Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:
Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:
Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht
erstellt am
22/12/2021

Projekttitel: Thermoacoustic_HP

Heizen und Kühlen in der Gebäudetechnik im kleinen Leistungsbereich (< 2kW$_{thermisch}$) mittels thermoakustischer Wärmepumpe

Projektnummer: 853582

Ausschreibung	2. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/07/2016
Projektende	31/03/2021
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	57 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Forschung Burgenland GmbH
AnsprechpartnerIn	DI Thomas Schoberer
Postadresse	7423 Pinkafeld, Steinamangerstraße 21
Telefon	+43 5 7705 4151
Fax	
E-mail	thomas.schoberer@fh-burgenland.at
Website	www.forschung-burgenland.at

Thermoacoustic_HP

Heizen und Kühlen in der Gebäudetechnik im kleinen Leistungsbereich (< 2 $kW_{thermisch}$) mittels thermoakustischer Wärmepumpe

AutorInnen:
Thomas Schoberer
Kathrin Schuller
Marlies Schlauf
Joachim Gerger

1 Inhaltsverzeichnis

1 Inhaltsverzeichnis 4
2 Einleitung 5
2.1 Aufgabenstellung 5
2.2 Schwerpunkte des Projektes 6
2.3 Einordnung in das Programm 7
2.4 Stand der Technik 8
2.5 Verwendete Methoden 9
2.6 Aufbau der Arbeit 9
3 Inhaltliche Darstellung 9
3.1 Thermoakustik als Schlüsseltechnologie 9
3.2 Berechnungsmethodik und Komponentendesign für die gebäudetechnische Anwendung 12
3.2.1 Randbedingungen Berechnungsmethodik 12
3.2.2 Overall Design 12
3.2.3 Wärmetauscher-Design 13
3.2.4 Auslegungssimulation 15
3.3 Konstruktion thermoakustischer Versuchsträger 17
3.4 Experimentelle Validierung thermoakustischer Versuchsträger 23
3.4.1 Inbetriebnahme des thermoakustischen Versuchsträgers 23
3.4.2 Betriebspunktmessungen 25
4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen 28
5 Ausblick und Empfehlungen 28
5.1 Forschungsbedarf 29
6 Verzeichnisse 31
6.1 Literaturverzeichnis 31
6.2 Abbildungsverzeichnis 32
6.3 Tabellenverzeichnis 33
7 Kontaktdaten 34

2 Einleitung

2.1 Aufgabenstellung

Laut dem Austrian Assessment Report (2014) wird für die erste Hälfte des 21. Jahrhunderts ein Temperaturanstieg von 1,4 °C und ein steigen der Extremereignisse prognostiziert. Im Bericht wird dargelegt, dass unter anderem die Effizienz von Umwandlungstechnologien ausschlaggebend bei der Reduktion der Treibhausgas (THG)-Emissionen ist. Maßnahmen dazu liegen vor allem im Bereich der Umwandlung und Steigerung der Effizienz bei Raum- und Prozesswärme. Eine Reduktion der THG-Emissionen im Bereich der Heizenergieversorgung ist durch die Einbindung erneuerbarer Energieträger realisierbar (Kromp-Kolb et al.,2014). Damit Österreich dazu beitragen kann das 2°C-Ziel zu erreichen, sind unter anderem Technologien gefordert, welche an Gütegrade von herkömmlichen Systemen am Markt anknüpfen können. Trotz Anpassung der Baustandards in den letzten Jahren umfassen die Treibhausgasemissionen für den Sektor Gebäude (Wohn- und betriebliche Gebäude) rund 10 % der gesamten österreichischen Emissionen. Bis 2050 wird eine möglichst vollständige Dekarbonisierung des Sektors angestrebt (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, 2019). Während der Einsatz von Wärmepumpen einerseits Potenziale zur Reduktion der THG-Emissionen bietet, bringt der damit verbundene Einsatz konventioneller Kältemittel hohes THG-Potenzial mit sich. Hinsichtlich der Kältemittel-Problematik bietet sich die Thermoakustik, welche keine Kältemittel erfordert, als Alternative zu konventionellen Wärmepumpen an. Das in thermoakustischen Systemen häufig verwendete Arbeitsmedium Helium hat im Gegensatz zu derzeit verwendeten Kältemitteln kein Treibhausgaspotenzial und ist weder toxisch noch brennbar. Folglich sind negative Auswirkungen aufgrund von Leckagen oder durch die Erzeugung und Entsorgung ausgeschlossen. Zudem werden kaum bis keine bewegten Teile benötigt, wodurch sich Vorteile hinsichtlich der Betriebssicherheit, Lärmemissionen, Wartung, Robustheit und Kosten ergeben.

In den letzten Jahrzehnten wurde die Bauphysik von neuen und sanierten Gebäuden immer energieeffizienter. Zukünftige Gebäude werden durch sehr geringe Heizlasten gekennzeichnet sein. Zudem werden durch die Sanierung von Bestandsbauten Voraussetzungen für den Einsatz von dezentralen Wärmepumpentechnologien geschaffen. Das bedeutet, dass speziell im Neubau von Einfamilienhäusern, aber auch bei dezentralen Anwendungen im mehrgeschoßigen Wohnbau auf Niedrigstenergiestandard ein Bedarf an Wärmepumpen im kleinen Leistungsbereich besteht.

Ziel des Projekts Thermoacoustic_HP ist es, unterschiedliche thermoakustische Wärmepumpen-Konzepte im kleinen Leistungsbereich (< 2 $kW_{thermisch}$) zu erforschen, welche für die gebäudetechnischen Anwendungen Heizen, Kühlen und Warmwasserbereitung eingesetzt werden können und sich durch lange Laufzeit und geringe elektrische

Leistungsaufnahme auszeichnen, und darüber hinaus geräuscharm, wartungsarm und umweltverträglich (insbesondere kein Einsatz klimarelevanter Kältemittel erforderlich) sind.

2.2 Schwerpunkte des Projektes

Ziel des Projekts Thermoacoustic_HP* ist es, unterschiedliche thermoakustische Wärmepumpen-Konzepte im kleinen Leistungsbereich (<2 $kW_{thermisch}$) zu erforschen, welche für die gebäudetechnischen Anwendungen Heizen, Warmwasserbereitung und Kühlen eingesetzt werden können. Diese zeichnen sich durch lange Laufzeit und geringe elektrische Leistungsaufnahme aus, und sind geräuscharm, wartungsarm und umweltverträglich (insbesondere ohne klimarelevante Kältemittel). Der Innovationsgehalt liegt darin beschrieben, dass diese Anlagen basierend auf dem thermoakustischen Prinzip funktionieren und als Wärmepumpe für Heiz- und Kühlanwendungen einsetzbar sind. Die thermoakustischen Wärmepumpen-Konzepte sollen dabei konkurrenzfähige Carnot`sche Gütegrade besitzen. Die Eignung für gebäudetechnische Anwendungen wird durch eine neuartige Methode, nämlich der Kopplung von Versuchsträger und Gebäudesimulation im Hardware-in-the-Loop-Prinzip durch Aufprägung realitätsnaher Lasten erforscht.

Am Ende des Projekts Thermoacoustic_HP stehen experimentell validierte thermoakustische Wärmepumpen-Konzepte. Die experimentelle Validierung der berechneten und gefertigten Versuchsträger bringt Erkenntnisse, wie energieeffizient thermoakustische Wärmepumpen ins Gebäude für die Anwendungen Heizen, Warmwasserbereitung und Kühlen integriert werden können und welche Berechnungs- und Regelungsmethodik dafür am geeignetsten ist. Die Erkenntnisse werden für unterschiedliche Gebäudetypen, Gebäudestandards und Wärmequellen gewonnen.

Folgende Hauptziele werden im vorliegenden Projekt adressiert:

- Entwicklung von 3 unterschiedlichen thermoakustischen Wärmepumpen-Konzepten für die gebäudetechnische Anwendung
- Entwicklung einer Berechnungs- und Regelungsmethodik für die thermoakustische Wärmepumpen-Konzepte abgestimmt auf die gebäudetechnische Anwendung
- Experimentelle Validierung der Integration ins Gebäude bezüglich Energieeffizienz unter Labor-Bedingungen

Diese 3 Hauptziele werden durch die folgenden **Sub-Ziele** näher definiert:

- Energetische Bewertung der folgenden, möglichen Systemparameter hinsichtlich deren Eignung für die gebäudetechnische Anwendung und deren Einfluss auf die Energieeffizienz mittels Berechnungsmethodik (stationär, instationär):
    - von einstufigen und mehrstufigen thermoakustischen Systemen
    - der stehenden versus der fortschreitenden Welle

  - von elektrischem und thermoakustischem Antrieb
  - unterschiedlicher Resonatorlängen und Resonatordurchmesser
- Berechnung von Wärmetauscherkonzepten abgestimmt auf die folgenden Wärmequellen und Wärmeabgabesysteme für die Integration ins Gebäude:
  - Wärmequellen: Solarthermie (als Niedertemperaturquelle, aber auch als Hochtemperaturquelle für thermoakustischen Antrieb), Erdwärme und Abluft
  - Wärmeabgabesystem: Flächenheiz- und Flächenkühlsystem, Radiator bzw. Fan-Coil, über Wärmetauscher oder direkt in Warmwasserspeicher
- Konstruktion und Fertigung von thermoakustischen Wärmepumpen- Versuchsträgern für die gebäudetechnische Anwendung Heizen, Warmwasserbereitung und Kühlen
- Experimentelle Validierung der thermoakustischen Wärmepumpen-Versuchsträger bezüglich der Auswirkung auf die Energieeffizienz der Anlage bei der Anwendung unterschiedlicher Arbeitsmedien bei Variation der Arbeitsdrücke (z.B. 5 bis 30 bar) und Druckverhältnisse zwischen Schalldruck und mittlerem Druck (z.B. 1 bis 5 %)
- Experimentelle Validierung der Energieeffizienz der thermoakustischen Wärmepumpen-Versuchsträger mit Fokus Gebäudeintegration mittels Kopplung mit der Gebäude- und Anlagensimulation (Hardware-in-the-Loop-Prinzip)

2.3 Einordnung in das Programm

Das vorliegende Projekt trägt zu den Zielen des Energieforschungsprogamms des Klima- und Energiefonds bei. Das Projekt Thermoacoustic_HP wurde prioritär innerhalb des Themenfeldes 3 Erneuerbare Energien – Schwerpunkt Wärmepumpen mit Subschwerpunkt Kleinstwärmepumpen mit Leistungen kleiner 2 kW eingereicht.

In den letzten Jahrzehnten wurde die Bauphysik von neuen und sanierten Gebäuden immer energieeffizienter. Das bedeutet, dass speziell im Neubau von Einfamilienhäusern, aber auch bei dezentralen Anwendungen im mehrgeschoßigen Wohnbau auf Niedrigstenergiestandard Wärmepumpen im kleinen Leistungsbereich einsetzbar sind. Der im Projekt entwickelte thermoakustische Versuchsträger wurde für die Anwendungen Heizen, Warmwasserbereitung und Kühlen für kleine Leistungsbereiche von < 2 kW konzipiert. Während der Einsatz von Wärmepumpen einerseits Potenziale zur Reduktion der THG-Emissionen bietet, bringt der damit verbundene Einsatz konventioneller Kältemittel hohes THG-Potenzial mit sich. Thermoakustische Systeme erfordern keine Kältemittel, ein typisches Arbeitsmedium ist Helium. Zudem werden kaum bis keine bewegten Teile benötigt, wodurch sich Vorteile hinsichtlich der Betriebssicherheit, Lärmemissionen, Wartung, Robustheit und Kosten ergeben. Das Themenfeld 2/2.2 Energieeffiziente Produkte und Systemlösungen forciert Systeme, welche einen energieeffizienteren und emissionsärmeren Betrieb ermöglichen. Diese Ziele werden vom vorliegenden Projekt ebenso adressiert.

2.4 Stand der Technik

National hat sich die Firma FOTEC im Zuge eines ESA Forschungsprojektes mit thermoakustischen Wärme-Kraft-Maschinen beschäftigt. Unter Berücksichtigung verschiedener Designs wurde der Demonstrator zur Stromerzeugung herangezogen. Aufgrund des großen getesteten Betriebsbereichs wurden Gütegrade für die thermoakustische Anwendung von >0,08 erreicht. Die Simulation einer zweistufig, kaskadierten, thermoakustischen Maschine ergab einen Carnot`schen Gütegrad von 0,26 (Reissner et al., 2014).
In der von der ESA finanzierten Systemstudie „Thermo-acoustic electric generation for communication satellites“ wurde durch ein europäisches Konsortium die Möglichkeit untersucht, einen solarbetriebenen thermoakustischen Generator zur Stromerzeugung auf einem geostationären Satelliten zu benutzen. FOTEC lieferte Systemsimulationen und eine Berechnung der optischen Komponenten um Wärme bei einer Temperatur von 900 °C bereitzustellen. Als Gesamteffizienz ergab sich ein Wert von 29 %, vergleichbar mit Photovoltaik. (Buchner et al., 2018)

Auf europäischer Ebene führten Tijani & Spoelstra (2008) Untersuchungen an einem thermoakustischen Stirling-Kühler, betrieben mit Netzfrequenz (60 Hz) durch. Es wurde ein Linearmotor und Argon bei 15 bar als Arbeitsmedium verwendet. Bei einem Druckverhältnis zwischen Schalldruck und mittlerem Druck von 4,3 % konnte ein Carnot’scher Gütegrad von 0,25 gemessen werden.
Im Rahmen des EU-Projekts THATEA (Spoelstra et al; 2012) wurden Anwendungen als thermoakustische Wärme-Kraft-Maschine und thermoakustische Wärmepumpe bzw. Kältemaschine untersucht. Bei der Anwendung als Wärmepumpe konnten bei einem Temperaturhub von 10 °C auf 80 °C und einem Druckverhältnis von 3 % Carnot’sche Gütegrade bis zu 0,36 gemessen werden. Ebenso wurde eine thermoakustische Kältemaschine vermessen. Bei einem Temperaturhub von – 40 °C auf 20 °C konnte ein Gütegrad von 0,33 und eine Kälteleistung von 200 W gemessen werden.

Tabelle 2-1: Auszug Literaturrecherche

Autoren	Fokus	Ergebnisse
Tijani & Spoelstra; 2008	TA Stirling Kühler; Experimentelle Untersuchungen bei Netzfrequenz, Linearmotor	η_C = 0,25 TK = -54 °C nach 2 min
Spoelstra et al.; 2012	TA Maschine, WP und KM Einsatz in der Energietechnik, experimentelle Untersuchungen	η_C = 0,33 (-40 °C / 20 °C, 200 W) η_H= 0,36 (10 °C / 80 °C)

2.5 Verwendete Methoden

Als Grundlage für die Etablierung der Berechnungsmethodik für die Komponenten des thermoakustischen Versuchsträgers dienten unter anderem Erkenntnisse aus vorhergehenden Projekten im Bereich der Thermoakustik, welche im Zuge einer Literaturrecherche ermittelt wurden. Basierend darauf wurden Berechnungsmodelle für die Komponenten (Antriebseinheit, Resonator, Regenerator, Wärmetauscher) entwickelt und auf die gebäudetechnische Anwendung abgestimmt. Die Berechnung der Komponenten erfolgte für die jeweilige Anwendung geeigneten Arbeitsdrücke, -temperaturen und -medien. Die Berechnungsmodelle wurden mit Messdaten aus Vorprojekten validiert. Basierend auf den Spezifikationen der Komponenten erfolgte die Anfertigung der technischen Zeichnungen des thermoakustischen Versuchsträgers und anschließend die Fertigung der Komponenten und deren Assemblierung. Der thermoakustische Versuchsträger wurde in bestehende Infrastruktur integriert und für die Inbetriebnahme (Überprüfung Dichtheit, Funktionalität, Ansteuerungsverhalten der Komponenten) vorbereitet. Im Zuge der experimentellen Validierung des Versuchsträgers werden Betriebspunktmessungen mit den Arbeitsmedien Luft und Helium unter Variation der Betriebsdrücke und Antriebstemperaturen als auch anschließende Messdatenauswertungen durchgeführt.

2.6 Aufbau der Arbeit

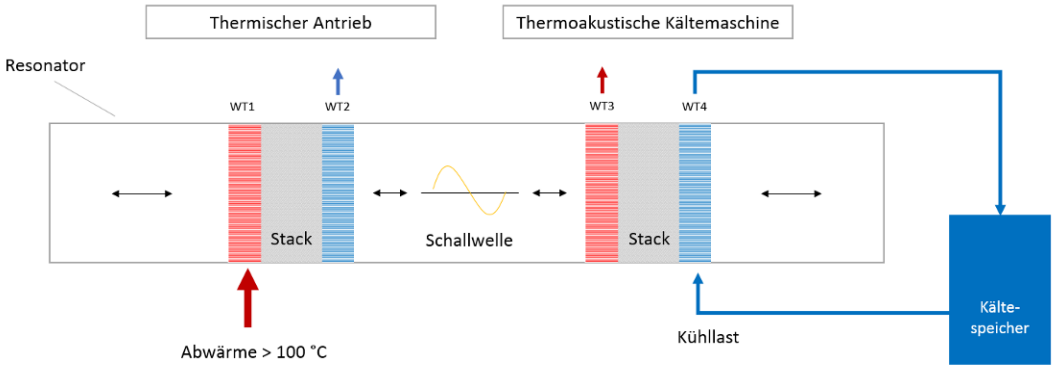
Der vorliegende Bericht adressiert weiterführend in Kapitel 3 eine inhaltliche Darstellung der Thematik mit einer Beschreibung der Technologie der Thermoakustik. Des Weiteren wird auf die Methodik und das Komponentendesign für die gebäudetechnische Anwendung, die Konstruktion thermoakustischer Wärmepumpen-Versuchsträger und die experimentelle Validierung der gebäudetechnischen Integration genauer eingegangen. Kapitel 4 und Kapitel 5 zeigen Ergebnisse aus den Arbeitspaketen, Erkenntnisse die daraus abgeleitet werden konnten und den weiteren Forschungsbedarf.

3 Inhaltliche Darstellung

3.1 Thermoakustik als Schlüsseltechnologie

Ein thermoakustisches System wandelt Wärmeenergie in mechanische Energie in Form von Schallwellen um (Wärmekraftmaschine) oder umgekehrt Schallenergie in Wärme oder Kälte (Wärmepumpe/Kältemaschine). Das System besteht im einfachsten Fall aus einer Röhre, gefüllt mit einem Gas. In dieser befindet sich ein Wärmetauscher-Paket mit möglichst großer Austauschfläche, mit inzwischen gestapelten Metallplatten (Stack/Regenerator), welches an einem Ende mit einer Wärmequelle und am anderen mit einer -senke verbunden ist. Übersteigt der Temperaturgradient einen kritischen Wert, entsteht eine mechanische Druckwelle, die sich mit Schallgeschwindigkeit fortbewegt und mechanische Energie

transportiert. Die Thermoakustische-Zelle wird mit einem akustischen Resonator verbunden, in dem ein starkes akustisches Feld angeregt wird. Der Energieübertrag findet entlang des Wärmetauschers statt, genauer an der thermischen Grenzschicht, die sich entlang der Platten ausbildet. Der Antrieb der TA-Anlage kann thermisch über Abwärme oder elektrisch über Linearmotoren/Lautsprecher erfolgen.



Thermischer Antrieb		Thermoakustische Kältemaschine	
Temperatur Antrieb WT1	> 100 °C	Wärmesenke WT3	
Temperatur Antrieb WT2	10 – 20 °C	Kühlung WT4	5 – 20 °C

Abbildung 3-1 Prinzip thermoakustischer Effekt mit linearem Aufbau; geschlossene Röhre mit stehender Welle

In Europa ist das Thema Thermoakustik zwar bekannt, jedoch gibt es kaum Anwendungen in Verbindung mit gebäudetechnischer Integration. Auf Basis des aktuellen Stands der Technik ergeben sich diesbezüglich folgende Fragestellungen:

- Welche thermoakustischen Wärmepumpen-Konzepte (z.B. einstufig vs. mehrstufig, stehende vs. fortschreitende Welle) eignen sich für gebäudetechnische Anwendungen?
- Nach welcher Designmethodik müssen die einzelnen Komponenten (z.B. Resonator, Wärmetauscher) für die Anwendungen im Gebäude ausgelegt werden?
- Welche Arbeitsbedingungen eignen sich besonders für die Anforderungen der Gebäudetechnik? (z.B. Arbeitsmedium, Arbeitsdruck, Druckverhältnis)
- Wie können thermoakustische Wärmepumpen-Konzepte optimal ins Gebäude integriert werden? (z.B. hinsichtlich des Wärmeabgabesystems, hinsichtlich der Erzeugung von erzwungener Konvektion mit hochenergieeffizienten Pumpen aber auch hinsichtlich der Eindämmung von Schallemissionen)
- Welche Wärmequellen eigenen sich für den Einsatz verschiedener thermoakustischer Wärmepumpen-Konzepte? (z.B. Solarthermie, Erdwärme, Abluft)
- Welche regelungstechnischen Anforderungen ergeben sich für unterschiedliche thermoakustische Wärmepumpen-Konzepte? (z.B. bei thermisch aktivierter Gebäudemasse, bei langer Laufzeit bei geringer Leistung, oder bei speziellen Nutzeranforderungen)

- Wie können thermoakustische Wärmepumpen-Konzepte die unterschiedlichen Anforderungen der Nutzer und des Gebäudes für Heizen und Kühlen energieeffizient erfüllen? (z.B. bezüglich Warmwasserbereitung, bei dezentralen Anwendungen)

Erkenntnisse daraus lassen auf folgende Vorteile thermoakustischer Systeme schließen und rechtfertigen den Einsatz in der Gebäudetechnik:

- In thermoakustischen Systemen wird üblicherweise Helium oder Argon als Arbeitsmedium verwendet, welche im Gegensatz zu in konventionellen Kälte-, Klima- und Wärmepumpenanalagen eingesetzten Kältemitteln kein Treibhausgaspotenzial aufweisen.
- Der Wartungs- und Instandhaltungsaufwand sowie Lärmemissionen aufgrund wenig bewegter Teile in thermoakustischen Systemen sind minimal.
- Thermoakustische Anlagen können ohne flüssige Medien betrieben werden.
- Mit Thermoakustik kann Strom in Kälte/Wärme umgewandelt werden, als auch umgekehrt - Der Prozess ist umkehrbar.
- Thermoakustische Anlagen können sowohl mit Abwärme als auch elektrisch betrieben werden.

In Abbildung 3-2 ist eine Möglichkeit der Integration einer thermoakustischen Wärmepumpe in ein Gebäude dargestellt.

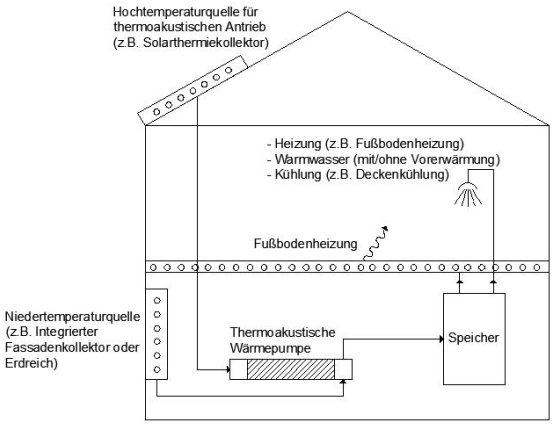


Abbildung 3-2 Schematische Darstellung der Integration der thermoakustischen Wärmepumpe in ein Gebäude für Heizung und Warmwasserbereitung

3.2 Berechnungsmethodik und Komponentendesign für die gebäudetechnische Anwendung

Dieses Kapitel beschreibt die Etablierung einer Berechnungsmethodik für die Komponenten des thermoakustischen Versuchsträgers und Abstimmung auf die gebäudetechnische Anwendung. Darauf basierend werden die Komponenten, insbesondere Antriebseinheit, Resonator, Wärmetauscher und Regenerator für die gebäudetechnischen Anwendungen Heizen, Warmwasser und Kühlen spezifiziert. Die Berechnung der Komponenten erfolgte für die jeweilige Anwendung geeigneten Arbeitsdrücke, -temperaturen und -medien.

3.2.1 Randbedingungen Berechnungsmethodik

Der Versuchsträger wurde auf einen Betriebsdruck von 15 – 25 bar und einen oszillierenden Druck von +/- 1 bar bei Frequenzen von ca. 100 Hz ausgelegt. Als Arbeitsmedium wird Helium verwendet. Temperaturbereiche für verschiedene Anwendungsgebiete (Kühlen, Heizen, Warmwasserbereitung) unter Teillastbedingungen und Nennlast wurden anhand der ÖNORM 14825 und ÖNORM 14511 definiert. Weiters wurden für den thermischen Antrieb mittels Solarthermie verschiedene Konzepte berücksichtigt und Arbeitstemperaturen ausgewählt.

Für den thermischen Antrieb wird als Wärmequelle von einer Eintrittstemperatur von 120-130°C und an der Wärmesenke von 10-20 °C ausgegangen. An der Wärmepumpeneinheit wird an der Wärmesenke mit Temperaturen für den Heizbetrieb von 30-35°C (Warmwasser 45-55°) und an der Wärmequelle mit Temperaturen zwischen 10-20°C gearbeitet. Als Medium wird sowohl Wasser als auch ein Propylenglykol-Gemisch mit einem Mischverhältnis 70/30 % im externen Kreis zur Konditionierung verwendet. Als Wärmequellen sind Außenluft, Erdkollektoren oder auch z.B. Abluft einer Wohnraumlüftung oder Fassadenelemente/-Betonkollektoren möglich.

3.2.2 Overall Design

Der thermoakustische Versuchsträger ist für Heiz- und Kühlanwendungen im Leistungsbereich <2kW vorgesehen. Um mögliche Designvarianten einzuschränken, wurde eine Literaturstudie hinsichtlich Entwicklungen im Bereich effizienter thermoakustischer Systeme durchgeführt. Aufgrund der geringen Verfügbarkeit von mechanischen Antrieben und hoher Preise für den geplanten Leistungsbereich wurde ein thermischer Antrieb, z.B. mittels Solarthermie verwendet. Unter Berücksichtigung des niedrigen Temperaturniveaus der Solarthermie im Bereich von 120°C sind mehrstufige Systeme besser geeignet und Designs mit fortschreitender Welle versprechen eine gesteigerte Effizienz im Vergleich zu einem Design mit stehender Welle. Um Entscheidungen hinsichtlich des Designs des thermoakustischen Versuchsträgers zu unterstützen, wurden externe Experten der Firma EQUIUM und Aster Thermoacoustics hinzugezogen (EQUIUM, 2021 & Aster

Thermoacoustics, 2021). Daraufhin wurde eine 4-stufige, ringförmige Anordnung mit zwei Antriebseinheiten und zwei Wärmepumpeneinheiten als EEPP-Konfiguration (E=engine,P=heat pump) gewählt. Das Konzept soll sowohl Heiz-, Kühl- als auch Warmwasseranwendungen abdecken.

Der thermoakustische Versuchsträger besteht aus vier identen thermoakustischen Kernen (zwei Antriebseinheiten, zwei Wärmepumpeneinheiten), die in einem geschlossenen Kreislauf mit Resonanzrohren verbunden sind. Hinsichtlich der Ausrichtung der zylindrischen Kerngehäuse gibt es zwei Möglichkeiten – axial oder quer zu den Resonanzrohren. Beide Optionen bieten Vor- und Nachteile in Bezug auf den volumetrischen Wirkungsgrad, Dichtungsprobleme, die Menge an Totraum etc. Wegen der geringeren Anzahl an Dichtflächen und der größeren Freiheit bei der Gestaltung des Wärmetauschers wurde die axiale Anordnung gewählt, dargestellt in Abbildung 3-3.

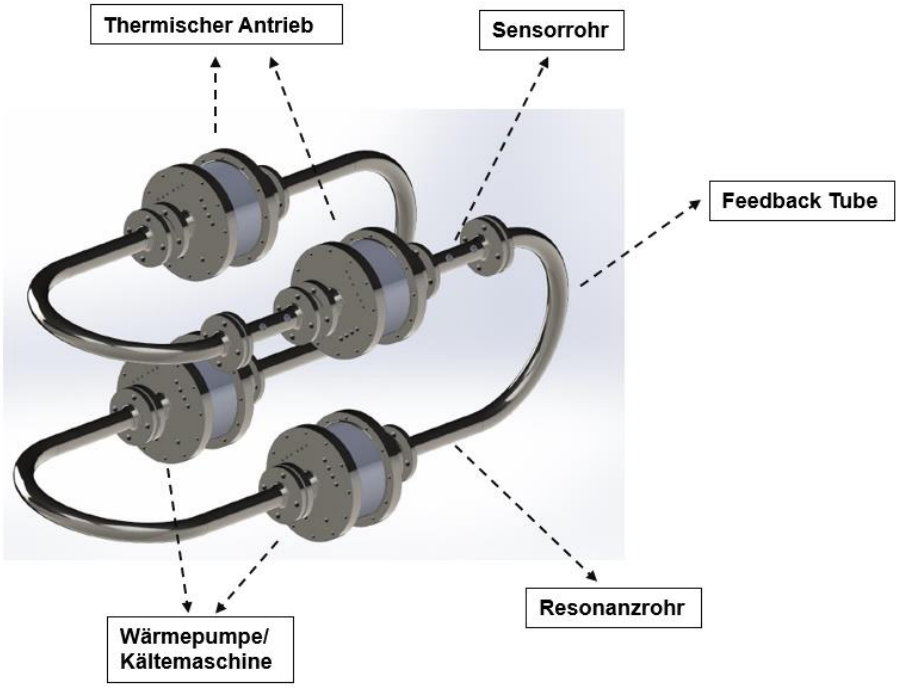


Abbildung 3-3 Design thermoakustischer Versuchsträger bestehend aus vier identen thermoakustischen Kernen mit axialer Anordnung der zylindrischen Kerngehäuse

3.2.3 Wärmetauscher-Design

Der Wärmeüberträger ist die zentrale Komponente in thermoakustischen Systemen, welcher der Übertragung der Wärme des flüssigen Mediums auf das gasförmige Medium dient. Das Design der Wärmetauscher für thermoakustische Anwendungen wurde durch die Verfügbarkeit geeigneter Geometrien limitiert. Die Integration rechteckiger Wärmetauscher in die zylindrischen Kerne erfordert eine besondere Anordnung der Elemente und Dichtflächen, um Verluste durch schwingende Totvolumina zu vermeiden. Abbildung 3-4 zeigt die Integration eines Wärmetauschers in den zylindrischen Kern, sowie erforderliche

Umgebungsbedingungen und Dichtflächen zwischen statischem und dynamischem Druck, welche bei der Konstruktion zu berücksichtigen sind.

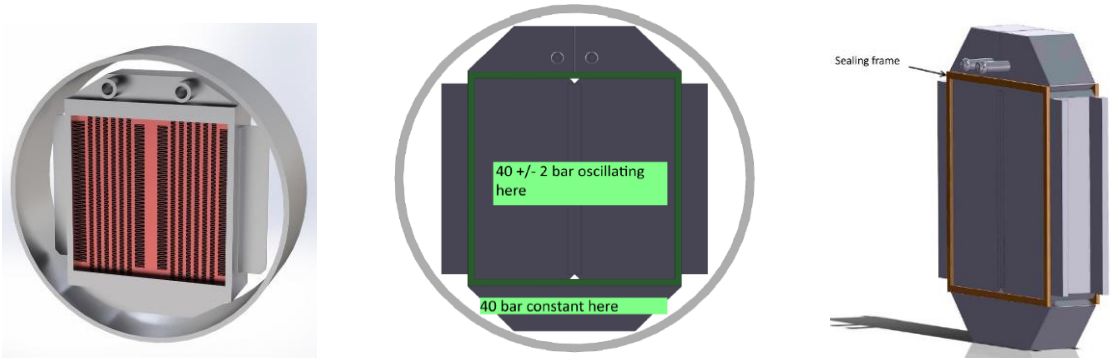


Abbildung 3-4 Detail Integration Wärmetauscher in zylindrischen Kern (links); Druckbereiche im thermoakustischen Kern (mittig); Dichtflächen (orange) zwischen Wärmetauscher und Regenerator (rechts)

Unter Berücksichtigung der zuvor beschriebenen Faktoren erschien ein „fin-and-tube heat exchanger“- Design für die thermoakustische Anwendung am besten geeignet. Seitens vieler Fertiger war dieses Design unter den gewünschten Druckverhältnissen nicht realisierbar, weshalb auf ein alternatives Konzept ausgewichen werden musste. Das finale Design der Wärmetauscher ist eine plate&bar Ausführung aus Aluminium mit gewellten Lamellen. Dieser Lamellentyp in plate&bar Ausführung basierend auf einem heavy duty oil Wärmetauscher wurde aus den verfügbaren Optionen gewählt, da er den Anforderungen des thermoakustischen Versuchsträgers am ehesten entsprach. Die Außenabmessungen und Einbaulagen wurden an die Konstruktion und Anforderungen des thermoakustischen Versuchsträgers angepasst. Das finale Design des Wärmetauschers ist in Abbildung 3-5 dargestellt.

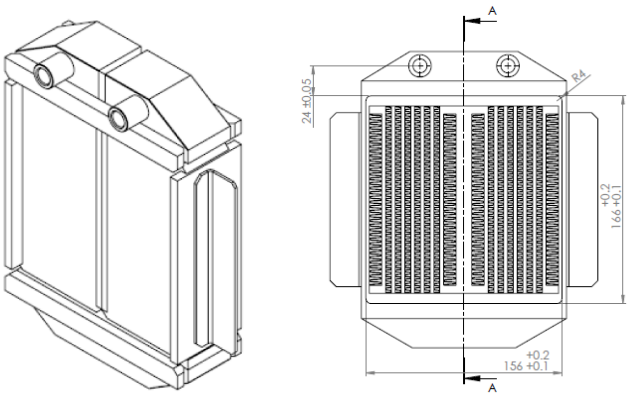


Abbildung 3-5 Detaildesign Wärmetauscher

3.2.4 Auslegungssimulation

Nach einem groben Entwurf und der Identifizierung möglicher Optionen für das Design der Wärmetauscher wurden erste Versuche für ein mögliches Modell der thermoakustischen Wärmepumpe in der Simulationssoftware DeltaEC (2021) für thermoakustische Anwendungen abgebildet. Zur Validierung der Simulationsmethode wurde die Arbeit von Dhuchakallaya & Saechan (2017) herangezogen, welche auch gute Übereinstimmungen zeigte. Basierend auf den Erkenntnissen wurden Modelle eines 4-stufigen Designs mit fortschreitender Welle entworfen und simuliert. In Abbildung 3-6 sind die Ergebnisse der Simulation dargestellt. Das Verhalten der letzten Stufe (bei x = 4,3) sollte mit dem der Stufe 3 (bei x = 3) übereinstimmen, dh. das Verhalten einer Wärmepumpeneinheit und nicht das einer Antriebseinheit zeigen. Ebenfalls konnten die korrekten Temperaturen in der Resonanzröhre nicht erfüllt werden.

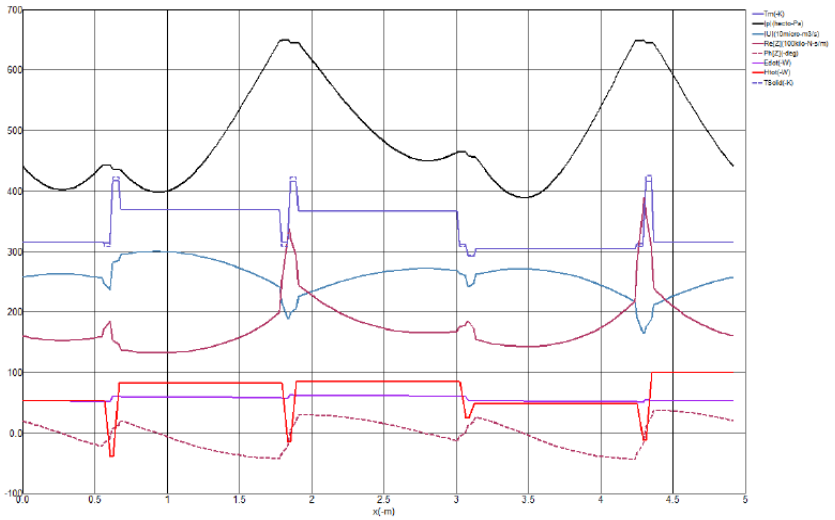


Abbildung 3-6 Ergebnisse der Simulation des thermoakustischen Systems mit fortschreitender Welle (DeltaEC, 2021)

Trotz der vielversprechenden Resultate der Validierung erwies sich der Übergang zu einem funktionierenden Modell eines thermoakustischen Systems mit fortschreitender Welle als nicht realisierbar. Numerische und Konvergenzprobleme verhinderten eine Konfiguration und ein Systemverhalten, welches in sinnvollen Ergebnissen resultiert. Vorläufige Simulationsergebnisse externer Experten (alternatives Tool) wurden zur Validierung eigener Simulationen herangezogen. Die erwarteten Betriebsparameter konnten dennoch trotz einer Vielzahl von Modifikationen und Designiterationen nicht erreicht werden.

Weitere Simulationsversuche erfolgten mit einem alternativen Tool. Im Vergleich zu DeltaEC bietet dieses eine bessere Anbindung an andere Komponenten eines thermoakustischen Prüfstands und eignet sich gut um physikalische Komponenten separat zu modellieren, was Vereinfachungen bietet. Dabei konnten einfache Modelle basierend auf Bilanzgleichungen erstellt werden. Es stellte sich jedoch heraus, dass die Implementierung aller für eine realistische Simulation des thermoakustischen Versuchsträgers notwendigen

strömungsmechanischen und thermoakustischen Relationen laut DeltaEC nicht mit vertretbarem Aufwand realisierbar sind.

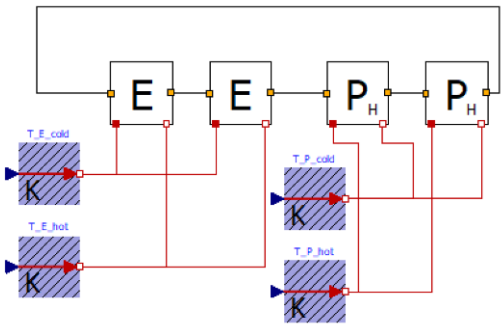


Abbildung 3-7 Modell des thermoakustischen Systems

Aufbauend darauf wurden externe Partner, mit jahrelanger Expertise im Bereich der Thermoakustik hinzugezogen um bei der Auslegungssimulation zu unterstützen. Die Firma EQUIUM (2021) (ehemals HEKYOM) in Frankreich erstellte umfangreiche Simulationen, dadurch konnte eine valide Auslegungsrechnung für den Versuchsträger sichergestellt werden.

Es zeigte sich, dass die Leistung des thermoakustischen Versuchsträgers stark vom Wärmeaustausch der Flüssigkeitsseite abhängt. Die Simulationen zeigen, dass die Leistung durch die Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten von 2000 W/m^{2}K auf 4000 W/m^{2}K deutlich gesteigert werden kann, der Gütegrad wird dadurch von 0.255 auf 0.285 verbessert. Zusätzlich zeigt die Erhöhung des Systemdrucks eine einhergehende Steigerung der Kälteleistung als auch des Gütegrads. Aufbauend darauf wurden weitere Simulationen mit optimierten Startbedingungen durchgeführt, was die Konvergenz, der von DeltaEC verwendeten Multi-Shooting-Methode ermöglichte.

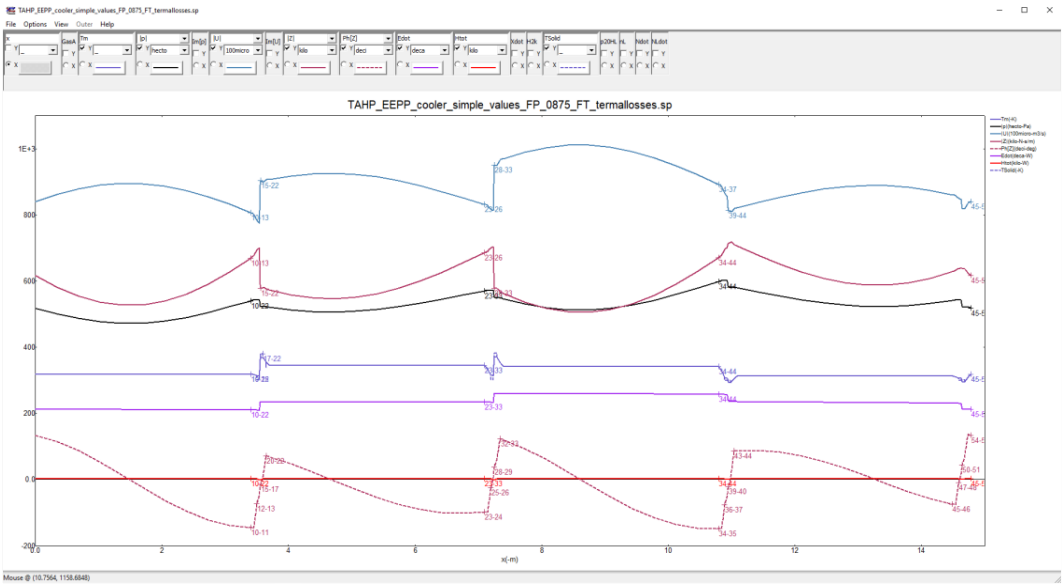


Abbildung 3-8: Mit DeltaEC erreichte Simulationsergebnisse.

Die Berechnungsdomäne startet hier mit der Resonanzröhre vor dem ersten Motor. Qualitative Übereinstimmung mit den Ergebnissen externer Experten wurden erreicht, wobei hier eine große Unsicherheit in den schwierig zu charakterisierenden Performance-parametern der Wärmetauscher besteht. Die untenstehende Abbildung illustriert den Einfluss eines Geometrieparameters des Wärmetauschers auf die erwartete theoretische Kühlleistung und Effizienz. Dies bestätigt die Relevanz der Wärmetauscher als absolute Kernkomponenten eines thermoakustischen Systems.

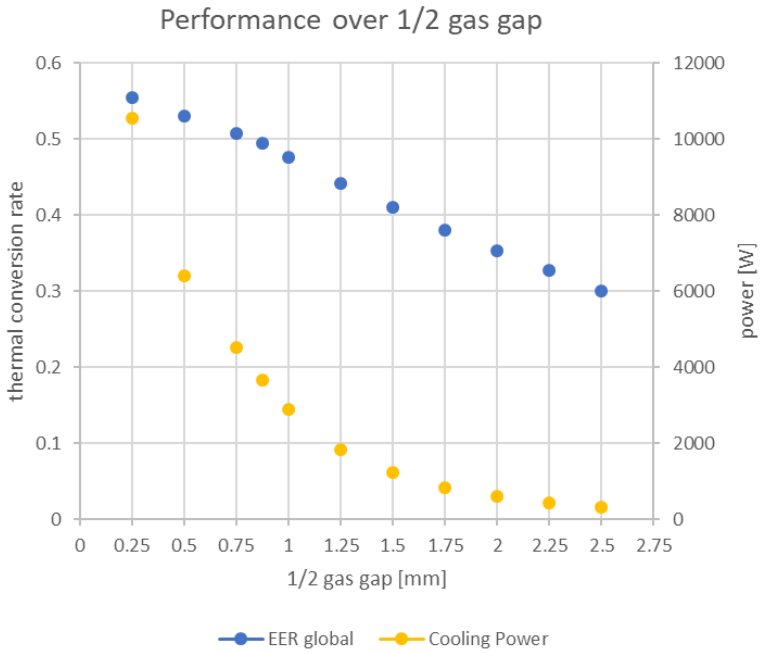


Abbildung 3-9: Änderung der theoretischen Leistungsparameter des Versuchsträger mit variierender Breite der Gaskanäle der Wärmetauscher

3.3 Konstruktion thermoakustischer Versuchsträger

Bei der Konstruktion des thermoakustischen Versuchsträgers wurde darauf geachtet, diesen modular zu gestalten um eine einfache Austauschbarkeit der einzelnen Komponenten zu gewährleisten. Die EEPP-Konfiguration (je zwei Antriebs- und zwei Wärmepumpeneinheiten hintereinander) vereinfacht die Konstruktion aufgrund vier identer Resonanzrohre. Die Verwendung vier identer thermoakustischer Kerne bietet Flexibilität hinsichtlich der Austauschbarkeit einzelner Komponenten. Bei der Konstruktion des thermoakustischen Versuchsträgers sind die Verbindungsstellen der einzelnen Komponenten so auszuführen, dass eine Dichtheit auch bei hohen Drücken gewährleistet wird. Schweißnähte sind so auszuführen, dass diese einen Druck von 40 bar standhalten, Bearbeitungsstellen sollen keine Stufen, Wulste oder Rillen aufweisen. Oberflächen, die das Arbeitsvolumen umschließen, sind mit glatter Oberfläche auszuführen.

Thermoakustischer Kern

Bei der Assemblierung der thermoakustischen Kerne ist eine hohe Präzision bei der Positionierung der einzelnen Komponenten notwendig, um die erforderliche Dichtheit zu gewährleisten. Die akustische Dichtheit muss an den Verbindungsstellen der Komponenten gewährleistet sein. Unebenheiten und Hohlräume sind mit geeigneten Dichtmittel auszugleichen, um Verluste durch Totvolumina zu vermeiden.

Der zylindrische Behälter wird durch zwei Flansche begrenzt, die mit den Resonanzrohren, welche dem Transport der Energie der fortschreitenden Welle dienen, verbunden sind. Es wurde darauf geachtet, den Aufbau modular zu gestalten um eine Austauschbarkeit der Komponenten (insbesondere der Wärmetauscher) zu gewährleisten. Abbildung 3-10 und Abbildung 3-11 zeigen die Anordnung der Komponenten eines thermoakustischen Kerns im Detail.

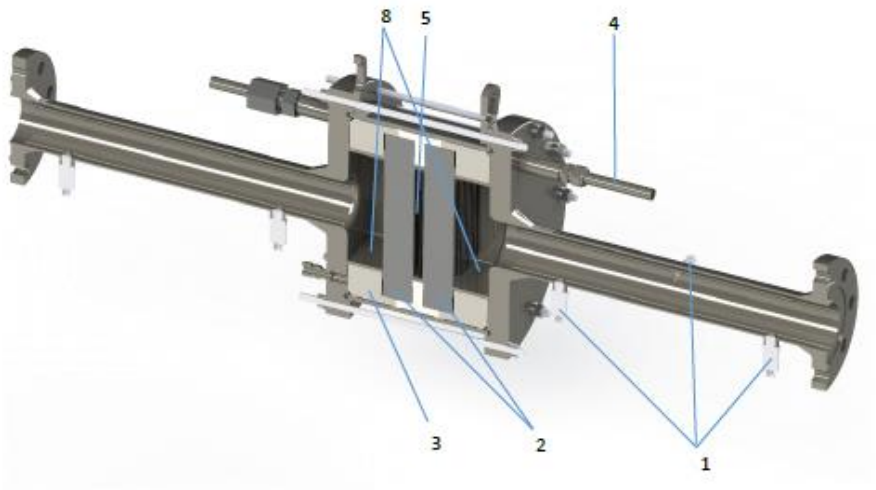


Abbildung 3-10 Detail eines thermoakustischen Kerns mit zwei Wärmetauschern, zentralem Regenerator und Verbindungselementen

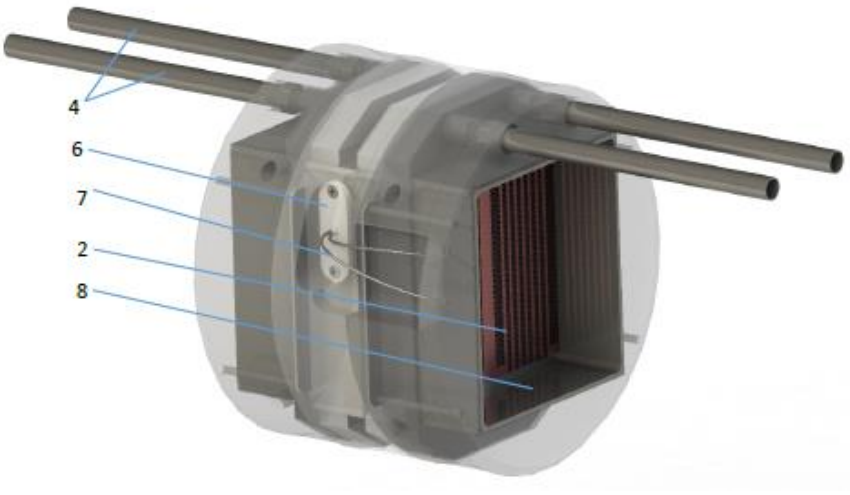


Abbildung 3-11:Thermoakustischer Kern – Innenansicht

1 *Druck- und Temperatursensor*
2 *Wärmetauscher*
3 *Isolation*
4 *Vor- und Rücklauf für externe Kreise*
5 *Regenerator*
6 *Flansch für Thermoelemente*
7 *Thermoelement Führungsrohre*
8 *Thermische Pufferzone*

Wärmetauscher

Das Wärmetauscher-Design, welches aufgrund der besonderen Geometrie und der Druckverhältnisse stark von konventionellen Modellen abweicht, erforderte mehrere Iterationen bis ein realisierbares Design definiert werden konnte. Ein langer Konstruktions- und Abstimmungsprozess mit Fertigern mündete in der Fertigung verschiedener Prototypen einer „plate-and-bar"-Ausführung aus Aluminium mit gewellten Lamellen. Nach einer detaillierten Analyse der Prototypen fiel die Entscheidung, aufgrund der höheren Wärmeübertragungsfläche, zugunsten des in Abbildung 3-12 dargestellten Designs. Der aufgesetzte Rahmen in Strömungsrichtung um das Lamellenpaket des Wärmetausches ist erforderlich um Dichtflächen für die Abdichtung zwischen Regenerator und Wärmetauscher zu schaffen. Bei der Untersuchung der Prototypen wurden Fertigungsungenauigkeiten festgestellt. Unterbrochene Schweißnähte im Arbeitsbereich und auf der Innenseite des Rahmens, insbesondere die nicht voll aufgefüllt und geschweißten oberen und unteren Rahmenteile, die unter der Oberfläche Hohlräume bilden, sind problematisch (Abbildung 3-12 rechts). Diese Hohlräume bilden akustische Elemente, welche akustische Leistung aus dem System abzweigen. Da rechteckige Wärmetauscher in zylindrische Kerne verbaut werden, ist die Isolierung und Abdichtung von Hohlräumen äußerst wichtig, um Verluste durch Totvolumina zu vermeiden. Das Design der Dichtstellen wurde überarbeitet, um Schwierigkeiten bei der Fertigung zu verringern.

Abbildung 3-12 Detail thermoakustischer Wärmetauscher; rechts: Fertigungsungenauigkeiten im Detail - unterbrochene Schweißnähte und Hohlräume

Regenerator

Als Regenerator/Stack wird ein thermisch kapazitiver Speicher zwischen heißem und kaltem Wärmetauscher bezeichnet, welcher ein Temperaturgefälle zwischen diesen erzeugt. Regeneratoren stellen sicher, dass die Wärmeübertragung ausschließlich zwischen den beiden Wärmetauschern im gasförmigen Medium stattfindet. Für Regeneratoren geeignete Materialien zeichnen eine geringe Wärmeleitfähigkeit und hohe Wärmekapazität aus. Die Regeneratoren des thermoakustischen Versuchsträgers bestehen aus einem Rahmen und Frontblechen mit dazwischenliegenden Drahtgewebeplatten. Die Querschnittsfläche ist identisch mit der des Wärmetauschers.

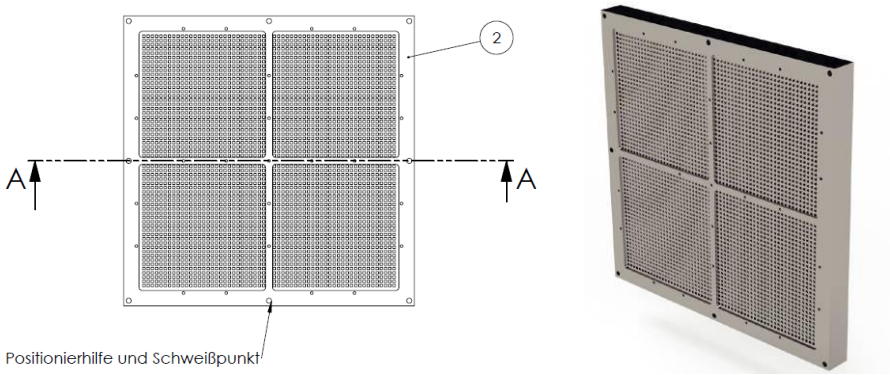


Abbildung 3-13 Detail Regenerator

Isolation und Puffer

Die Isolatoren um die zentralen Bauteile im thermoakustischen Kern dienen dazu die thermischen Verluste an die Außenhaut zu verringern. Zusätzlich wird durch die Verdrängung und Unterteilung des Volumens vom Arbeitsgas die Konvektion auf ein Minimum reduziert. Der mittlere Teil (Regenerator-Isolation) dient unteranderem dazu den Regenerator mit den Wärmetauschern im Core zu zentrieren und positionieren. Bei der Materialwahl der Isolatoren ist eine Temperaturbeständigkeit von mindestens 150°C zu berücksichtigen. Aufgrund der Verwendung von Helium und dessen hoher thermischen Leitfähigkeit werden Isolatoren mit Materialen aus festem PTFE verwendet und poröse Medien vermieden. Des Weiteren stellen Rahmen zwischen Wärmetauscher und Resonanzröhren einen thermischen Puffer dar.

Resonanzrohre

Die Resonanzrohre sind für den Transport der fortschreitenden Welle im System zuständig und sind via Flansch mit den Kernen über eine Länge von gesamt 3,5 m verbunden.

Sensorik

Am Versuchsträger kommen sowohl Temperatur- als auch Drucksensoren zum Einsatz. Thermoelemente werden sowohl entlang der Resonanzrohre als auch im Kern an Vorder- und Rückseite der Wärmetauscher als auch im Regenerator installiert. Zur Messung von

etwaigen Druck-Phasenverschiebungen werden die Drucksensoren in den Resonanzrohren mit Hilfe der Zwei-Sensormethode ausgeführt.

Assemblierung

Abbildung 3-14 bis Abbildung 3-16 zeigen das Modell des zusammengebauten und aufgeschlüsselten Kerns als auch die dazugehörigen gefertigten Teile. In Abbildung 3-17 und Abbildung 3-18 ist der vollständig assemblierte thermoakustische Versuchsträger ersichtlich.

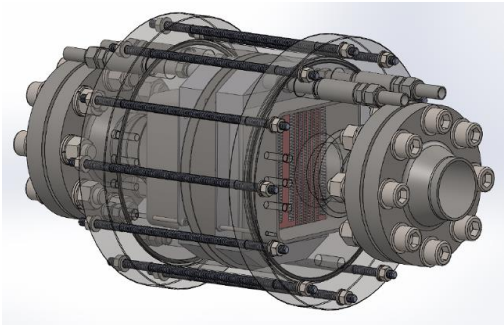


Abbildung 3-14: Modell eines assemblierten thermoakustischen Kerns

Abbildung 3-15: Aufgeschlüsselter thermoakustischer Kern

Abbildung 3-16: Assemblierung thermoakustischer Kern

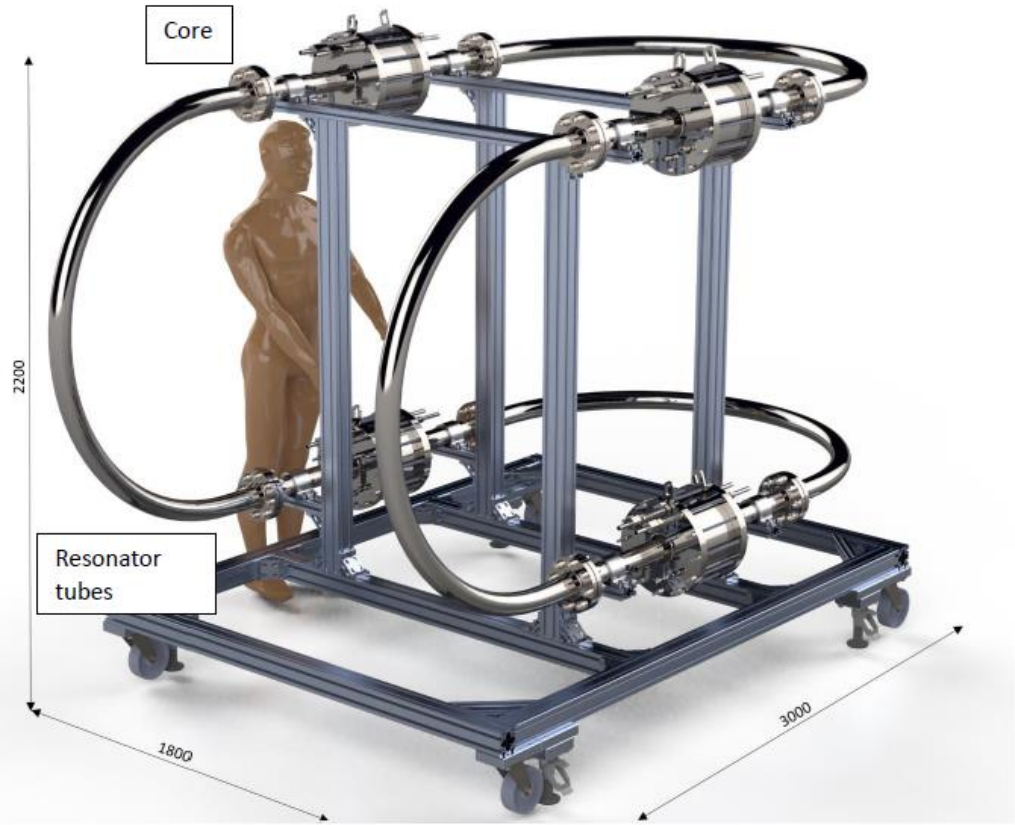


Abbildung 3-17: Modell des assemblierten Versuchsträgers

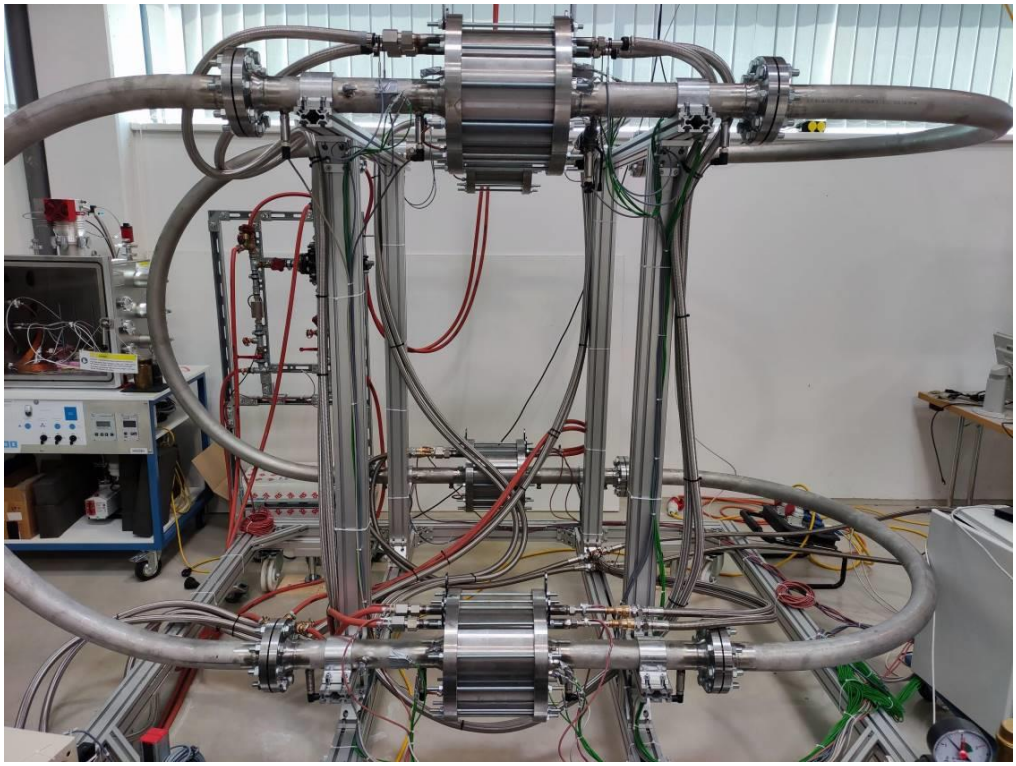


Abbildung 3-18: Assemblierter thermoakustischer Versuchsträger

3.4 Experimentelle Validierung thermoakustischer Versuchsträger

3.4.1 Inbetriebnahme des thermoakustischen Versuchsträgers

Der thermoakustische Versuchsträger wurde mit vorhandenen Prüfständen und Infrastruktur fusioniert und mit Messtechnik ausgestattet. Hier wurden sowohl invasive als auch non-invasive Temperatursensoren zur Vermessung der acht Wärmetauscher an Wärmequelle, Wärmesenke, Antriebs- und Kältekreis, integriert. Steuerungs- und Regelungsprozesse, Speichervorgänge sowie die Visualisierung werden über die Software LabVIEW der Firma National Instruments (2021) als Datenerfassung realisiert. Die Integration des Versuchsträgers in bestehende Infrastruktur ist in Abbildung 3-19 dargestellt.

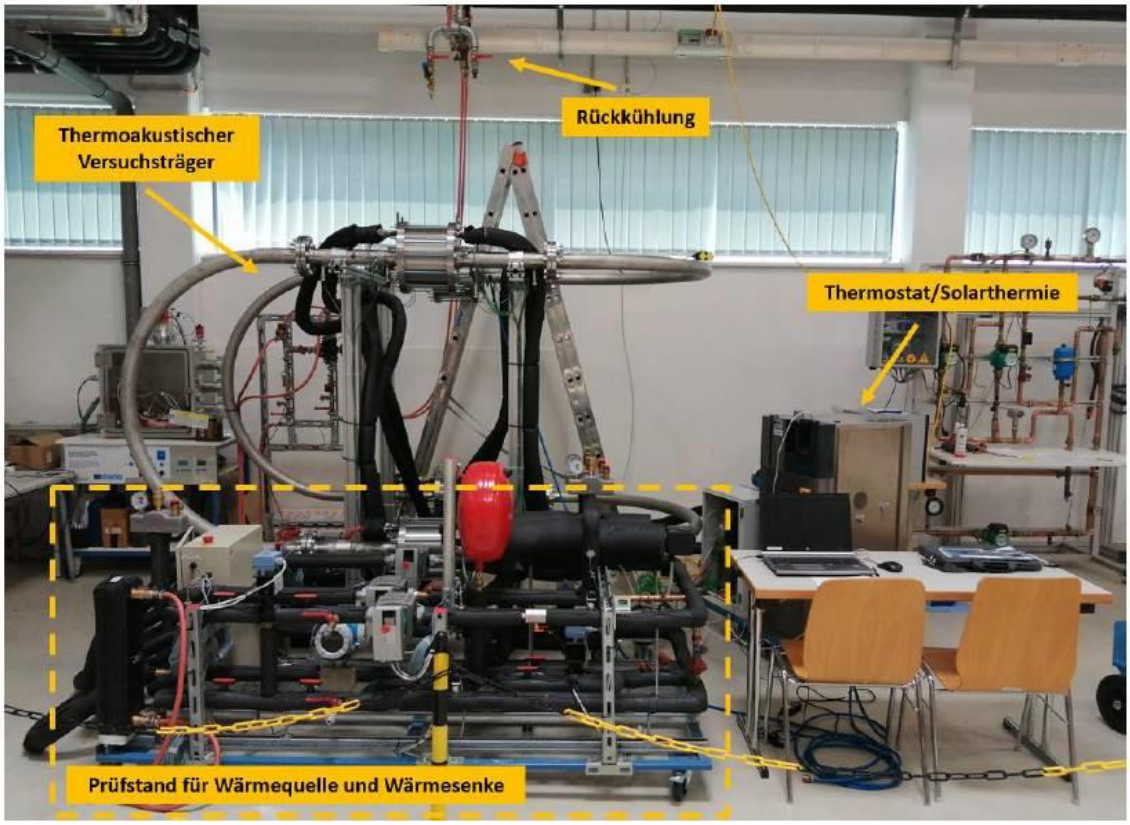


Abbildung 3-19 Integration thermoakustischer Versuchsträger in bestehende Infrastruktur und Fusionierung mit Prüfstand für Wärmequelle und -senke

Der Versuchsträger ist wie folgt konzipiert, zwei thermoakustische Kerne fungieren als Antrieb und zwei als Wärmepumpe/Kältemaschine (Abbildung 3-20). Die Konditionierung der Temperaturen für Wärmequelle und -senke erfolgt über den gekoppelten Prüfstand für Wärmequelle und -senke. Über den Kältekreis erfolgt die Rückkühlung der Restwärme der Wärmepumpeneinheiten sowie die Aufprägung der Kaltwassertemperatur an den Antriebseinheiten. Die erforderlichen Temperaturen der Antriebseinheiten werden mit einem Thermostat zur Simulation der thermischen Energie aus Solarthermie bereitgestellt. Abbildung 3-21 zeigt eine schematische Darstellung des thermoakustischen Versuchsträgers inklusive der Schnittstellen zu den externen Applikationen.

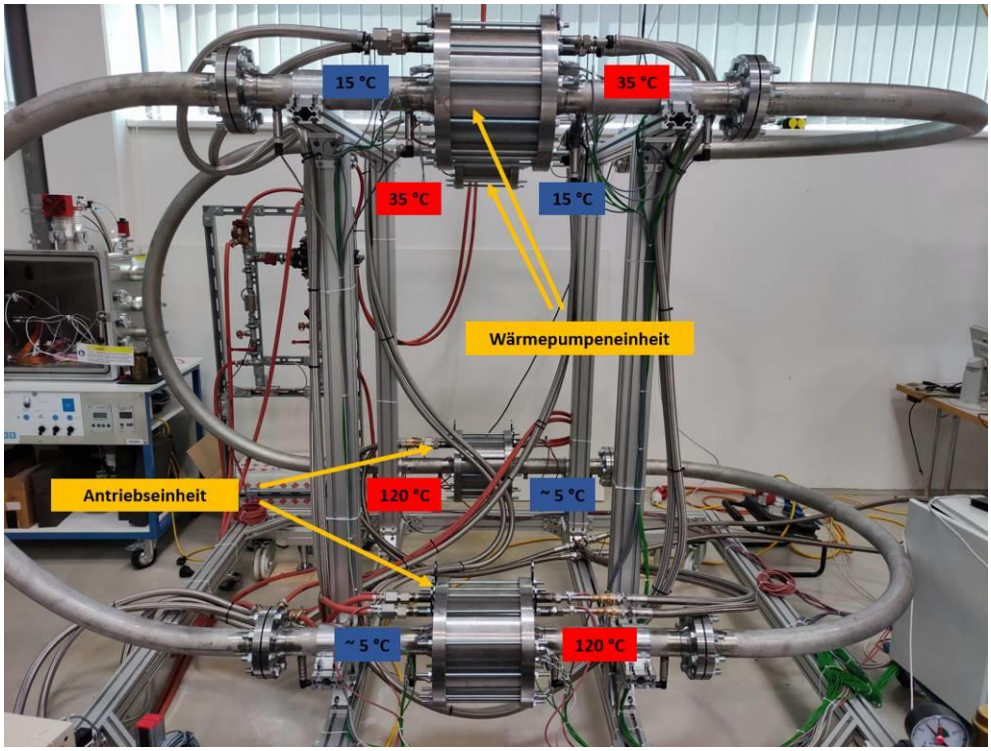


Abbildung 3-20 Detail thermoakustischer Versuchsträger mit erforderlichen Temperaturen an Wärmequelle und -senke sowie Antrieb

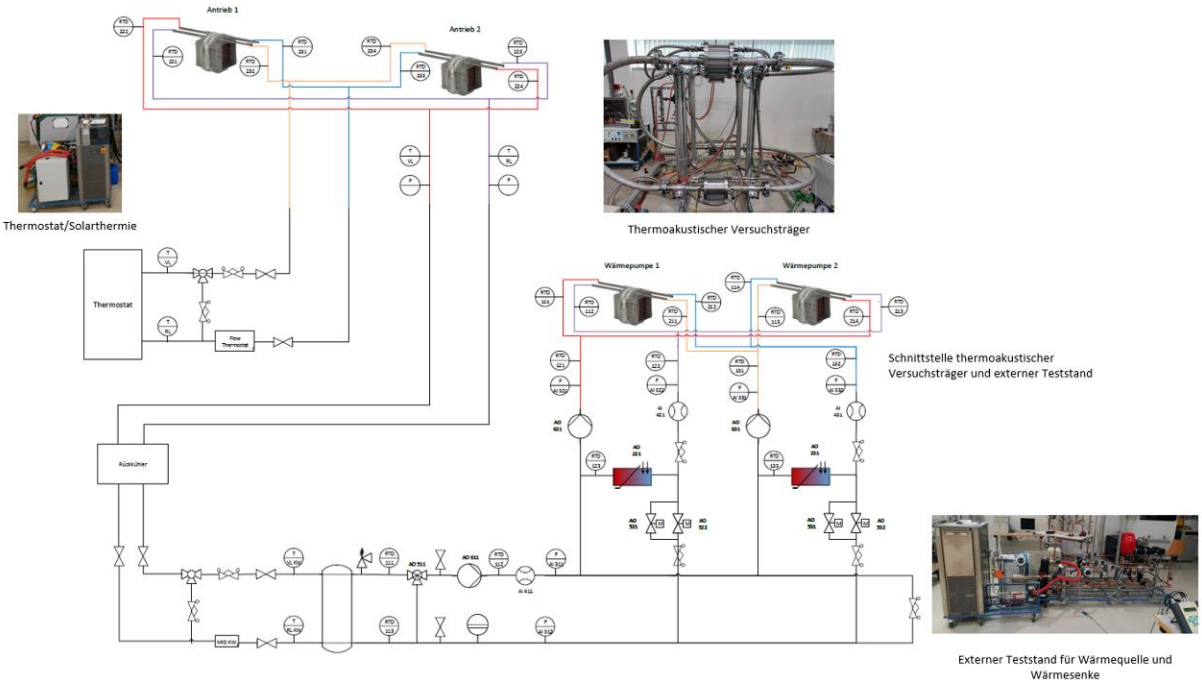


Abbildung 3-21 Schematische Darstellung thermoakustischer Versuchsträger und Schnittstellen zu Prüfstand für Wärmequelle und -senke, Thermostat und Kältekreis.

Der Prüfstand für Wärmequelle und -senke wurde an den thermoakustischen Versuchsträger sowohl regelungstechnisch als auch hydraulisch angepasst. Ein regelungstechnischer Abgleich ist dahingegen notwendig damit Tests sowohl unter statischen Bedingungen bei verschiedenen Betriebspunkten, als auch dynamische Tests unter zu Hilfenahme der Hardware-in-the-Loop Methode durchgeführt werden können. Die Herausforderung bei der Inbetriebnahme besteht darin den externen Prüfstand sowohl auf Kondensator- als auch Verdampferseite möglichst stationär zu halten. Aufgrund einer Kaskadenregelung wird die Regeltemperatur am Eintritt der Wärmetauscher am Prüfstand für Wärmequelle und -senke sowohl von der Rückkühltemperatur als auch von der Beimischtemperatur über den Heizstab vorkonditioniert. Beigemischte Mengen wirken als Störgrößen und beeinflussen das Regelverhalten negativ. Diesbezüglich wird versucht die Temperatur am Austritt des Heizstabes konstant zu halten, was aufgrund geringer Volumenströme und damit verbundenen relativ hohen Totzeiten, herausfordernd ist. Eine Modellierung der Regelstrecke mittels Simulink führte zu einer guten Übereinstimmung zwischen Simulation und experimentellen Versuch und resultierte in optimiertem Regelverhalten des Prüfstandes zur Konditionierung der Betriebspunkttemperaturen.

Zur Gewährleistung der Betriebssicherheit wurden für den thermischen Antrieb (Temperaturen >120°C) Teflon-Sicherheitsschläuche verwendet. Nach erfolgreicher Dichtheitsprüfung wurden zudem die Versorgungsleitungen gedämmt, um Leitungsverluste zu minimieren.

Im Zuge von Funktionstests konnten die verschiedenen Systeme (thermoakustischer Versuchsträger, Prüfstand zur Konditionierung der Temperaturen, Kälte- und Antriebskreis) hinsichtlich Funktionalität und Dichtheit sowie das Ansteuerungsverhalten der Komponenten (Pumpen, Ventile, Sensoren etc.) überprüft werden. Erste Messungen bei unterschiedlichen Betriebspunkten mit dem Arbeitsmedium Luft konnten unter stationären Bedingungen durchgeführt und eine erfolgreiche Inbetriebnahme abgeschlossen werden.

3.4.2 Betriebspunktmessungen

Messungen mit dem Arbeitsmedium Helium (Qualität 4.9) unter Variation der Betriebsdrücke bei 1-15 bar wurden durchgeführt. Dabei erfolgte die Messung der Energieströme an Kondensator, Verdampfer, Kälte- und Antriebskreis, Messung der Temperaturen im thermoakustischen Kern sowie die Messung des stationären und dynamischen Drucks. Die Betriebspunktmessungen zeigten, ein Absinken des Betriebsdruckes im thermoakustischen Versuchsträger (Abbildung 3-22) sowie einen zeitgleichen Anstieg des Druckes im Hauptstrang des Prüfstands für Wärmequelle und -senke (Abbildung 3-24). Eine Verstärkung bei Erhöhung des Betriebsdruckes konnte festgestellt werden. Abbildung 3-23 zeigt den Druckverlauf einer Messung bei einem Betriebsdruck von 15 bar, wobei ein Absinken von 1,5 bar in 30 Minuten zu erkennen ist.

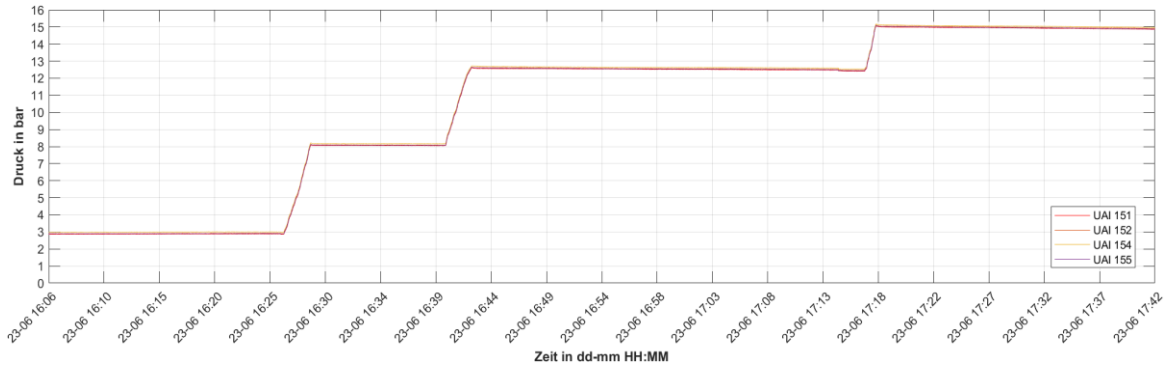


Abbildung 3-22 Betriebsdruck im thermoakustischen Versuchsträger – Wärmepumpe 1

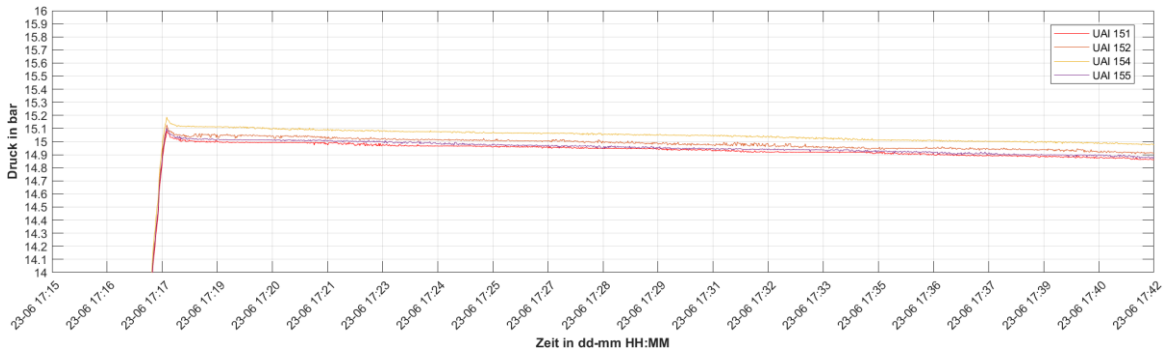


Abbildung 3-23 Betriebsdruck im thermoakustischen Versuchsträger bei 15 bar - Wärmepumpe 1

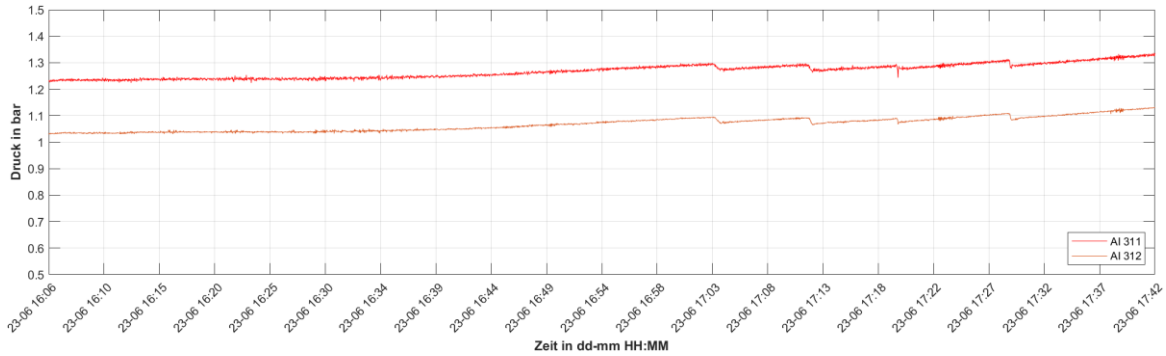


Abbildung 3-24 Betriebsdruck Kondensator- und Verdampferkreis (Prüfstand Wärmequelle/ -senke)

Dem Anstieg des Drucks im Hauptstrang wurde versucht durch laufendes Entlüften entgegenzuwirken (ersichtlich in Abbildung 3-24), dies bewirkte lediglich eine kurzzeitige Verbesserung. Folglich wurde eine Undichtheit der thermoakustischen Kerne vermutet. Der Übertritt von Helium in den Solekreis bewirkt eine Ansammlung des Gases im Kondensator- und Verdampferkreis und verhindert eine gleichmäßige Durchströmung der Wärmetauscher (ersichtlich an den Temperaturen und Massenströmen im Kondensator- und Verdampferkreis). Bei gleichmäßiger Durchströmung sollten die Temperaturen über die Dauer der Messung konstant bleiben. Die Vorlauf- und Rücklauftemperatur von Kondensator und Verdampfer sind in Wärmepumpe 2 über die Dauer der Messung quasi-stationär (Abbildung 3-26). Das Absinken der Temperatur im Kondensatorkreis in Wärmepumpe 1 (Abbildung 3-25), sowie die Reduktion der Massenströme (Abbildung 3-27, Abbildung 3-28) deuten auf eine ungleichmäßige Durchströmung der Wärmetauscher hin.

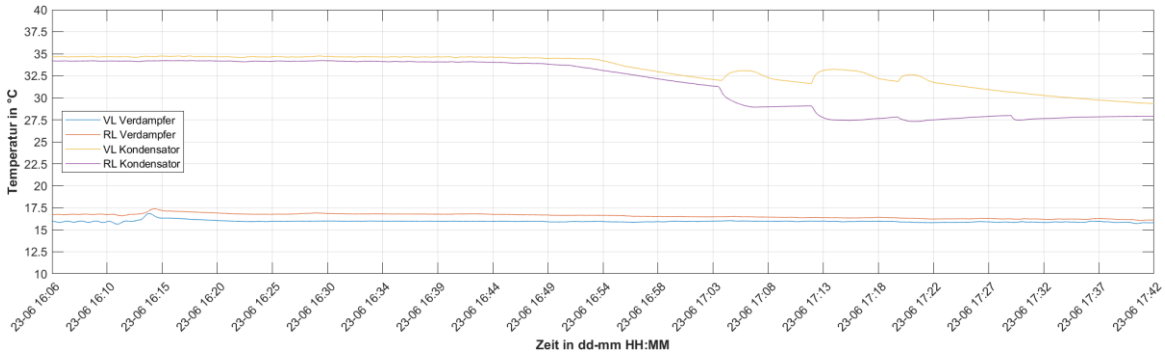


Abbildung 3-25 Vorlauf- und Rücklauftemperaturen Verdampfer und Kondensator – Wärmepumpe 1

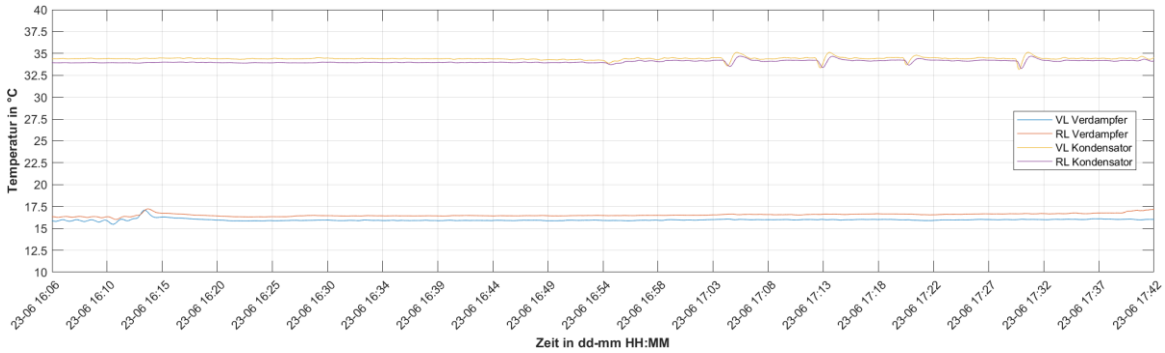


Abbildung 3-26 Vorlauf- und Rücklauftemperaturen Verdampfer und Kondensator – Wärmepumpe 2

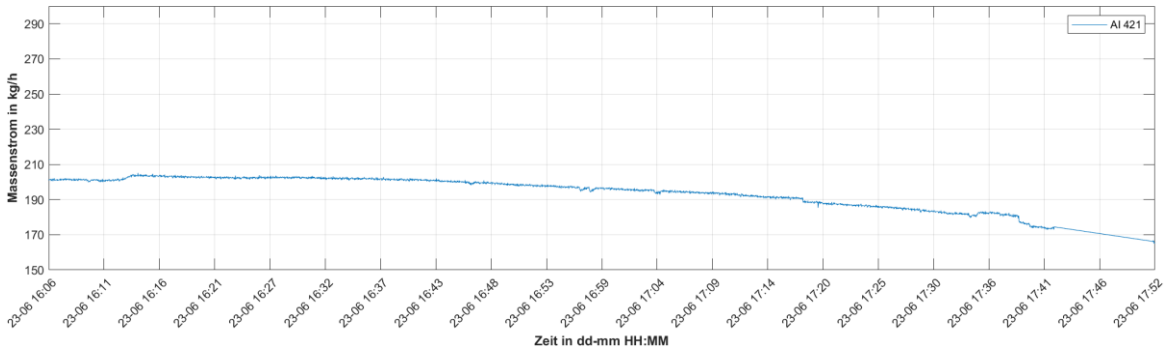


Abbildung 3-27 Massenstrom Kondensator

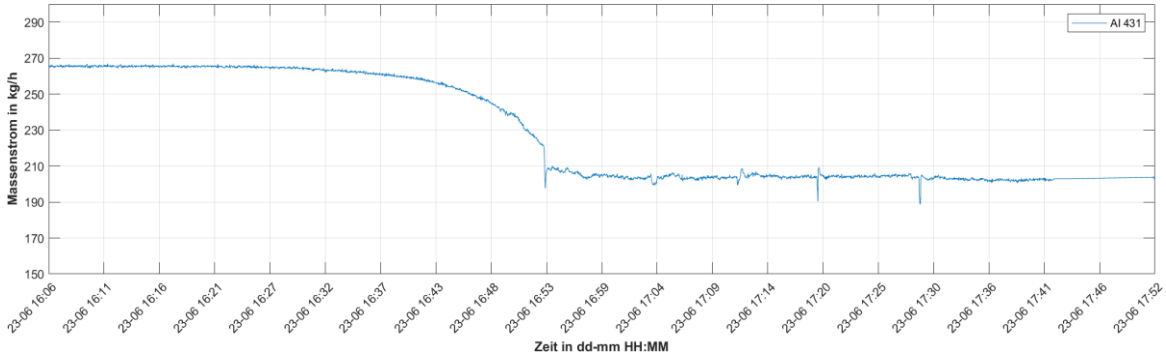


Abbildung 3-28 Massenstrom Verdampfer

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Stationäre Bedingungen hinsichtlich der Temperaturen konnten erreicht werden, jedoch nur über einen kurzen Zeitraum, aufgrund der vermuteten Undichtheit eines oder mehrerer thermoakustischer Kerne. Diese verursacht eine ungleichmäßige Durchströmung der Wärmetauscher einhergehend mit Temperaturschwankungen im Kondensator- und Verdampferkreis. Bei gleichmäßiger Durchströmung der Wärmetauscher und resultierender konstanter Temperaturen im Kondensator- und Verdampferkreis könnte bei einer Veränderung der Leistungen eine Aussage hinsichtlich der Ausbreitung einer akustischen Welle getroffen werden. Aufgrund nicht stationärer Bedingungen und der vermuteten Undichtheit eines/mehrerer thermoakustischer Kerne, ist eine aussagekräftige Beurteilung der Leistung zum jetzigen Forschungsstand noch nicht möglich.

5 Ausblick und Empfehlungen

Bei den bisher erfolgten Messungen wurden die Massenströme von Verdampfer und Kondensator nicht separat gemessen. Um Erkenntnisse über die Aufteilung des Massenstroms auf die beiden Wärmepumpeneinheiten sowie hinsichtlich der Durchströmung der Wärmetauscher zu erhalten, ist eine separate Messung erforderlich. Basierend auf den Ergebnissen dieser Messung kann festgestellt werden, in welchen der thermoakustischen Kerne eine Undichtheit vorliegt. Ein Zerlegen der nicht funktionsfähigen Kerne ist erforderlich, um Erkenntnisse hinsichtlich der undichten Stellen zu erhalten und in einem weiteren Schritt Möglichkeiten der Abdichtung zu untersuchen.

Die Implementierung weiterer Drucksensoren entlang der Resonanzröhren des thermoakustischen Versuchsträgers ermöglicht detaillierte Informationen über die dynamische Druckverteilung in Abhängigkeit der Baulänge. Zusätzlich könnten mittels Ultraschallmessgeräten via Laufzeitdifferenzverfahren, Rückschlüsse auf die Strömungsgeschwindigkeit des gasförmigen Mediums im thermoakustischen Versuchsträger getroffen werden.

Weitere Untersuchungen mittels Oberflächentemperatursensoren und Wärmebildkameras bieten die Möglichkeit Aussagen über die Temperaturverteilung im thermoakustischen Versuchsträger und über den Temperaturgradienten entlang des thermoakustischen Kerns zu treffen.

Optimierungsempfehlungen hinsichtlich der Konstruktion:

- Kompakterer Aufbau des Kerns (z.B. durch Verwendung runder Wärmetauscher) mit Entkoppelung von externen Vor- und Rücklauftemperaturen außerhalb des Kerns bzw. der Druckhülle
- Optimierter Aufbau Wärmetauscher/Wärmeübertragungsflächen für homogene Temperaturverteilung über die Querschnittsfläche

- Runder Aufbau von Kernkomponenten wie Wärmetauscher zur Gewährleistung der Dichtheit
- Einfacherer Aufbau mit einer Antriebseinheit und einer Wärmepumpeneinheit mit Reduktion der bautechnischen Höhe für einfachere Zugänglichkeit und Entlüftung der Anlage
- Anpassung der Lamellenabstände des Wärmeübertragers
- Vorab Planung von invasiver Temperaturmesstechnik unmittelbar an Vorlauf und Rücklauf aller externen Kreise

5.1 Forschungsbedarf

Optimierung der Schlüsselkomponenten

Forschungsaktivitäten bezüglich der Entwicklung der Komponenten thermoakustischer Systeme (speziell Variation der Geometrien und Materialien von Wärmetauscher und Regenerator) zeigen, dass die Effizienz stark von der Spezifikation der Komponenten abhängt. Simulationen zeigen, dass durch die Verbesserung des Wärmeübergangskoeffizienten des Wärmetauschers die Kühlleistung von 1000 W auf 1600 W und der Gütegrad von 0.255 auf 0.285 erhöht werden könnte. Eine Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten ist durch Optimierung der Wärmetauscher-Geometrien und Materialien realisierbar.

Sowohl im gegenständlichen Projekt, als auch im Zuge der Literaturstudie zeigte sich die Problematik der Verfügbarkeit geeigneter Wärmetauscher für thermoakustische Anwendungen. Im Projekt stellten das Design und die Konstruktion der komplexen Kernstücke des thermoakustischen Systems, insbesondere die Wärmetauscher, eine Herausforderung dar. Die Verwendung rechteckiger Wärmetauscher in zylindrischen Kernen erwies sich im Zuge des Projekts als schwierig, da eine besondere Anordnung der Elemente und Dichtflächen erforderlich ist, um Verluste zu vermeiden. Die Erfahrungen, die im Zuge des Projekts gewonnen wurden, bestätigen die Erkenntnisse aus früheren Forschungsprojekten, dass die Ausführung der Wärmetauscher essenziell für die Effizienz eines thermoakustischen Systems ist. Zudem bestimmt die Geometrie der Wärmeübertragungsflächen das Design und die Kompaktheit thermoakustischer Systeme. Durch eine kompaktere Ausführung, zB. eine runde Bauweise der Wärmetauscher, können auch restliche Anlagenteile kompakter und kosteneffizienter ausgeführt werden. Bei Ausführung des Wärmetauschers in runder Bauweise kann eine bessere Anpassung an das thermoakustische System erfolgen und die Herausforderungen bei der Assemblierung (Vermeidung von Totvolumina durch Hohlräume) reduziert werden.

Koppelung mit erneuerbaren Energiequellen

Die Thermoakustik ermöglicht einen bidirektionalen Betrieb, also die Umwandlung von Strom in Wärme/Kälte als auch umgekehrt. Der Antrieb des thermoakustischen Systems kann thermisch über z.B. Abwärme oder Solarthermie, sowie elektrisch über Linearmotoren oder

Lautsprecher erfolgen. Die Verwendung eines elektrischen Antriebs auf Basis von 50 Hz könnte die Koppelung mit netzbetriebenen Anwendungen, wie Strom aus Photovoltaik, Windkraft oder direkt vom Netz ermöglichen. Liefert eine Photovoltaik-Anlage beispielhaft Überschussstrom, so könnte dieser mit Hilfe der elektrisch betriebenen thermoakustischen Anlage für Kühlung/Wärmebereitstellung genutzt werden (Erhöhung der Eigenverbrauchsquote). Umgekehrt kann untersucht werden wie unter Bezug einer „thermischen Hochtemperaturquelle“ wie Solarthermie oder industrieller Abwärme (>120°C) eine Umwandlung von thermischer in elektrische Energie erfolgen kann.

Folglich besteht Forschungsbedarf hinsichtlich folgender Fragestellungen:

- Wie können Wärmetauscher in runder Bauweise gefertigt und in thermoakustische Systeme integriert werden? Welchen Einfluss haben diese auf die Effizienz und Anlagengröße?
- Wie kann die Effizienz der Schlüsselkomponenten (Wärmetauscher, Stack/Regenerator) durch die Auswahl des Materials gesteigert werden?
- Welche alternative Fertigungstechnologien (z.B. 3D-Druck) eignen sich für die Fertigung runder Wärmetauscher-Geometrien?
- Untersuchung des strömungstechnischen Verhaltens unterschiedlicher Wärmetauscher-Geometrien (Kanalführung, Lamellenabstand, etc.) hinsichtlich der Effizienz
- Wie können thermoakustische Wärmepumpen/Kältemaschinen in bestehende Gebäudetechnik eingebunden und mit erneuerbaren Energiequellen wie z.B. Photovoltaik, Wind, Solarthermie bestmöglich gekoppelt werden?
- Wie müssen die Komponenten dimensioniert werden, um die thermoakustische Anlage effizient mit einer Frequenz von 50 Hz betreiben zu können und somit eine Koppelung mit Netzanwendungen zu gewährleisten?
- Wie schnell kann das thermoakustische System auf dynamische Schwankungen erneuerbarer Energiequellen reagieren?
- Welche Regelstrategien sind notwendig um ein bestmögliches Zusammenspiel zwischen Energiequelle (PV, Solar, Wind), Energiesenke (Heizung, Kühlung, Warmwasser) zu ermöglichen bzw. die Eigenverbrauchsquote zwischen Überschussstrom und Netzeinspeisung zu erhöhen?

6 Verzeichnisse

6.1 Literaturverzeichnis

Aster Thermoacoustics (2021): www.aster-thermoacoustics.com

Buchner, C., et al. (2018): Study of Thermoacoustic Electricity Generation for Communication Satellites, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2018

Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2019): Langfriststrategie 2050 – Österreich, abgerufen am 15.12.2021 von Langfriststrategie 2050 (bmk.gv.at)

DeltaEC, (n.d.). https://www.lanl.gov/org/ddste/aldps/materials-physics-applications/condensed-matter-magnet-science/thermoacoustics/computer-codes.php (accessed February 18, 2021).

Dhuchakallaya, I. & Saechan, P. (2017): Design and Experimental Study of a Cascade Thermoacoustic Engine for Remote and Rural Communities. J. Energy Resour. Technol 139, 032004-032004–8

Equium (2021): https://www.equium.fr/

Kromp-Kolb H. et al. (2014): Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014; Austrian Assessment Report (AAR14); abgerufen am 15.12.2021 von http://austriaca.at/APCC_AAR2014.pdf

National Instruments (2021): LabVIEW Professional Development System, LabVIEW 2013, https://www.ni.com/de-at/shop/labview.html

Reissner, A., Gerger, J., Hummel, S., Reißig, J., Pawelke, R. (2014): Development of a Thermoacoustic Stirling Engine Technology Demonstrator, 10th European Space Power Conference, The Netherlands, Noordwijkerhout

Spoelstra, S. et al. (2012): THermoAcoustic Technology for Energy Applications. Acronym: THATEA, Final Report, FP7-Project, downloaded at www.thatea.eu am 24.01.2020

The MathWorks, Inc. (1984-2016): Matlab R2021a

Tijani, H. & Spoelstra, S. (2008): Study of a coaxial thermoacoustic-Stirling cooler. Cryogenics, Volume 48, p.77-82

6.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1 Prinzip thermoakustischer Effekt mit linearem Aufbau; geschlossene Röhre mit stehender Welle 10
Abbildung 3-2 Schematische Darstellung der Integration der thermoakustischen Wärmepumpe in ein Gebäude für Heizung und Warmwasserbereitung 11
Abbildung 3-3 Design thermoakustischer Versuchsträger bestehend aus vier identen thermoakustischen Kernen mit axialer Anordnung der zylindrischen Kerngehäuse 13
Abbildung 3-4 Detail Integration Wärmetauscher in zylindrischen Kern (links); Druckbereiche im thermoakustischen Kern (mittig); Dichtflächen (orange) zwischen Wärmetauscher und Regenerator (rechts) 14
Abbildung 3-5 Detaildesign Wärmetauscher 14
Abbildung 3-6 Ergebnisse der Simulation des thermoakustischen Systems mit fortschreitender Welle (DeltaEC, 2021) 15
Abbildung 3-7 Modell des thermoakustischen Systems 16
Abbildung 3-8: Mit DeltaEC erreichte Simulationsergebnisse. 16
Abbildung 3-9: Änderung der theoretischen Leistungsparameter des Versuchsträger mit variierender Breite der Gaskanäle der Wärmetauscher 17
Abbildung 3-10 Detail eines thermoakustischen Kerns mit zwei Wärmetauschern, zentralem Regenerator und Verbindungselementen 18
Abbildung 3-11:Thermoakustischer Kern – Innenansicht 18
Abbildung 3-12 Detail thermoakustischer Wärmetauscher; rechts: Fertigungsungenauigkeiten im Detail - unterbrochene Schweißnähte und Hohlräume 19
Abbildung 3-13 Detail Regenerator 20
Abbildung 3-14: Modell eines assemblierten thermoakustischen Kerns 21
Abbildung 3-15: Aufgeschlüsselter thermoakustischer Kern 21
Abbildung 3-16: Assemblierung thermoakustischer Kern 21
Abbildung 3-17: Modell des assemblierten Versuchsträgers 22
Abbildung 3-18: Assemblierter thermoakustischer Versuchsträger 22
Abbildung 3-19 Integration thermoakustischer Versuchsträger in bestehende Infrastruktur und Fusionierung mit Prüfstand für Wärmequelle und -senke 23
Abbildung 3-20 Detail thermoakustischer Versuchsträger mit erforderlichen Temperaturen an Wärmequelle und -senke sowie Antrieb 24
Abbildung 3-21 Schematische Darstellung thermoakustischer Versuchsträger und Schnittstellen zu Prüfstand für Wärmequelle und -senke, Thermostat und Kältekreis 24
Abbildung 3-22 Betriebsdruck im thermoakustischen Versuchsträger – Wärmepumpe 1 26
Abbildung 3-23 Betriebsdruck im thermoakustischen Versuchsträger bei 15 bar - Wärmepumpe 1 26
Abbildung 3-24 Betriebsdruck Kondensator- und Verdampferkreis (Prüfstand Wärmequelle/ -senke) 26
Abbildung 3-25 Vorlauf- und Rücklauftemperaturen Verdampfer und Kondensator – Wärmepumpe 1 27

Abbildung 3-26 Vorlauf- und Rücklauftemperaturen Verdampfer und Kondensator – Wärmepumpe 2 27
Abbildung 3-27 Massenstrom Kondensator 27
Abbildung 3-28 Massenstrom Verdampfer 27

6.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Auszug Literaturrecherche 8

7 Kontaktdaten

Ing. DI Thomas Schoberer, BSc
Fachhochschule Burgenland GmbH/
Forschung Burgenland GmbH
Steinamangerstraße 21, 7423 Pinkafeld
Tel.: +43 5 7705 4151
thomas.schoberer@fh-burgenland.at
thomas.schoberer@forschung-burgenland.at
www.forschung-burgenland.at

Dr. Marlies Schlauf
FOTEC Forschungs- und Technologietransfer GmbH
Forschungsgesellschaft der Fachhochschule Wiener Neustadt
Viktor Kaplan-Strasse 2 | 2700 Wiener Neustadt | Austria
Tel.: +43 26 22 90 333 203
marlies.schlauf@fotec.at
www.fotec.at

CEO Andreas Bangheri
Heliotherm Wärmepumpentechnik Ges.m.b.H
Sportplatzweg 18
A-6336 Langkampfen
Tel. +43 5332 87496-00
Fax +43 5332 87496-30
andreas.bangheri@heliotherm.com
www.heliotherm.com