgreich demonstriert werden. Aufgrund der geänderten Auswertung konnte die Reproduzierbarkeit bei wiederholter Installation der Transducer – selbst mit einfachen Installationsmitteln – deutlich gesteigert werden. Die potenzielle Robustheit des Verfahrens ist daher klar erkennbar.

4.1.3 Eigenschwingungsverfahren

Für das aktiv angeregte Eigenschwingungsverfahren konnte ein eindeutiger und potenziell messtechnisch nutzbarer Zusammenhang zwischen dem Füllstand und Frequenzkomponenten der Messsignale ermittelt werden. Das Verfahren erwies sich unter kontrollierten Bedingungen als reproduzierbar. Die Position des Impulsanschlags ist relevant für die Signalstärken; die auftretenden „energiereichsten“ Frequenzen sind – sofern es das Setup erlaubt – weitgehend unabhängig davon.

Bei den Untersuchungen des Eigenschwingungsverfahrens an Mockup 2 konnten erneut die bereits an Mockup 1 identifizierten, vom Füllstand abhängigen Schwingungen nachgewiesen werden. Da es sich um Oberflächenschwingungen handelt, sind diese weitgehend unabhängig von der Verrohrung am Sammlergefäß. Die Relevanz der Anschlagposition auf die Signalqualität wurde auch in diesen Untersuchungen erneut beobachtet. Bei den durchgeführten Messungen, bei denen Vibrationen mittels Vakuumpumpe aufgeprägt wurden, ließ sich keine Beeinflussung des Eigenschwingungsverfahrens (an Mockup 2) erkennen.

4.2 Erkenntnisse mit Mockup 3

Vor den Untersuchungen an Mockup 3 wurden das aktiv angeregte Eigenschwingungsverfahren, das passiv angeregte Eigenschwingungsverfahren und das Ultraschallverfahren als Grenzstandscharakteristika als Verfahren mit dem höchsten Erfolgspotenzial identifiziert und in weiterer Folge untersucht. Eine detaillierte Beschreibung aller hier zusammengefassten Punkte können Donà (2026) entnommen werden.

4.2.1 Messkampagne

Mit einem auf den in Abschnitt 2 beschriebenen Messkripten basierenden Messprozedere wurden die drei Messverfahren bei verschiedenen Betriebsbedingungen getestet. Diese wurden dabei so ausgewählt, dass verschiedene externe Einflüsse auf die Messverfahren einwirken. Es wurden Tests bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen (5 °C, 25 °C und 40 °C Klimakammertemperatur) durchgeführt; diese Temperaturen bilden eine übliche Spannweite in Kältemaschinenräumen ab. Die Verdampfungs- und Sättigungstemperatur wurde durch Justieren des Expansionsorganes für jede Messserie fixiert (-15 °C, 10 °C und 15 °C). Der Einfluss der Verdichtersfrequenz wurde durch Variation dieser überprüft (40 Hz, 50 Hz, 75 Hz und 90 Hz). Da aus den Untersuchungen an Mockup 1 und 2 bekannt war, dass auch die Anregeposition einen Effekt auf die Ergebnisse hat wurde diese variiert (Abbildungen 4-1, rechts).

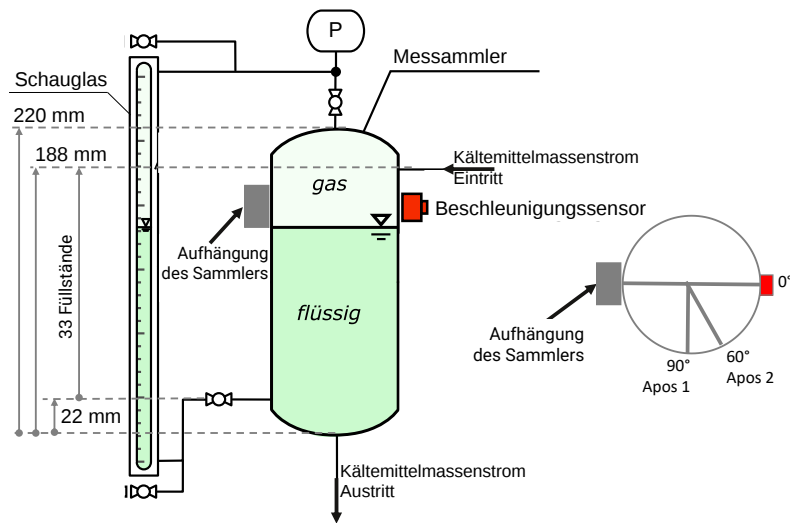


Abbildung 4-1: Messsammler mit Hauptabmessungen (links); Anregepositionen (A_{pos}) 1 & 2 (rechts); (Pertiller et al. 2026)

Für eine Messserie wurden 33 Messpunkte mit unterschiedlichen Füllständen, vgl. Abbildung 4-1, links) von 22 mm bis 188 mm erfasst. Bei jedem dieser Messpunkte wurden für die aktiv angeregte Eigenschwingungsmessung fünf Wiederholmessungen durchgeführt, dies ergibt für neun durchgeführte und ausgewertete Messserien insgesamt 1485 Messungen. Tabelle 4-1 zeigt eine Übersicht der Messserien.

Tabelle 4-1: Messparameter bei Messserie 1 bis 9. Anregeposition A_{pos} ; Umgebungstemperatur t_{Um} ; Verdichterfrequenz f_{Verd} ; Verdampfungstemperatur t_0 und der durchschnittliche Kondensationsdruck p_{Kond}

Messserie	f_{Verd} (Hz)	t_{Um} (°C)	t_0 (°C)	A_{pos}	p_{Kond} (bar)
1	50	5	-10	1	7,4
2	40	25	10	1	13,7
3	50	25	10	1	14,9
4	50	25	10	2	14,9
5	75	25	10	1	18,0
6	90	25	10	1	19,8
7	50	40	15	1	21,4
8	40	25	10	3	14,1
9	90	25	10	3	20,0

4.2.2 Ultraschallverfahren

Die Untersuchungen für das Ultraschall Messverfahren zeigten eine geringe Querempfindlichkeit gegenüber der Betriebsweise des Kältekreislaufes. In Abbildung 4-2 ist exemplarisch die Auswertung des Ultraschallsensors dargestellt. Die Auswertung erfolgt über eine Messserie mit verschiedenen Füllständen (X-Achse), welche jeweils der minimalen Spannung einer Messung des Ultraschalltransducers ($u_{piezo,min}$ in mV) zugeordnet sind (vgl. Neumayer et al. 2025). Bei guter Signaleinkopplung konnte an Mockup 3 detektiert werden, ob sich auf Höhe des Sensors (132 mm) Kältemittel in flüssiger oder gasförmiger Phase im Sammler befindet. Das Verfahren eignet sich somit zur Phasendetektion auf Höhe des Sensors und könnte daher als Grenzstandschanter verwendet werden.

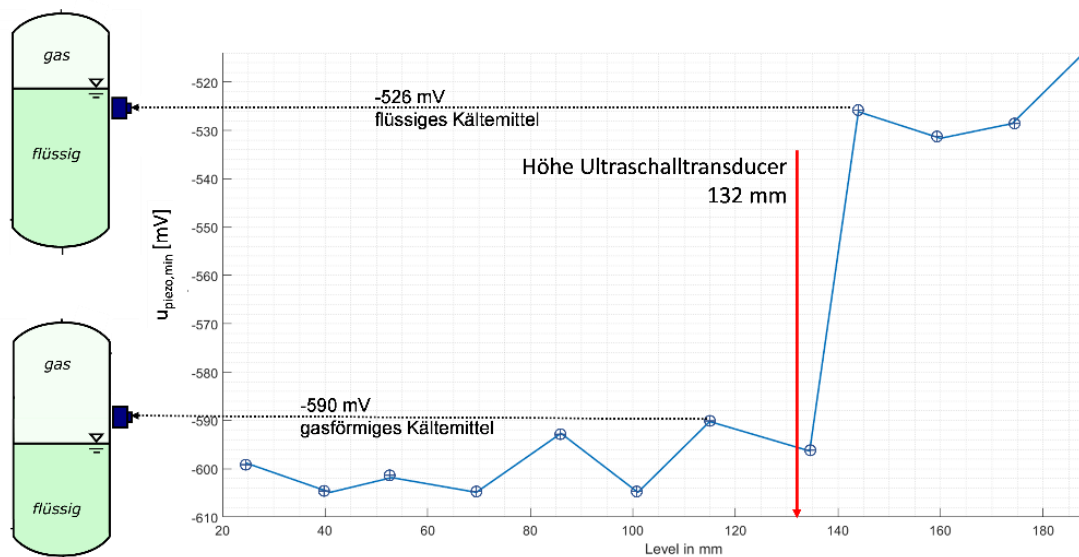


Abbildung 4-2: Ausgewertete Ultraschallmessung bei guter Signaleinkopplung. (Pertiller et al., 2025)

4.2.3 Durch betriebsbedingte Vibrationen passiv angeregtes Eigenschwingungsverfahren

Die Auswertung des passiv angeregten Eigenschwingungsverfahrens, ähnlich wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben. Bei der passiven Anregung haben Quereffekte durch z.B. sich verändernde Vibrationen einen signifikanten Einfluss auf die Messergebnisse und erlauben keinen reproduzierbaren Zusammenhang zwischen Füllstand und den ausgewerteten Frequenzen für den gesamten Betriebsbereich (siehe Pertiller et al., 2025). Aus diesem Grund erscheint dieses Messprinzip für die Anwendungen in Wärmepumpen und Kältekreisläufen – aus aktueller Sicht – nicht geeignet.

4.2.4 Durch Anschlag aktive angeregtes Eigenschwingungsverfahren

Das aktiv angeregte Eigenschwingungsverfahren wurde im Verlauf der Sondierung auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse schrittweise angepasst (z. B. automatisierter Anschlag, optimierte Mess- und Anregeposition), wodurch sich Genauigkeit und Reproduzierbarkeit kontinuierlich verbesserten. Dabei zeigte sich, dass sowohl die Position der Anregung als auch die Position des Sensors maßgeblichen Einfluss auf die Messergebnisse haben. Abbildung 4-2 zeigt die Messergebnisse der Messserien 1 bis 7 (links) und der Messserien 8 und 9 (rechts). Die abgebildeten Symbole entsprechen dabei jeweils dem Mittelwert der fünf Wiederholmessungen, die je Messpunkt (d.h. bei gleichem Füllstand) durchgeführt wurden, ein Balken markiert dabei den größten und kleinsten Wert der fünf Wiederholmessungen. Ein schmaler Balken bedeutet somit eine geringe Streuung der Messergebnisse. Für die Messserien 1 bis 7 (linkes Diagramm) fällt auf, dass die Streuung der Wiederholmessungen bei niedrigen Füllständen in der Regel deutlich größer ist als bei hohen. Durch die – auf Simulationsergebnissen gestützte – Umpositionierung des Anschlages und des Sensors (Details siehe Donà, 2026) konnte diese Streuung bei den Messserien 8 und 9 (rechtes Diagramm) reduziert werden. Durch die Messserien konnte der Druck im Sammler als wesentliche Einflussgröße identifiziert werden. Bei hohen Füllständen nimmt die Frequenz mit steigendem Druck kontinuierlich zu (Drücke siehe Tabelle 4.1), während der Frequenzhub, d.h. die Differenz der energiereichsten Frequenz bei minimalem und maximalem Füllstand, abnimmt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Frequenzverschiebung bei hohen Füllständen zum einen durch die zunehmende Steifigkeit (Versteifungseffekt) des Sammlers und zum anderen durch die abnehmende

Dichte der Flüssigphase bei höherem Sättigungsdruck (reduzierter Added-Mass-Effekt) entsteht. Als Added-Mass-Effekt wird die zusätzliche Trägheit bezeichnet, die entsteht, weil ein beschleunigter Körper einen Teil des umgebenden Fluids mitbeschleunigen muss. (Tchet, 2005).

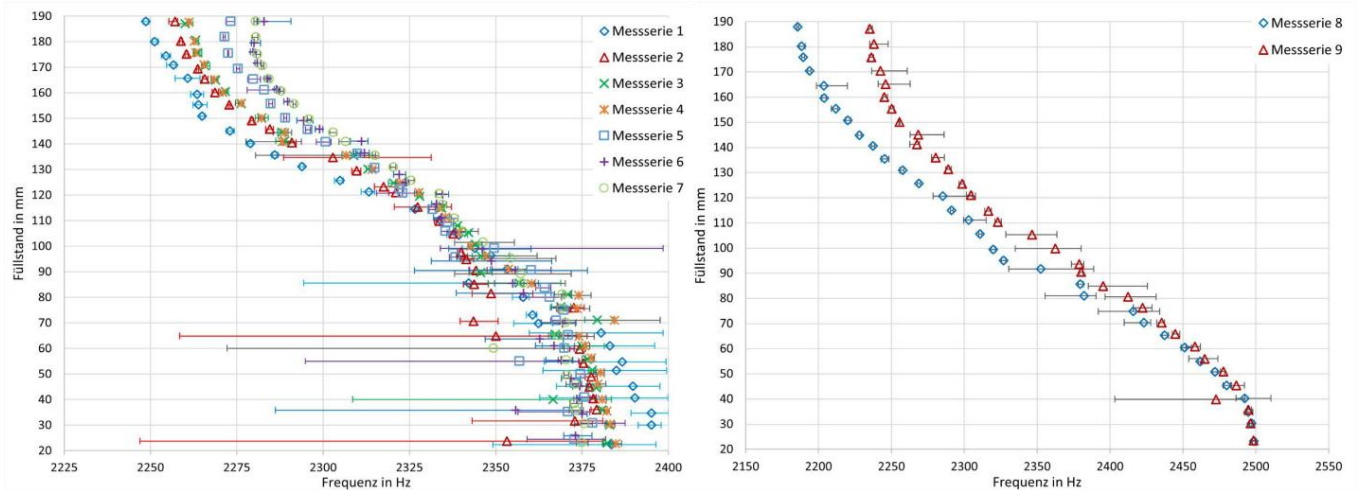


Abbildung 4-3: Füllstand/Frequenz-Zusammenhang Symbole: Mittelwert der fünf Wiederholmessungen. Balken: kleinster bzw. größter Wert – der Wiederholmessungen – eines Messpunktes. (Donà, 2026)

4.3 Simulation des Sammlergefäßes

Im Rahmen der Masterarbeit von Donà (2026) wurde eine numerische Simulation erstellt und beschrieben. Ziel war es den physikalischen Zusammenhang zwischen Füllstand, Schwingungsverhalten des Sammlers und dem vom Sensor erfassten Signal zu analysieren. Dabei wurde die Simulation sukzessive erweitert und mit den gemessenen Daten verglichen. Exemplarisch zeigt Abbildung 4-4 den Einfluss des am Sammler angebrachten Piezosensors (inkl. Befestigung, Masse ≈ 30 g) auf die Simulationsergebnisse. Im linken Diagramm ist zu erkennen, dass die Simulationsergebnisse (strichlierte Linien) qualitativ den Verlauf der Messungen (blaue Rauten bzw. rote Dreiecke) abbilden, aber ein „Offset“ von ca. 120 Hz zu erkennen ist. Durch die Erweiterung des Simulationsmodells (um die Sensormasse und Geometrie) konnte dieser Offset reduziert werden (Abbildung 4-4, rechts).

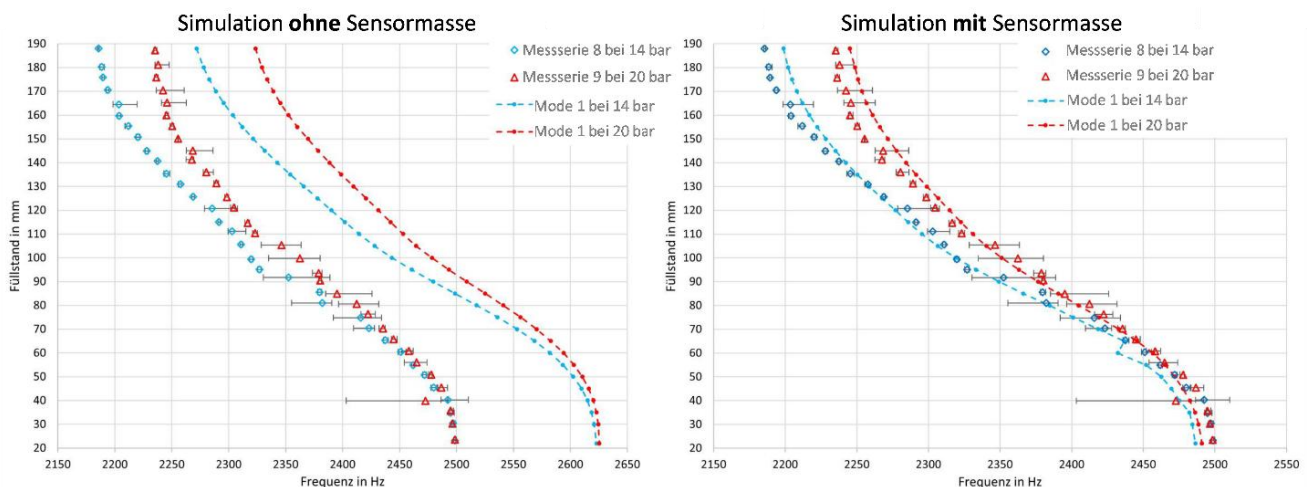


Abbildung 4-4: Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messergebnissen: links ohne Sensormasse und rechts mit Sensormasse (Basierend auf Donà (2026))

5 Schlussfolgerungen

Nach diesem Sondierungsprojekt stehen zwei grundsätzlich vielversprechende, nicht-invasive Optionen für die Sensorentwicklung zur Verfügung: ein robustes Grenzstandskonzept (Ultraschall) und ein für einen eingeschränkten Bereich kontinuierliches Messkonzept (Eigenschwingungsverfahren).

Mithilfe der Dämpfung des Ultraschallsignals lässt sich eine Phasendetektion auf Höhe des Sensors realisieren. Die Messreihen zeigen eine vielversprechende Robustheit gegenüber Quereffekten des Anlagenbetriebs. Das Messkonzept kann potenziell auf mehrere Sensorpositionen erweitert werden. Damit ergibt sich die Möglichkeit, die Phasendetektion über ein Array auf unterschiedlichen Positionen durchzuführen und so die Lage des Flüssigkeitsspiegels zwischen zwei der verbauten Sensoren einzuschränken.

Mithilfe der Schwingungsmessung und geeigneter Signalverarbeitung kann ein Zusammenhang zwischen der Frequenz und dem Füllstand nachgewiesen werden. Die relevanten Signale korrespondieren mit Oberflächenschwingungen des Sammlergefäßes. Für den Anlagenbetrieb hat sich der Sammlerinnendruck als wesentlicher Quereinfluss gezeigt, womit sich der verlässlich auswertbare Füllstandsbereich reduziert. Durch eine geeignete Druckkompensation könnte der auswertbare Bereich erweitert werden.

Die Auswahl geeigneter Aufnehmer und Impulsgeber sowie die Umsetzung einer Druckkompensation wären die nächsten Schritte auf dem Weg zu einem möglichen Sensor. Die identifizierten Messprinzipien haben das Potenzial, die Anforderungen an Kosten, Integrationsaufwand und Handhabung gemäß Antrag zu erfüllen. Dies müsste jedoch im Zuge eines Nachfolgeprojektes noch verifiziert werden.

6 Literaturverzeichnis

Barandier, P; Cardoso, A. J.M; (2023). A Review of Fault Diagnostics in Heat Pumps Systems. Applied Thermal Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120454>

Boahen, S; Ofori-Amanfo, K. B; Amoabeng, K; Godwin, K. A; Obeng, G; Opoku, R; Dzebre, D.E. (2023). Fault detection model for a variable speed heat pump. Journal of Engineering and Applied Science, 70. <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00216-6>

Donà, F. (2026): Bewertung verschiedener Messprinzipien zur nichtinvasiven Füllstandserfassung in Kältemittelsammlern unter praxisnahen Betriebsbedingungen, Masterarbeit, Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz

Eder, F. (2025): Evaluierung von alternativen Messmethoden zur Füllstandsmessung in Kältemittelsammlern, Masterarbeit, Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz

Klebig, T. (2024): Leckagedetektion mit Vibrationssensoren. Good Vibes für Wärmepumpen. In: Deutsche Kälte- und Klimatagung (2024) Dresden, Deutschland, 20. - 22. November 2024. (Präsentation).

Mtibaa, A; Sessa, V; Guerassimoff, G. (2025). Evaluating fault detection techniques for refrigerant leak detection in industrial vapor compression refrigeration systems. 2025 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD), 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICCAD64771.2025.1109944>

Neumayer, M., Pertiller, G., Eder, F. & Rieberer, R. (2025). Low Cost Level Sensing for Receivers in Small Sized Refrigeration Systems with Natural Refrigerants in EURO-SENSORS XXXVII. <https://doi.org/10.5162/EUROSENSORS2025/TP4>

Pelella, F; Passarelli, A. F; Llopis-Mengual, B; Viscito, L; Navarro-Peris, E; Mauro, A.W. (2025). State-of-the-Art Methodologies for Self-Fault Detection, Diagnosis and Evaluation (FDDE) in Residential Heat Pumps. Energies. <https://doi.org/10.3390/en18133286>

Pertiller, G., Donà, F., Neumayer, M. & Rieberer, R. (2025). Nicht-invasive Füllstandsüberwachung. DKV Tagung 2025, Magdeburg, Deutschland.

Pertiller, G., Donà, F., Neumayer, M. & Rieberer, R. (2026). Non-invasive method of measuring the liquid level in refrigerant receivers. 15th IEA Heat Pump Conference, Vienna, 2026 (Accepted)

Siegl, A., Leithner, S., Schweighofer, B. & Wegleiter, H. (2023). Excitation of Mechanical Resonances in the Stationary Ring of a Mechanical Seal by a Continuously Operated Electromagnetic Acoustic Transducer. Sensors (Basel, Switzerland), 23(2). <https://doi.org/10.3390/s23021015>

Strohrmann, G. (2000). Meßtechnik im Chemiebetrieb, Oldenbourg Industrieverlag, ISBN 3-486-27006-0

Techet, A. H. (2005). 2.016 Hydrodynamics: Added Mass. Massachusetts Institute of Technology.

https://ocw.mit.edu/courses/2-016-hydrodynamics-13-012-fall-2005/6124a1fd14e811d9ea753f85e0dfc8d0_2005reading6.pdf (aufgerufen am 13.01.2026)

Webasto. (2000). Schulungs-Handbuch Kälte-Klima. Webasto Thermosysteme GmbH, Unterlagen erstellt von TWK GmbH. http://www.andreasjahnke.de/index.htm_files/WEBASTO_Schulungs-Handbuch_Klima.pdf

Zhou, Q;Wang, S; Ma, Z. (2009). A model-based fault detection and diagnosis strategy for HVAC systems. International Journal of Energy Research, 33. <https://doi.org/10.1002/er.1530>

7 Kontaktdaten

Projektnehmer	Technische Universität Graz – Institut für Wärmetechnik
Ansprechpartner	Prof. René Rieberer
Postadresse	Inffeldgasse 25/B, 8010 Graz
Telefon	+43 316 873 7302
E-mail	rene.rieverer@tugraz.at
Website	http://www.iwt.tugraz.at

Projektnehmer	Technische Universität Graz – Institut für Elektrische Messtechnik und Sensorik
Ansprechpartner	Dr. Markus Neumayer
Postadresse	Inffeldgasse 33/I, 8010 Graz
Telefon	+43 316 87330571
E-mail	neumayer@tugraz.at
Website	https://www.tugraz.at/institute/ems/home/