

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

21.08.2019

Projekttitel: SilentAirHP

Projektnummer: 848891

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

Ausschreibung	1. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01.10.2015
Projektende	31.03.2019
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	42 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	AIT Austrian Institute of Technology GmbH
AnsprechpartnerIn	DI Dr. Christoph Reichl
Postadresse	Giefinggasse 4, 1210 Wien
Telefon	+43 50550 6605
Fax	+43 50550 6679
E-mail	Christoph.Reichl@ait.ac.at
Website	www.ait.ac.at

SilentAirHP

Fortschrittliche Methoden zur Bewertung und Entwicklung von Schallreduktionsmaßnahmen
für Luftwärmepumpen

AutorInnen:

DI Dr. Christoph Reichl

DI Dr. Johann Emhofer

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	4
2	Einleitung	5
2.1	Aufgabenstellung	5
2.2	Schwerpunkte des Projektes	6
2.3	Einordnung in das Programm	6
2.4	Verwendete Methoden	7
2.5	Aufbau der Arbeit	8
3	Inhaltliche Darstellung	9
3.1	Numerische Methodenentwicklung	9
3.2	Experimentelle Methodenentwicklung	34
3.3	Versuchsaufbau der Luft-Wasser-Wärmepumpe	41
3.4	Messungen	43
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	62
5	Ausblick und Empfehlungen	62
6	Literaturverzeichnis	64
7	Anhang	67
8	Kontaktdaten	93

2 Einleitung

2.1 Aufgabenstellung

Luft-Wasser-Wärmepumpen (L/W-WP) wurden in den letzten Jahren aufgrund ihrer Vorteile wie z.B. geringer Platzbedarf, vergleichsweise geringe Anschaffungskosten, einfache Installation, etc. immer beliebter und zählen europaweit zu den am meisten verkauften Wärmepumpensystemen zur Heizung bzw. Kühlung von Wohnbauten. Neben den störenden Geräuschen des Verdichters, entstehen, aufgrund des hohen benötigten Luftvolumenstroms der L/W-WP, oftmals störende Geräusche beim Ventilator und Verdampfer. Vor allem während der Übergangsjahreszeit kommt es aufgrund der Vereisung des Verdampfers zu einer zusätzlichen Geräuschbelastung. All diese störenden Geräusche lösen oftmals Nachbarschaftskonflikte mit gesundheitlichen, psychischen und finanziellen Folgen aus, und können damit zukünftig zu einem Wettbewerbsnachteil der Technologie werden, und deren breiten Einsatz insbesondere in Siedlungsgebieten hemmen. Die derzeit in der Literatur, in den Akustikleitfäden von Wärmepumpenverbänden, etc. vorgeschlagenen Maßnahmen zur Minimierung der störenden Schallemissionen umfassen konstruktive, komponentenspezifische, regelungstechnische sowie aktive Maßnahmen, wobei deren Effekt auf die Schallemission meistens nur **qualitativ** bewertet wird. Die simultanen Auswirkungen dieser Schallreduktionsmaßnahme(n) auf Leistung, COP (Coefficient of Performance), Schallemission und psychoakustische Wahrnehmung, werden derzeit **nicht quantitativ** bewertet, womit der Wärmepumpenbranche (insbesondere WP-Herstellern, Installateuren, Planern) nicht bekannt ist, welche der gängigen Maßnahmen für das Wärmepumpensystem als Ganzes betrachtet jeweils am Optimalsten ist.

SilentAirHP zielt daher primär darauf ab, **fortschrittliche numerische und experimentelle Methoden zur quantitativen Bewertung schallreduzierender Maßnahmen für L/W-WP zu entwickeln**, um damit mittelfristig nationale Hersteller bei der Neuentwicklung bzw. der Nachrüstung ihrer L/W-WP zu unterstützen. Um dieses Ziel zu erreichen, werden im Projekt zum einen akustische Messmethoden entwickelt, welche Schallquellen frequenz aufgelöst unterscheiden und lokalisieren können. Parallel dazu werden Gesamtsystemsimulationen durchgeführt, welche die Schallemission (auch während des Vereisens der Außeneinheit) berücksichtigen. Diese Modelle sind notwendig, um in Folge regelungstechnische Schallreduktionsmaßnahmen zu entwickeln. Zudem wird eine möglichst industriennahe modulare L/W-WP aufgebaut, an der in Folge Schallreduktionsmaßnahmen experimentell untersucht werden. Neben der Quantifizierung ausgewählter „passiver“ Maßnahmen soll insbesondere die Verwendung von Anti-Eis-Beschichtungen bei Vereisung und Abtauung, sowie Noise Cancelling als „aktive“ Maßnahme im Projekt getestet, adaptiert und bewertet werden. Gemeinsam mit dem Institut für Schallforschung (ÖAW) werden ausgewählte Schallreduktionsmaßnahmen zudem psychoakustisch analysiert und bewertet.

Das **Projektergebnis** umfasst einerseits einen **quantitativ bewerteten Maßnahmenkatalog** für bekannte und neuartige Schallreduktionsmaßnahmen, zudem wird andererseits eine **ausführliche Systembeschreibung** einer L/W-WP vorgestellt, die erstmals sowohl das Vereisungsverhalten als auch die Schallemissionen berücksichtigen kann.

Das vorliegende Projekt wurde als Einzelprojekt eingereicht, weil damit die Ergebnisse **allen nationalen Wärmepumpenherstellern uneingeschränkt zur Verfügung** gestellt werden können. Um den nationalen Herstellern einen Wissensvorsprung gegenüber internationalen Anbietern zu sichern, wurden schon während der Projektlaufzeit laufend Ergebnisse im Rahmen von Branchenveranstaltungen präsentiert.

2.2 Schwerpunkte des Projektes

Das Projekt gliedert sich, entsprechend der Aufgabenstellung, in vier Schwerpunkte. Dies sind zum einen die numerische Methodenentwicklung, die experimentelle Methodenentwicklung, der Versuchsaufbau und schließlich die systematischen Schallmessungen.

Die numerische Methodenentwicklung fokussiert einerseits auf die Systemsimulation, wobei energetische und akustische Zugänge kombiniert wurden. Andererseits wurde intensiv im Bereich der 3D Modellierung mit großem Augenmerk auf die Vereisung des Verdampfers gearbeitet. Die experimentelle Methodenentwicklung inkludiert den akustischen Dom, die Schalllokalisierung mittels akustischer Mikrofonringe mit Wärmebildkamera und korrelierte transiente Vibrations-, Akustik und Strömungsgeschwindigkeits/Turbulenz-Messung. Weiters wurden Schalldurchtrittsmessungen am Wärmetauscher weiterentwickelt und im Bereich des Gegenschalls geforscht. Die systematischen Schallmessungen wurden an der Versuchswärmepumpe mittels Variation unterschiedlicher Schallreduktionsmaßnahmen durchgeführt.

2.3 Einordnung in das Programm

Das im vorliegenden Bericht dargestellte Projekt SilentAirHP weist einen hohen Deckungsgrad mit den von der FFG formulierten Ausschreibungszielen des Programms Energieforschung 1. Ausschreibung auf. SilentAirHP leistet einen wichtigen **Beitrag zur Erfüllung der energie-, klima- und technologiepolitischen Vorgaben**. So sind die durchgeführten Forschungsarbeiten von SilentAirHP geeignet, einen wesentlichen Beitrag zur breiten Markteinführung von Luft-Wasser-Wärmepumpen zu leisten. Insbesondere in renovierten Bestandsbauten städtischer Siedlungsgebiete können die derzeit größten Nachteile dieser Systeme - die im Betrieb verursachten Geräuschen, die sich bei Vereisung noch verstärken – in mittlerer Frist so reduziert werden, dass es zu keinen nennenswerten

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

Beeinträchtigungen der Nachbarn oder Anrainer kommt und ohne dass damit energetische Nachteile verbunden sind.

Des Weiteren tragen die Projektergebnisse dazu bei, **die Leistbarkeit von nachhaltiger Energie und innovativen Energietechnologien zu erhöhen**. Die Forschungsarbeiten im Projekt zielten darauf ab, die genannten Wärmepumpensysteme in mittlerer Frist geräuschrmer bzw. leiser zu machen, ohne dass dabei die energetische Performance sinkt, und damit die Betriebskosten steigen.

SilentAirHP trägt dazu bei, sicherzustellen, dass die österreichische Technologieführerschaft sowie Wettbewerbsfähigkeit im Bereich innovativer Energietechnologien weiter aufrechterhalten bzw. ausgebaut wird. Dies stärkt den österreichischen Innovationsstandort und unterstützt die Umsetzung der klimapolitischen Ziele. Somit trägt das Projekt zur Erreichung des Ziels **Aufbau und Absicherung der Technologieführerschaft bzw. Stärkung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit bei**.

2.4 Verwendete Methoden

Die folgende Tabelle zeigt die Methoden, die im Rahmen des Projektes zum Einsatz kamen.

Tabelle 1: Überblick über die in SilentAirHP zur Anwendung kommenden Methoden

		Messinstrument	Adaptionen	Verfeinerung	Entwicklung	Kommentar
Transiente Lokale Messmethoden	Schalllokalisation + Quellenrekonstruktion	Akustische Messkuppel Mit 60 Mikrofonen + Datenerfassung			X	Neubau der Versuchseinrichtung, Implementierung Hard- und Software, Analyse
	Schalllokalisation	Akustische Kamera	X	X	(X)	Versuchsaufbau angepasst, Erfahrungen im Projekt gesammelt
	Vibration	Vibrationssensoren	X	X		Anpassungen an Messwerterfassung durchgeführt
	Image Capturing Techniques	Optische Kamera	X			weiterentwickelt und angewendet
	Strömungsmessungen	CTA	X	X		Messungen durchgeführt und mit Mikrofon und Vibrationssensorik korreliert
Transiente	Wägetechnik	Hochauflösende	X	X		in Datenerfassung

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

Globale Mess- methoden		Komperatorwaage				integriert
	Elektrische Energie	Leistungsmessung	X			State-of-the-Art
	Druck	Drucksensoren	X			State-of-the-Art
	Temperatur	PT100, PT1000	X			State-of-the-Art
	Schalleistungspegel	Mikrofon	X	(X)	(X)	State-of-the-Art, Implementation zeitsynchroner Datenerfassung und Analysemethoden
	Massenströme	Coriolis- Massenstromsens., Ind. Volumenstromsens., CTA	X			State-of-the-Art
Numerische Methoden	Schalllokalisation	-			X	Entwicklung innerhalb des Projekttestes
	1D Systemsimulation	-			X	Entwicklung basierend auf Arbeiten aus früheren AIT Projekten bei Luftkanalakustik, Neuentwicklung für Luftwärmepumpen
	Strömungsrechnungen		X			State-of-the-Art, benötigt Adaption an Versuchsaufbau

2.5 Aufbau der Arbeit

Die im Rahmen des dargestellten Projektes durchgeführten Arbeiten bilden somit ein Zusammenspiel aus experimenteller Arbeit nach modernen wissenschaftlichen Methoden, ergänzt durch computergestützte Modelle zur Integration und Evaluierung der erhaltenen Daten. Die genaue Vorgehensweise mit detailliert dargestelltem Inhalt, den sich ergebenden Ergebnissen und Schlussfolgerungen sowie ein Ausblick mit Empfehlungen bzw. Maßnahmenkatalog sind im Folgenden beschrieben.

3 Inhaltliche Darstellung

3.1 Numerische Methodenentwicklung

Entwicklung der Schalllokalisationsanalyse

Ein Prototyp der akustischen Kamera (siehe Abbildung 1 links) wurde aufgebaut, kalibriert und für erste Testmessungen an einer Versuchswärmepumpe vorbereitet. Dabei wurden die 64 Mikrophone mit dem gleichen Messwerterfassungssystem, das auch für den akustischen Dom (akustische Messkuppel) zum Einsatz kam, verbunden. Die Analyse der Messdaten (siehe Abb. 1 rechts) ermöglichte die Visualisierung von Schallquellen direkt auf einem Computermodell der Wärmepumpen (siehe Abb. 3). [1] [2] [3] [4]

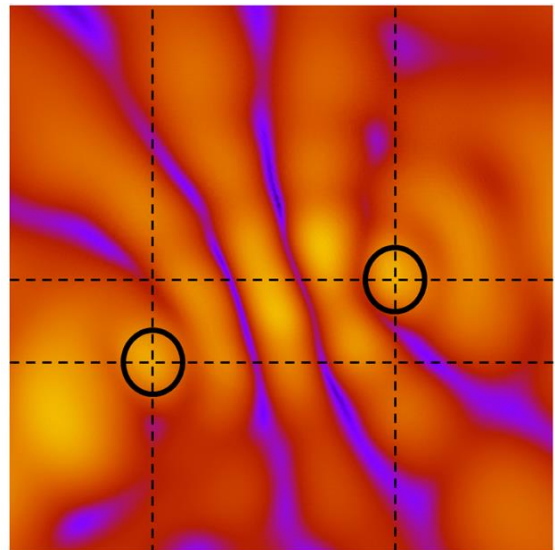
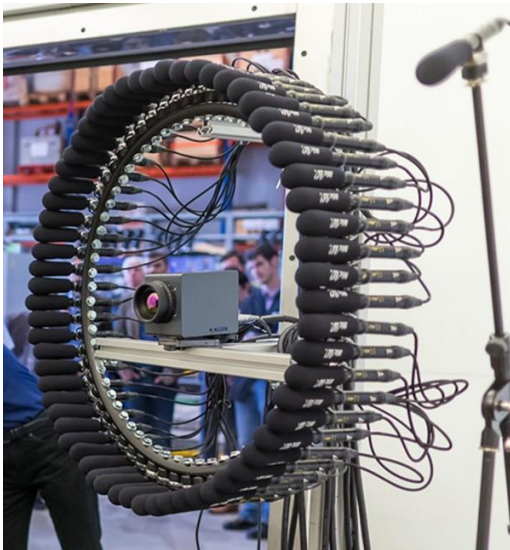


Abbildung 1: (links) Setup des Prototyps der akustischen Kamera mit zentral montierter Thermokamera; (rechts) Analyse der Messdaten einer Testmessung zweier unkorrelierter Schallquellen auf leicht unterschiedlicher Höhe

Es konnte eine weitaus präzisere Version der akustischen Kamera gebaut (siehe Abbildung 2) und in Betrieb genommen werden. Abschließende Kalibrationsarbeiten wurden erfolgreich durchgeführt. [5]



Abbildung 2: Aufbau der hochpräzisen Variante der akustischen. Im rechten Bild ist die Positionierungsmechanik zu sehen.

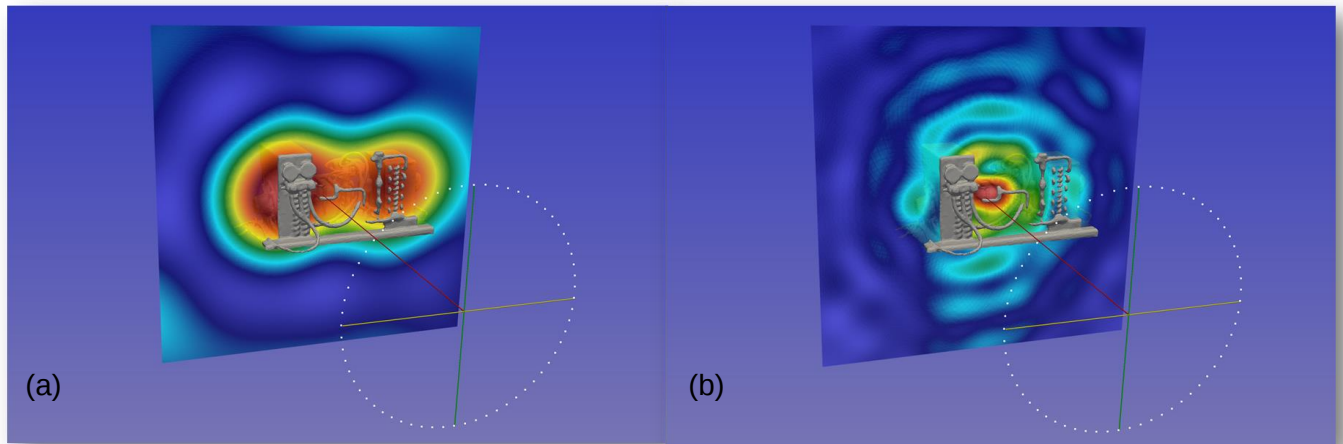


Abbildung 3: 3D Visualisierung der Schallemissionen einer experimentellen Wärmepumpe bei (a) 1250 Hz und (b) 4000 Hz. Der gepunktete Kreis im Vordergrund symbolisiert die akustische Kamera.

Entwicklung des energetischen 1D-Modells der LW-WP

Es wurde ein dynamisches 1D-Modell der Wärmepumpe mit den Beschreibungssprachen Dymola/Modelica [6] [7] erstellt. Hierbei wurden zwei verschiedene Bibliotheken untersucht, die Wärmepumpenmodelle zur Verfügung stellen. Einerseits die kommerziell erhältliche TIL-Library [8] und andererseits die frei verfügbare ThermoCycle-Library [9]. Schlussendlich wurde der TIL-Library der Vorzug gegeben, da mit dieser Bibliothek eine Realisierung des Kreislaufs mit einem Vier-Wegeventil zur Kreislaufumkehr möglich war. Abbildung 4 zeigt eine Simulation der SilentAirHP bei einem stabilen Betriebspunkt. Die auf diese Weise erstellten Modelle besitzen in etwa 10 000 Gleichungen und um die 100 Zustandsvariablen. Sie wurden bereits eingesetzt, um die SilentAirHP auszulegen und um die Regelung mit herkömmlichen PI-Reglern zu testen.

Zudem wurde untersucht, ob die Modelle ohne viel Aufwand für eine modellbasierte Regelung verwendet werden können. Aufgrund der hohen Anzahl der Zustandsvariablen, ist dies derzeit aber nicht möglich.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

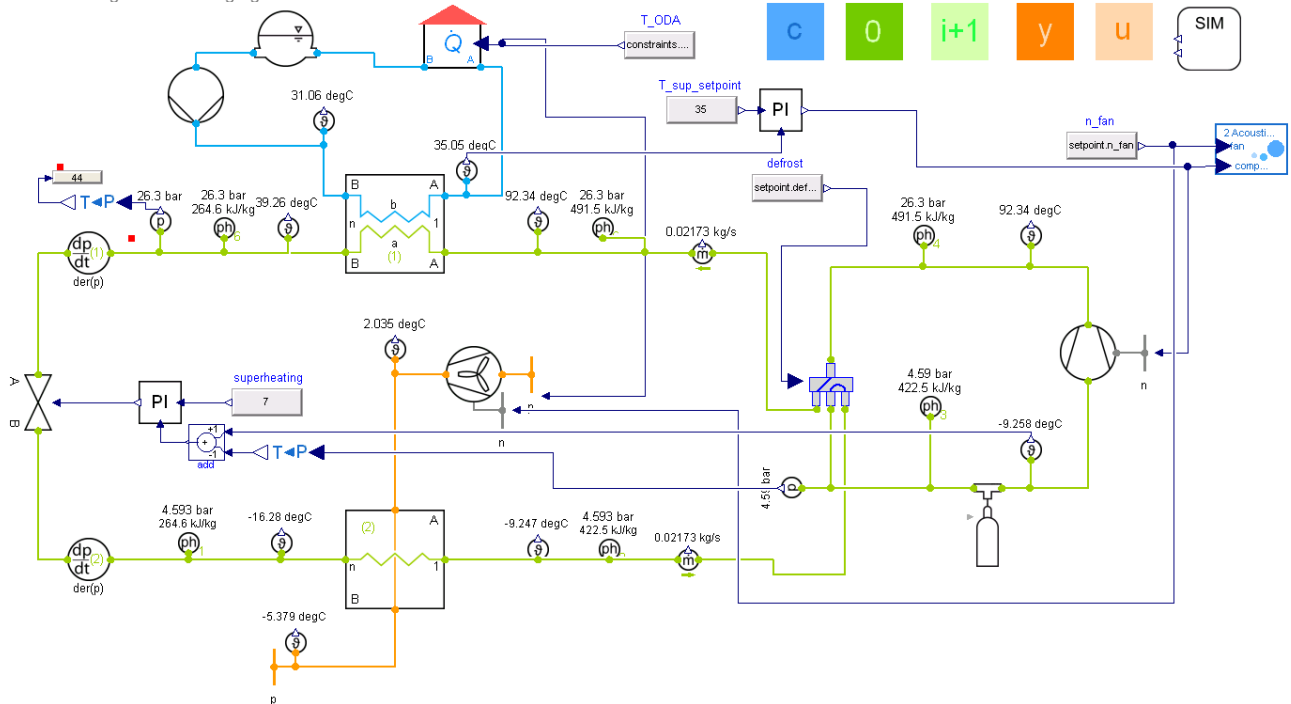


Abbildung 4: Simulation der SilentAirHP beim Auslegungspunkt A2W35.

Erweiterung des energetischen 1D-Modells der Luft-Wasser-Wärmepumpe

Weiters wurden die Komponenten mit den größten Schallemissionen (Verdichter, Ventilator, Luftkanal) aus den bestehenden Modellen heraus erweitert, um die akustischen Auswirkungen bei verschiedenen Betriebspunkten zu analysieren (siehe auch Abbildung 5). Zusätzlich wurden Komponenten neu entwickelt, die in Modelica mit den erweiterten Komponenten verbunden werden können und somit die Schallreduktion darstellen. Dabei wurde darauf Wert gelegt, dass die akustischen Erweiterungen nicht nur auf die verwendeten Komponenten der TIL-Bibliothek anwendbar sind, sondern, dass auch beliebige andere Modelica-Komponenten mit akustischen Schallfunktionen erweitert werden können. Die auf diese Weise entstandene *Sound Source Extension (SSE-) Library* [10] steht im Rahmen des Modelica License 2 Modells frei zur Verfügung.

Ein vereinfachtes Modell des Eiszuwachses am Verdampfer wurde ebenfalls aus bestehenden detaillierten Modellen heraus entwickelt und validiert. Daraus können der zunehmende Druckverlust und die schlechter werdende Wärmeleitung am Verdampfer während des Vereisens simuliert werden. Der erhöhte Druckverlust hat wiederum Auswirkungen auf die Regelung und somit auf die Ventilatordrehzahl und schlussendlich auf den Schall.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

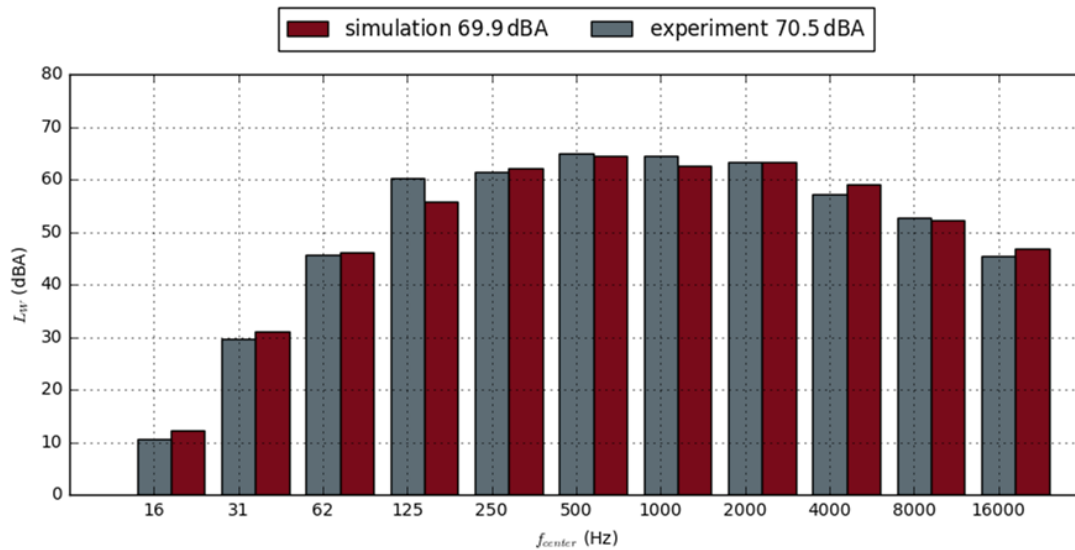


Abbildung 5: Vergleich von experimentellen Daten der SilentAirHP mit Simulationsergebnissen im Rahmen der ersten Testmessungen vom April 2017. Die einzelnen Komponenten wurden vermessen und der Gesamtschall-Leistungspegel verglichen.

Die in SilentAirHP zu Verfügung stehenden Funktionalitäten sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: In Modelica realisierte Erweiterungen in SilentAirHP

Komponente	Art	Methode
Verdichter	Erweiterung des bestehenden Modells	Frequenzbandaufgelöste Schallcharakteristik
Verdichter-kapselung	Neue Komponente	Frequenzbandaufgelöste Schallabsorption
Körperschall-Dämpfer	Neue Komponente	Frequenzbandaufgelöste Schallabsorption
Ventilator	Erweiterung des bestehenden Modells	Frequenzbandaufgelöste Schallcharakteristik
Luftkanal	Neue Komponente Luftschalldämpfung (gerade)	Frequenzbandaufgelöste Schallabsorption
Luftkanal	Neue Komponente Umlenkschalldämpfer	Frequenzbandaufgelöste Absorption über Kennlinien von Herstellern
Verdampfer	Erweiterung des bestehenden Modells	Vereisungsmodelle

Entwicklung der Regelungsstrategie

Da bereits für die Planung der Versuchswärmepumpe einige regelungstechnische Fragestellungen aufgetreten sind, wurde mit der Simulation einer einfachen Regelung schon in einem frühen Projektstadium begonnen. Es wurden zu diesem Zeitpunkt zwei PI-Regler zur Regelung der Vorlauftemperatur und der Überhitzung mitsimuliert. Die akustische Regelung erfolgte auf eine Schallquelle (Ventilator) mittels Regelung auf die Ventilatordrehzahl. Im einem weiteren Schritt folgte die Koppelung verschiedener Schallquellen. Eine auf der Fandrehzahl basierte Regelung wurde implementiert und

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

getestet. In der Versuchswärmepumpe konnten allerdings keine signifikanten Vorteile erreicht werden, da die Geräuschemissionen des Kompressors überwiegen [11].

Weiters wurde festgestellt, dass ein modellbasierter Regelungsansatz mit vereinfachten Modellen, verwendet werden kann um eine maximale Nachtabenkung der Kompressordrehzahl zu berechnen. In anderen Worten, wenn der Kompressor (wie im Falle der SilentAirHP) die lauteste Komponente darstellt, kann im Teillastbetrieb der Bedarf an Heiz-/Kühlenergie für einen Tag so aufgeteilt werden, dass die Wärmepumpe tagsüber unter Volllast läuft und über Nacht mit möglichst geringer thermischer Leistung und somit geringer Kompressordrehzahl bzw. geringer Schallleistung arbeitet. Wie weit die Drehzahl reduziert werden kann hängt dabei von einer Vielzahl an äußeren Parametern wie Außentemperatur, Heiz-/Kühllast, etc. ab.

Kalibration der 1D-Modelle

Mit den Ergebnissen der Messungen wurde die Kalibration durchgeführt.

Strömungsmodell

Zu Beginn des Projektes wurden bereits Simulationen der Vereisung des Wärmeübertragers der SilentAirHP durchgeführt (siehe Abbildung 6 und 7). Weiters wurden zahlreiche Simualtionsrechnungen durchgeführt und ausgewertet. [12].

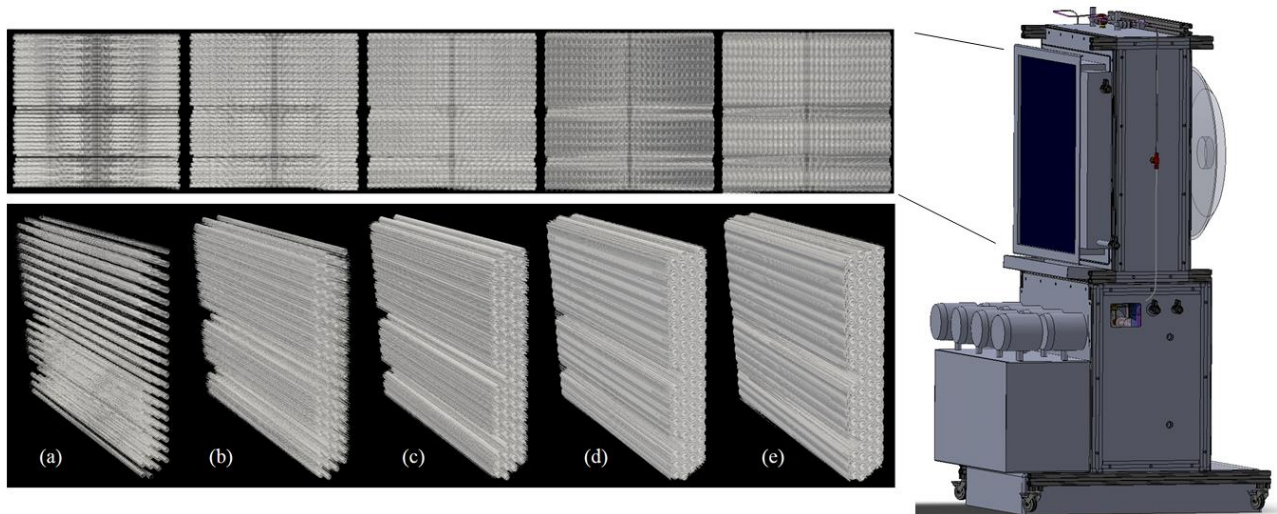


Abbildung 6: Zeitliches Verhalten des Eisansatzes am SilentAirHP Wärmeübertragers.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

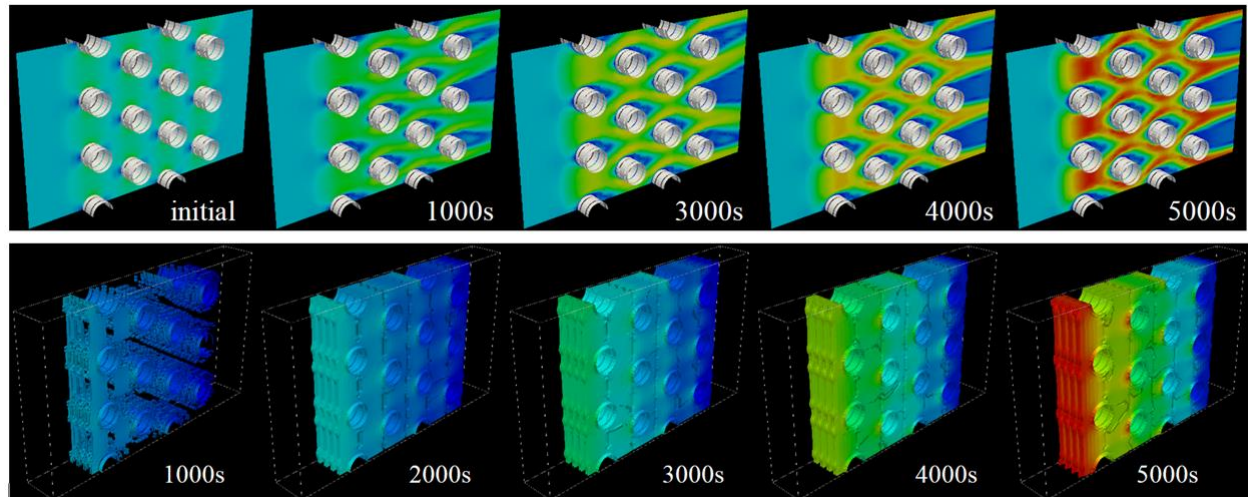


Abbildung 7: Zeitliches Verhalten des Eisansatzes an einem kleinen symmetrischen Teilbereich des Wärmeübertragers. Oben ist die Strömungsgeschwindigkeit, unten der Druckverlust bei schrittweiser Vereisung dargestellt.

Es wurde die zeitabhängige Vereisung des Wärmeübertragers in der SilentAirHP-Wärmepumpe beobachtet, indem die Massenzunahme gemessen und die erfassten Bilder des Wärmeübertragers während der Vereisung analysiert wurden, um die Frostschichtdicke zu extrahieren. Nach der Implementation des Vereisungsmodells wurde die Methodik angewendet, um Frost (i) auf der gesamten Wärmeübertrageranordnung gemäß des Versuchsaufbaus und (ii) für eine umfangreiche Parameterstudie auf einem symmetrischen Teil des Wärmetauschers zu berechnen. Die Parameterstudie umfasst unterschiedliche Rohr- und Rippentemperaturen, unterschiedliche Massenströme durch den Wärmeübertrager und unterschiedliche Randbedingungen auf der Luftzufuhrseite des Wärmeübertragers, die den absoluten Wassergehalt in der Zuluft beeinflussen. Die Ergebnisse der symmetrischen Parameterstudie wurden verwendet, um das Verhalten des gesamten Wärmeübertrageraufbaus zu rekonstruieren. Experimentelle Beobachtungen wurden schließlich sowohl mit den Rekonstruktionen als auch mit den Simulationen mit dem gesamten Wärmeübertrageraufbau verglichen.

Die Vereisung des SilentAirHP-Wärmeübertrags wurde mit verschiedenen experimentellen Techniken analysiert. Dazu zählen thermodynamische Messungen für die thermischen Betriebsparameter der Wärmepumpe, Gewichtsmessungen mit Hilfe einer Waage und Bildaufnahmetechniken von Standardkameras und Thermokameras zur Visualisierung des Eiswachstums und zur Extraktion der Frostschichtdicke.

Die Temperatur am Kältemittelzu- und -austritt des Verdampfers wurde mit kalibrierten Temperatursensoren der PT100-Klasse A gemessen. Die Sensoren wurden mit Wärmeleitpaste an der Außenseite der Kupferrohre so nah wie möglich am Einlass montiert. Darüber hinaus wurden die Sensoren isoliert, um den Wärmeaustausch mit der Umgebungsluft zu reduzieren.

Der Wärmepumpenaufbau wurde auf einer Waage platziert, die in der Lage ist, das Gewicht

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

als Funktion der Zeit zu messen. Durch die Berechnung der Differenz zwischen dem zunehmenden Gewicht und dem Anfangsgewicht kann die Frostmenge auf dem Wärmeübertrager extrahiert werden. Da das Gewicht der Wärmepumpenanordnung um den Faktor 1,5 höher war als die maximal erfassbare Last der Waage, wurde ein Kraftübertrager installiert und das System kalibriert, indem anschließend bekannte Gewichte auf den trockenen Wärmeübertrager gelegt und eine Kalibrierkurve aufgezeichnet wurde, bevor die Vereisungsversuche gestartet wurden.

Zwei Kameras wurden verwendet, um die Frostbildung am Wärmeübertrager zu erfassen: Eine Wärmebildkamera, die in der Lage ist, thermografische Standbilder und Standard-Standbilder gleichzeitig aufzuzeichnen, und ein Camcorder, der eine Detailansicht eines Teils des Wärmeübertragers aufzeichnet, der zur Extraktion der Frostschichtdicke verwendet wird. Der detaillierte Camcorder wurde um 45 Grad zum Wärmeübertrager-Normal (und Hauptströmungsrichtung) geneigt. Der Abstand zwischen den Lamellen ist durch 4 mm gegeben, so dass von der Kamera nur ein Referenzabstand von 2,83 mm gesehen wird (siehe Abb. 8). Da die Lamellen des Wärmeübertragers vertikal positioniert sind und der Camcorder für das detaillierte Video mit einer exakten horizontalen Betrachtungsachse ausgerichtet wurde, werden die Lamellen des Wärmeübertragers parallel zu den Pixelreihen der Bilder wiedergegeben. Dadurch können Summen von Zeilen (horizontal, blau) und Spalten (vertikal, grün) über die Pixel berechnet werden (siehe Abbildung 9). Die Spaltensummen (in Abb. 9 grün dargestellt) zeigen die Periodizität der Lamellen. Die Zeilensummen (in Abb. 9 blau dargestellt) zeigen den Einfluss der Kältemittelrohre, die in vier verschiedenen Tiefen angeordnet sind, wobei die beiden nächstgelegenen Rohre mit ihrer niedrigeren Temperatur zu einer Erhöhung der Frostschichtdicke führen. Der Unterschied zwischen diesen Bereichen nimmt ab, wenn sich immer mehr Frost ansammelt.

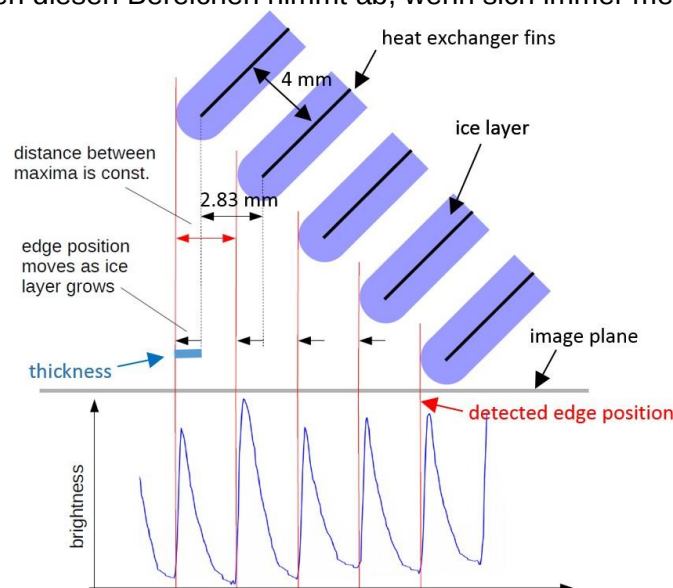


Abbildung 8: Verfahren zum Extrahieren der Frostschichtdicke basierend auf der Bilderfassung. Während der Vereisung der Lamellen zeigen die Pixel der Kamera eine erhöhte Helligkeit. Unter Berücksichtigung der Neigung der Kamera gegenüber dem Wärmeübertrager um 45 Grad kann eine Frostschichtdicke mit einem Kantenerkennungsalgorithmus berechnet werden.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

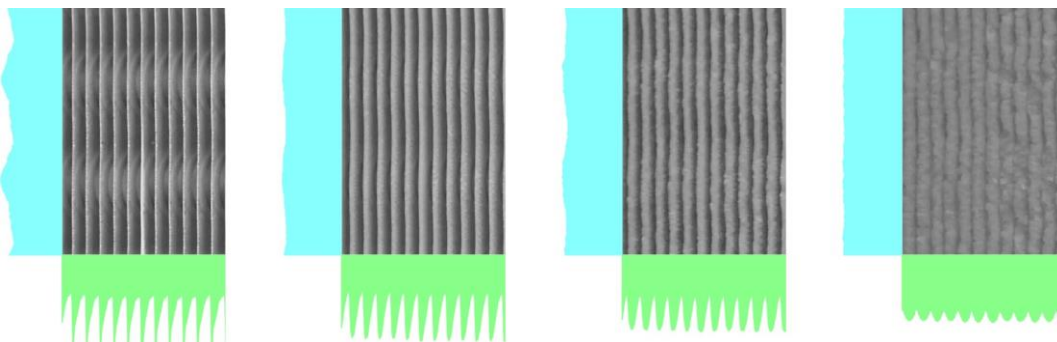


Abbildung 9: Detailansicht der von einem Camcorder aufgezeichneten Frostschrift für vier verschiedene Zeiten während des Vereisungsvorgangs. Vertikale Summen über den grünen Bildpixelpalten zeigen die Periodizität der Lamellen; horizontale Summen über den Bildpixelpalten zeigen den Einfluss der Rohre auf die Frostbildung durch ihre niedrige Temperatur.

Unter der Annahme eines gleichmäßigen Anwachsens von Frost um die Lamellen herum ermöglicht die Position der bewegten Kante im Bild (unter Nutzung der Helligkeit des Bildes) eine Berechnung der Frostschriftdicke. Diese Berechnung wird unter Verwendung einer Projektion des Lamellenabstandes zur Bildebene durchgeführt. Frostmasse und Frostschriftdicke nehmen in Abhängigkeit von der Zeit beim anschließenden Vereisens des Wärmeübertragers zu. Die Wachstumsrate verhält sich in mehreren Teilen linear, was zu einer "natürlichen" Trennung in mehrere Zeitbereiche führt (siehe graue vertikale Linien in Abb. 10). Für jedes dieser Teile ist der Gewichtsanstieg (blau) und die Frostschriftdicke (rot) konstant. Das Gewicht geteilt durch die Frostschriftdicke (gelb dargestellt) entspricht der Dichte der neu angewachsenen Frostschrift, wenn davon ausgegangen wird, dass der bereits vorhandene Frost unverändert bleibt. Im letzten Teil der Messung (nach etwa 3 Stunden) wurde die relative Luftfeuchtigkeit durch zusätzliche Befeuchter erhöht, um die maximale Mattierung zu erreichen. Die plötzlich verfügbare Feuchtigkeit führt zu einem plötzlichen Anstieg der Frostschriftdicke, ohne die Gewichtszunahme stark zu beeinflussen, was zu einer geringen Dichte des zusätzlichen Frostes führt (kleiner gelber Bereich in Abb. 10 bei Zeitpunkt 3:05).

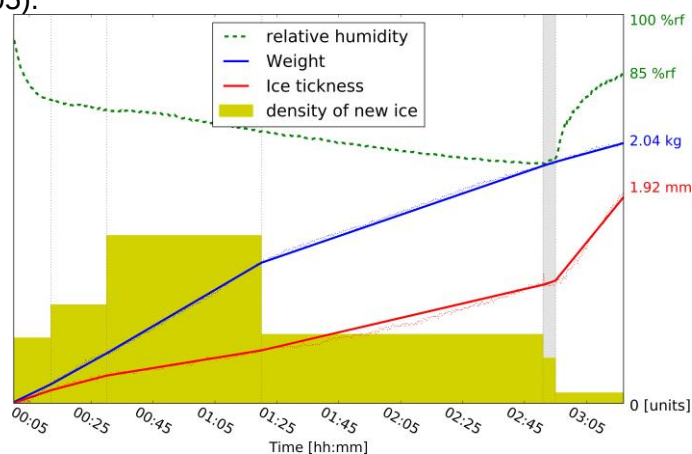


Abbildung 10: Frostmasse, Eisschichtdicke und berechnete Frostdichte der neuen Eisschicht als Funktion der Zeit. Nach ca. 3 Stunden angesammeltem Frost wurde die relative Luftfeuchtigkeit durch zusätzliche Befeuchter schnell erhöht, um eine Vollvereisung zu erreichen.

Der vier-reihige SilentAirHP-Wärmeübertrager einschließlich des Volumens zwischen Wärmeübertrager und Ventilator wurde modelliert. Temperatur, Strömungsfeld und Frostsicht wurden mit dem Navier-Stokes-Löser OpenFOAM® berechnet, der mit einem eigenen Vereisungscode erweitert wurde. Der Lüfter wurde nicht mit seiner realen Geometrie modelliert, sondern mit einer geeigneten Randbedingung. Zum einen werden die geometrischen Modelle beschrieben (mit einer Zusammenfassung der für die Simulationen verwendeten Randbedingungen), zum anderen wird das Vereisungsmodell und seine Implementation in OpenFOAM® beschrieben und die Berechnungen und numerischen Ergebnisse vorgestellt. Es wurden zwei geometrische Modelle konstruiert: ein vollständiges SilentAirHP-Wärmeübertragermodell und ein kleinerer vollständig symmetrischer Teil des Wärmeübertragers. Die Geometrie- und Netzgenerierung wurde mit snappyHexMesh realisiert und ist vollautomatisch und parametrisiert. [13]

Das vollständige Wärmeübertragermodell beinhaltet eine Darstellung des vier-reihigen SilentAirHP Rohrbündelwärmeübertragers. Dazu gehören Rippen und Rohre. Die halbrunden Rohrverbinder an den Seiten sind nicht modelliert. Der Kältemittelstrom wurde nicht modelliert. Stattdessen wurden die Temperatur-Randbedingungen für die Sonden an Rohren und Rippen festgelegt. Ein zusätzliches Luftvolumen zwischen dem Wärmeübertrager und des Ventilators mit einer Tiefe von 300 mm ist ebenfalls enthalten. Abb. 11 zeigt den geometrischen Aufbau des kompletten Wärmeübertragermodells (links) und eine Detailansicht des Wärmeübertragers (rechts). Das Netz besteht aus zirka 11 Millionen Rechenzellen.

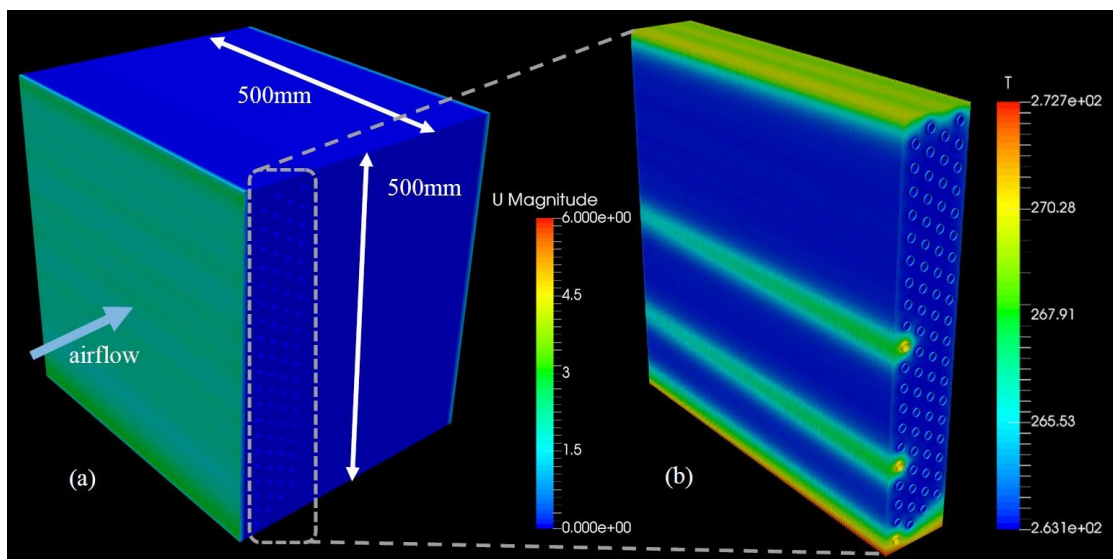


Abbildung 11: Geometrischer Aufbau für die kompletten Wärmeübertragersimulationen. Die Flächen in der linken Abbildung (a) sind mit dem Geschwindigkeitsbetrag eingefärbt, der aufgrund der asymmetrischen geometrischen Anordnung des Wärmeübertragers eine leicht ungleichmäßige Verteilung auf der Luftzufuhrseite (linke Seite) zeigt. Der gestrichelte Begrenzungsrahmen markiert die Position des Wärmeübertragers, der in der rechten Abbildung (b) vergrößert ist. Dort werden Rippen- und Rohroberflächen gemäß Konfiguration A mit der entsprechenden Temperatur eingefärbt.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

Für parametrische Untersuchungen zur Abhängigkeit der Frostakkumulation von der Lamellentemperatur und den zuluftseitigen Randbedingungen (Temperatur und Feuchte) wurde eine symmetrische Extraktion des Wärmeübertragers aufgesetzt (siehe Abb. 12 links). Er beinhaltet die volle Tiefe des Wärmeübertragers von 120 mm, verfügt aber nur über vier Rohrreihen (eine davon in zwei Hälften geteilt) und vier Rippen mit einer Breite von insgesamt 16 mm. Abbildung 12 rechts zeigt ein Detail des Rechenetzes mit 16 Zellschichten zwischen zwei Rippen. Je nach Anzahl der Zellschichten zwischen den Lamellen reicht die Gesamtzellzahl der symmetrischen Netze von 269.000 (4 Schichten), 534.000 (8 Schichten) bis hin zu maximal 1,1 Millionen Zellen für 16 Schichten.

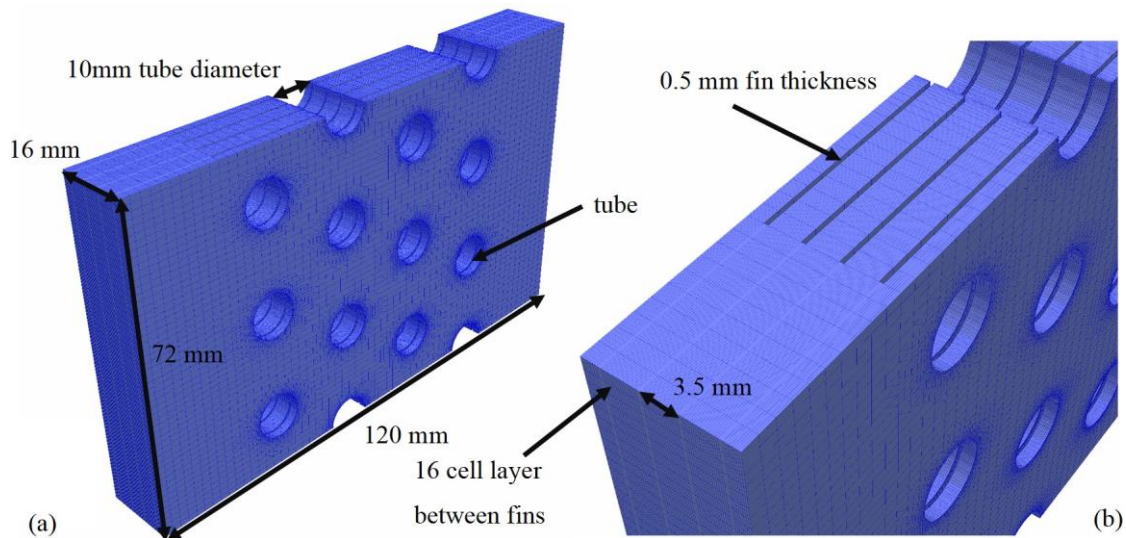


Abbildung 12: (a) Symmetrischer Teil des Wärmeübertragers mit einer Gesamttiefe von 120 mm, der alle 4 Rohrschichten in Strömungsrichtung enthält. In diesem Modell sind 4 Rippen und 12 Rohre (10 und 4 Hälften, die aus Symmetriegründen geteilt sind) vorhanden. (b) Detailansicht, die das Rechenetz mit 16 Zellschichten zwischen zwei Rippen zeigt.

Zu den Randbedingungen gehören die Temperaturen an Rippe, Rohren, der Zu- und Abfuhrseite der Wärmeübertragerbaugruppe. Weiterhin müssen Geschwindigkeitsprofile auf der Abzugsseite am Standort des Ventilators eingestellt werden. Die Luftfeuchtigkeit wurde auf der Luftzufuhrseite eingestellt.

Für die Simulationen der Gesamtwärmeübertragers wurden zwei Temperaturkonfigurationen (Konfiguration A und B) verwendet. Die Konfiguration A (siehe Abb. 13 a, b) entspricht dem Versuchsaufbau mit einem verdampfenden Kältemittel, die Konfiguration B (Abb. 13 c, d) einem fiktiven Aufbau mit einem nicht verdampfenden Fluid als Kältemittel, was zu einer linearen Temperaturverteilung entlang der Rohre führt. Abb. 13 rechts zeigt die Temperatur an Rohren und Rippen für die Konfiguration A. Abb. 17 zeigt eine isometrische Ansicht der Rippenebene mit der Temperaturkonfiguration B.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

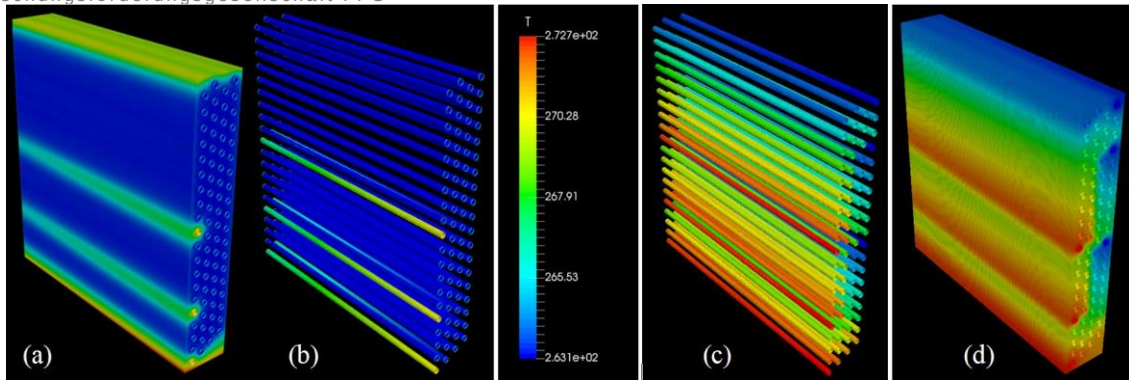


Abbildung 13: Temperatur-Randbedingungen an den Rohren für die Konfiguration A (b) und B (c). Nach dem Lösen der Temperaturdiffusionsgleichung (Laplace-Gleichung) werden die Temperaturprofile an den Lamellen extrahiert und für die Konfiguration A (a) und B (d) visualisiert.

In der Wärmeübertrageranordnung wird der Luft-Strom durch einen Ventilator auf der Abluftseite angetrieben. Das vom Ventilator eingebrachte außermittige Moment wurde entweder durch eine Drall-Randbedingung (siehe Abb. 16) oder mit einer konstanten Geschwindigkeit auf der Luftzufuhrseite für die Temperaturkonfiguration A modelliert. Die Unterschiede sind nur gering und die resultierende Geschwindigkeitsverteilung auf der Luftabzugsseite des Wärmetauschers ist in Abb. 14 a zu sehen. Eine andere Ventilator-Randbedingung wurde ebenfalls getestet und für die Temperaturkonfiguration B in Abb. 15 a dargestellt.

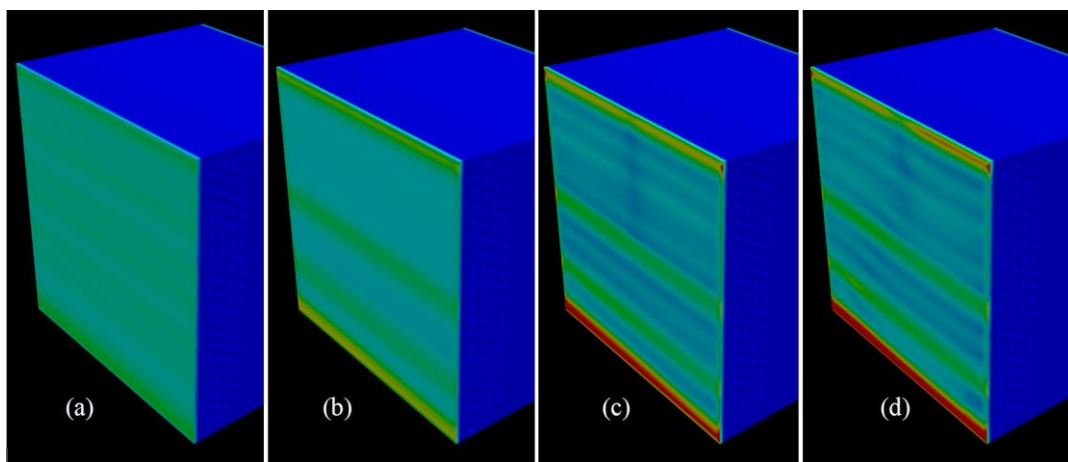


Abbildung 14: Rippen- und Rohrtemperatur-Konfiguration A. Geschwindigkeitsbetrag auf der Abluftseite (Farbbereich 0 - 6m/s) für 4 verschiedene Zeiten beim anschließenden Vereisens des Wärmeübertragers.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

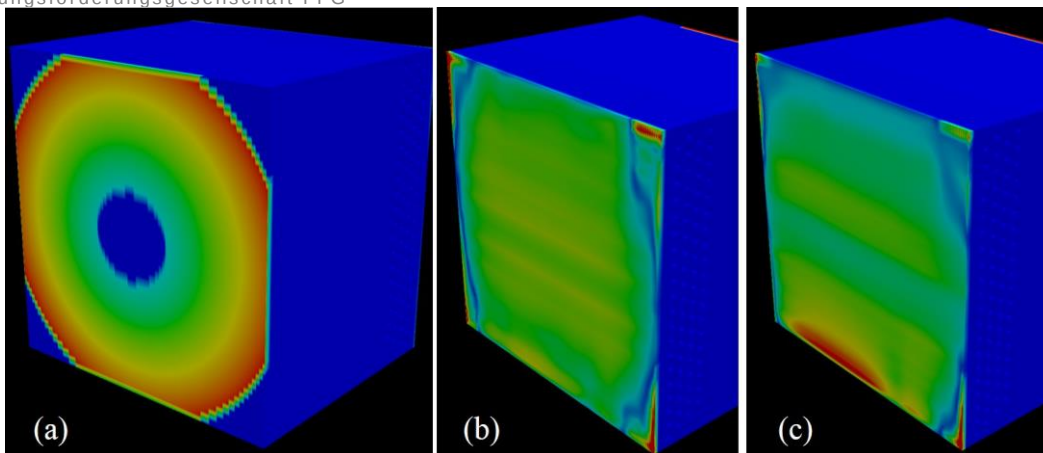


Abbildung 15: Rippen- und Rohrtemperatur-Konfiguration B. (a) Geschwindigkeitsbetrag auf der Luftausseite (Farbbereich 0 - 30m/s). (b, c) Geschwindigkeitsbetrag auf der Luftzufuhrseite (Farbbereich 0 - 4m/s) für zwei verschiedene Zeiten beim anschließenden Vereisen des Wärmeübertragers.

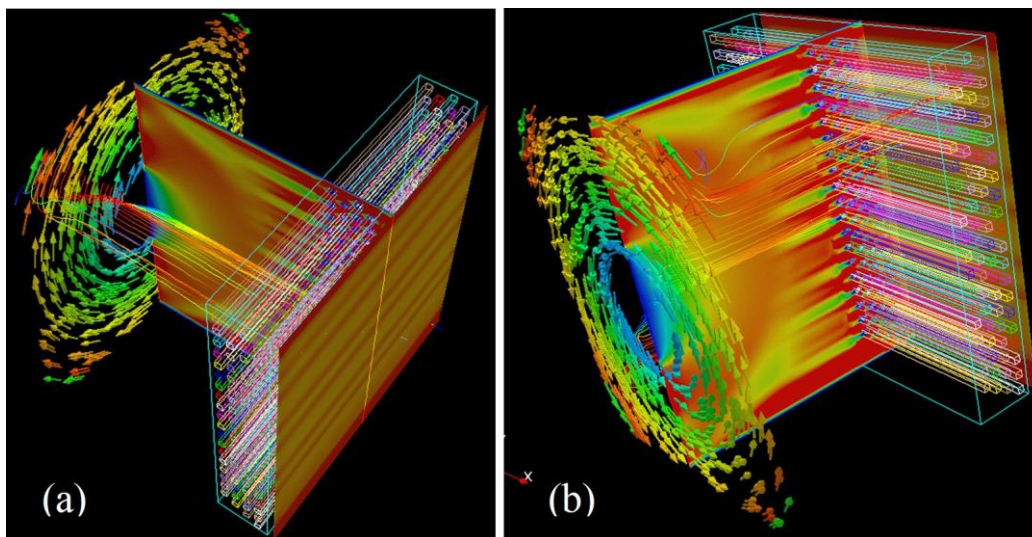


Abbildung 16: Drall-Randbedingung zur Simulation des Ventilators auf der Abluftseite des Simulationsbereichs. Vektoren, Stromlinien und Konturdiagramme werden mit einem Geschwindigkeitsbetrag im Bereich von 1 3m/s eingefärbt. Die Geschwindigkeit erreicht Werte bis zu 20m/s.

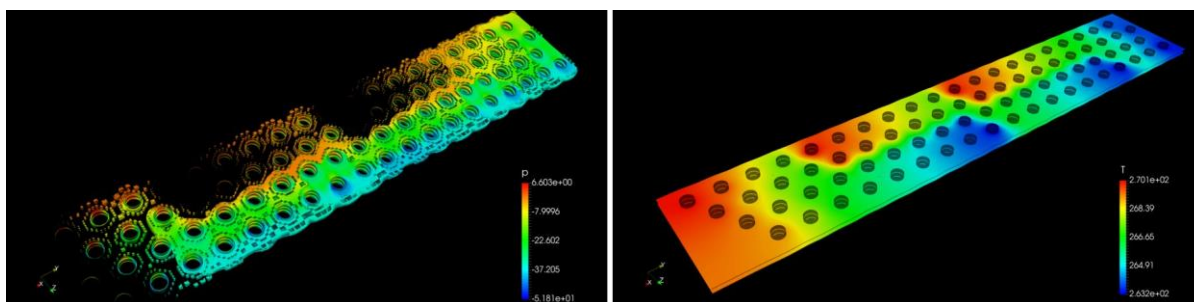


Abbildung 17: (links) Akkumulierte Frostmasse, eingefärbt durch den statischen Druck für die Einstellung der Rippen- und Rohrtemperatur Konfiguration B; (rechts) Temperaturrandbedingung an den Rippen für Konfiguration B.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

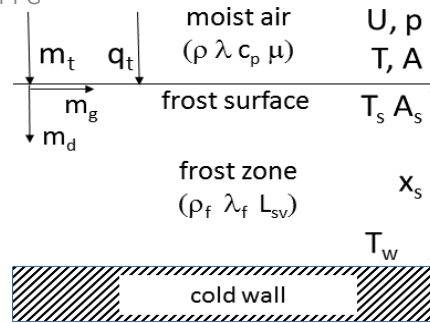


Abbildung 18: Die Parameter des Vereisungsprozesses.

Die Eckdaten des in diesem Beitrag betrachteten Vereisungsprozesses sind in Abb. 18 skizziert. Dabei strömt die feuchte Luft über eine kalte Wand, und durch den Wärme- und Stoffaustausch über die Frostoberfläche entsteht eine Frostzone. Die Analyse des Frostwachstums über einer kalten Wand beginnt mit dem Gleichgewicht des Gesamtmassenstroms des Wasserdampfes, der von der umgebenden feuchten Luft über die Frostoberfläche in die Frostzone übertragen wird:

$$\dot{m}_t = \frac{d}{dt}(x_s \rho_f) = \underbrace{\rho_f \frac{dx_s}{dt}}_{\dot{m}_g} + \underbrace{x_s \frac{d\rho_f}{dt}}_{\dot{m}_d} = h_m(A - A_s) \quad (1)$$

wobei ρ_f [kg/m³] die Frostdichte, x_s [m] die Dicke der Frostzone, h_m [m/s] der Stoffübergangskoeffizient ist, während A [kg/m³] und A_s [kg/m³] die absolute Feuchtigkeit in der umgebenden feuchten Luft bzw. an der Frostoberfläche darstellen.

Die in Gleichung (1) gegebene Bilanz besagt, dass der Gesamtmassenstrom $\dot{m}_t$, der aus der umgebenden feuchten Luft stammt (letzter Begriff rechts), aus zwei Teilen bestehen kann: dem einen, der in die bestehende Frostzone diffundiert und deren Dicke ändert ($\dot{m}_g$), und dem anderen, der den Frost verdichtet ($\dot{m}_d$). Für die Integration von Glg. (1) wird angenommen, dass der Stoffübergang innerhalb der Frostzone quasistabil und eindimensional ist (nur in wandnormaler Richtung wachsend). Die Frostdichte wird durch eine empirische Funktion in Abhängigkeit von der Frostoberflächentemperatur T_s [K] definiert:

$$\rho_f = a_{\rho_f} e^{b_{\rho_f} t_s} \quad (2)$$

wobei die empirische Funktion die in Celsius $t_s = T_s - 273.15$ [°C] angegebene Frostoberflächentemperatur erfordert und $a_{\rho_f} = 650$ [kg/m³] und $b_{\rho_f} = 0.277$ [°C⁻¹] die empirischen Koeffizienten sind.

In der Literatur wurde die Validität der empirischen Korrelation im Temperaturbereich $25^\circ\text{C} < t_s < 0^\circ\text{C}$ getestet, während man auch andere Korrelationen für verschiedene Vereisungsbedingungen finden kann. Der Einfachheit halber wird in der vorliegenden Arbeit jedoch Glg. (2) verwendet, da es eine einfache Umrechnung der Ableitung der

Frostdichtezeit in Bezug auf die Frostwachstumsrate ermöglicht. Unter der Annahme, dass die Frosteigenschaften über die gesamte Frostzone konstant sind, wird die Frostwachstumsrate erhalten, indem man die Ableitung von Glg. (1) nimmt und sie in Glg. (2) einführt:

$$\frac{dx_s}{dt} = \frac{h_m(A - A_s)}{\rho_f[1 + b_{\rho_f}(T_s - T_w)]} \quad (3)$$

mit T_w [K] der Temperatur der kalten Wand. Die Frostwachstumsrate aus Glg. (3) wird verwendet, um bei jedem Zeitschritt die tatsächliche Dicke der Frostzone zu aktualisieren.

Die Wärmebilanz über die Frostfläche besagt, dass die aus der umgebenden feuchten Luft übertragene Gesamtenergie q_t (letzter Begriff rechts) aus der Leitung durch die Frostzone q_c und der latenten Sublimationswärme innerhalb der Frostzone q_l besteht:

$$q_t = \underbrace{\lambda_f \frac{dT}{dx}}_{q_c} \bigg|_s + \underbrace{\dot{m}_t L_{sv}}_{q_l} = h_c(T - T_s) \quad (4)$$

wobei h_c [m/s] der Wärmeübertragungskoeffizient ist, während die Frostleitfähigkeit λ_f [W/mK] und die Latentwärme der Sublimation L_{sv} [kJ/kg] empirisch definiert sind.

Unter der Annahme, dass die Frosteigenschaften entlang der Dicke der Frostzone konstant bleiben (Glg. 2 und 5), erhält man bei der Einführung von Glg. (1) in Glg. (4) folgenden Ausdruck für die Temperatur der Frostoberfläche T_s nach kleiner Umlagerung.

$$T_s = \frac{T_w + \frac{x_s}{\lambda_f} [h_c T + h_m(A - A_s)L_{sv}]}{1 + \frac{h_c x_s}{\lambda_f}} \quad (6)$$

wobei T [K] die Temperatur der umgebenden feuchten Luft ist. Die analytische Integration von Glg. (4) wurde in der Literatur durchgeführt, und es wurde festgestellt, dass das Ergebnis in Form von Glg. (6) erhalten wird, nachdem der vernachlässigbare Begriff, der die Variation der Frosteigenschaften in der gesamten Frostzone beschreibt, entfallen ist.

Wie in Glg. (1) bis Glg. (6) beschrieben, wird das Frostwachstum durch die Wärme- und Stoffübergangsbilanz gesteuert (reflektiert durch die gekoppelten Ausdrücke für die Frostdicke und die Oberflächentemperatur), wobei die Feuchtigkeitsdifferenz zwischen der feuchten Luft und der Frostoberfläche als Frostwachstumstreiber wirkt. Daher müssen Glg. (3) und Glg. (6) zusätzlich zum Ausdruck für die absolute Feuchte an der Frostoberfläche iterativ gelöst werden. Um den Satz von Modellgleichungen zu schließen, wird der Wärmeübertragungskoeffizient h_c anhand der Nusseltschen Analogie definiert, während für den Massentransferkoeffizienten h_m die Lewis-Analogie verwendet wurde.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

Das Vereisungsmodell ist so implementiert, dass das Frostwachstum aus den lokalen Strömungseigenschaften unter Berücksichtigung der räumlichen und zeitlichen Verteilung der relevanten feuchten Luftströmungsgrößen: Geschwindigkeit U , Temperatur T und absolute Luftfeuchtigkeit A berechnet wird. Der Eintritt von Frost an einer kalten Wand wird durch die Keimbildungstheorie gesteuert. Nach dieser Anfangsphase bewegt sich die Frostfläche jedoch in Wandnormalen-Richtung, und die neu gebildete Schicht zwischen der kalten Wand und der Frostfläche wird als Porosität behandelt: Dort wird der feuchte Luftstrom blockiert und der Quell-/Sink-Term in die Transportgleichungen für die Temperatur und die absolute Luftfeuchtigkeit eingeführt.

Für jede Zelle des numerischen Netzes wird die Frostzone durch das Verhältnis der lokal berechneten Frostdicke x_s und der Höhe dieser Zelle Δx quantifiziert. Somit hat die definierte Menge einen Wert zwischen Null (die Zelle ist frostfrei) und Eins (die Zelle ist mit Frost gefüllt). Folglich wird nach der Darcy-Definition des Druckabfalls für die Ströme durch poröse Medien die Blockade des feuchten Luftstroms relativ gering sein, wenn der Frost beginnt, die Zelle zu füllen, und exponentiell wachsen, wenn die Zelle voll vereist ist. Dies zeigt sich in den Ergebnissen, wenn man den Gesamtdruckabfall betrachtet: Er wächst langsam, da die Frostdicke über den Lamellen relativ gering ist, und zeigt einen plötzlichen Sprung, da die Mehrheit der Zellen entlang der Lamellen fast voll mit Eis werden (dieses Verhalten wird reduziert, wenn das Netz verfeinert wird).

Mit dem erläuterten Frostmodell wurden zunächst verschiedene parametrische Studien mit Simulationen am symmetrischen Modell durchgeführt. Es folgen Simulationen mit der kompletten Wärmetauscherbaugruppe. Mehrere Gesamt-Wärmeübertrager-Simulationen wurden mit dem Vienna Scientific Cluster VSC 3 gerechnet. Er besteht aus 2020 Knoten mit Flüssigkeitstauchkühlung mit dem Intel Xeon IvyBridge-EP E5-2650v2 Prozessor mit 2,60 GHz (8 Kerne, 20 MB Cache). Jede Berechnung wurde parallel mit 64 Kernen durchgeführt. Die symmetrischen Simulationen wurden parallel mit einem Intel i7 -6800K HEXcore Prozessor mit 3,4 GHz und 32 GByte Speicher berechnet. Typische Berechnungszeiten für die kompletten Wärmeübertragersimulationen auf dem VSC waren drei Tage, abhängig von der Anzahl der Zellschichten, die symmetrischen Berechnungen benötigten Wandzeiten zwischen mehreren Stunden und einem Tag.

Abb. 19 zeigt die zeitliche Entwicklung während der Vereisung für den Referenzfall: Die Finnen- und Rohrtemperatur wurde auf einen Wert von 263 K festgelegt, die Randbedingungen auf der Luftzufuhrseite sind eine relative Luftfeuchtigkeit von 90 %, eine Temperatur von 275 K und eine blockprofil-Strömungsgeschwindigkeit mit dem Betrag von 2 m/s. Frost wird durch eine Iso-Oberfläche der Konstanten ϕ_f visualisiert, die auf einen Wert von 0,5 eingestellt ist. Bei der Vereisung wird immer mehr Volumen mit Frost gefüllt (was durch den angesammelten Frost angezeigt wird). Daher steigt auch der Druck (in der Abbildung ist der Frost mit dem lokalen Druckwert eingefärbt), was schließlich zu einem

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

starken Druckabfall über dem Wärmeübertrager führt. Da immer mehr Volumen durch Frost belegt ist, steigt die Strömungsgeschwindigkeit, damit der Massenstrom konstant bleiben kann. Dieser Massenstrom muss natürlich vom Ventilator bereitgestellt werden. Da die Ventilatoren normalerweise in Betriebskurven arbeiten (anstatt einen konstanten Massenstrom zu liefern), die eine nichtlineare Abhängigkeit zwischen Druck und Massenstrom aufweisen, gehen die Strömungsgeschwindigkeiten bei starken Frostbedingungen schließlich zurück.

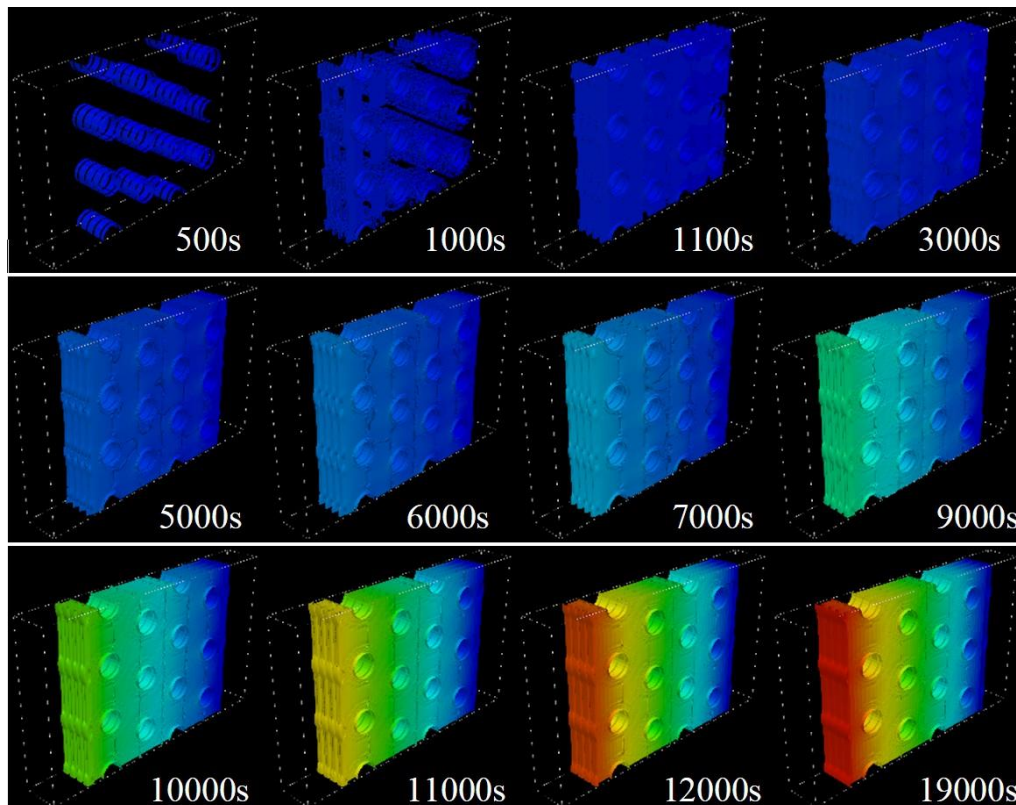


Abbildung 19: Akkumulierte Frostmasse, eingefärbt mit dem statischen Druck (Farbbereich 5 bis 2000Pa) für verschiedene Zeiten bei der nachfolgenden Vereisung des Wärmetauschers. Auf der Luftzufuhrseite sind folgende Randbedingungen festgelegt: Temperatur 275K, relative Luftfeuchtigkeit 90%, Geschwindigkeit 2m/s. Die Rohr- und Finnen ist auf 263K festgelegt. Frost wird durch eine Iso-Oberfläche der Konstanten α_f visualisiert, die auf einen Wert von 0,5 eingestellt ist. Die Strömungsrichtung ist von links nach rechts.

Die Änderung der Finnen- und Rohrtemperatur hat einen großen Einfluss auf die Geschwindigkeit des Vereisungsprozesses. Dies ist in Abb. 20 zu sehen. Hier ist die Frostansammlung für Finne- und Rohrtemperaturen von 259 K bis 269 K dargestellt. Die Bilder wurden für zwei verschiedene Frostzeiten in der ersten und zweiten Reihe extrahiert. Es ist leicht zu erkennen, dass die Vereisung bereits ein wesentlich langsamerer Prozess ist, wenn die Finnen- und Rohrtemperaturen um 2 K vom Referenzfall (263 K) auf 265 K erhöht werden.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

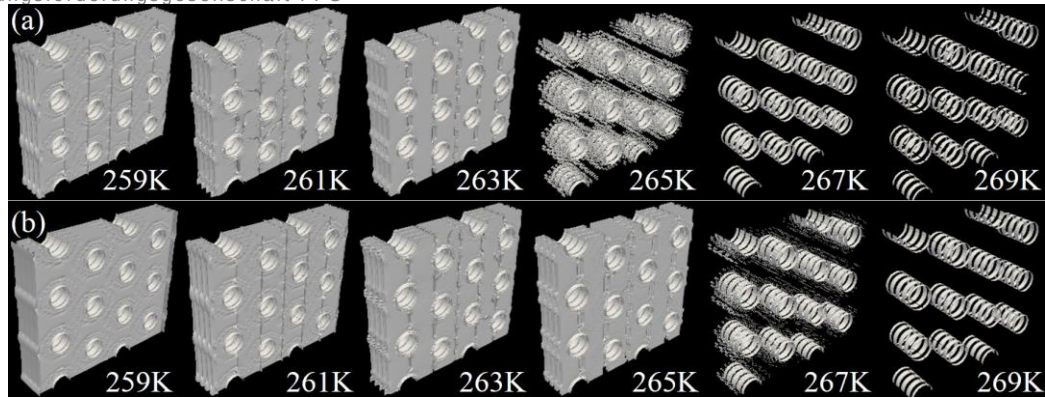


Abbildung 20: Akkumulierte Frostmasse für verschiedene Finnen- und Rohrtemperaturen von 259 K (links) bis 269 K (rechts). Auf der Luftzufuhrseite sind folgende Randbedingungen festgelegt: Temperatur 275 K, relative Luftfeuchtigkeit 90%, Geschwindigkeit 2m/s. (a) Vergleich zum Zeitpunkt 3000 s, (b) Vergleich zum Zeitpunkt 5000 s.

Auch die Änderung der Strömungsgeschwindigkeit hat Einfluss auf das Frostverhalten. Dies wird in Abb. 21 veranschaulicht, indem der durch die Geschwindigkeit gefärbte Frost für Geschwindigkeiten von 0,5 m/s bis 3 m/s für Temperaturrandbedingungen ähnlich dem Referenzfall dargestellt wird.

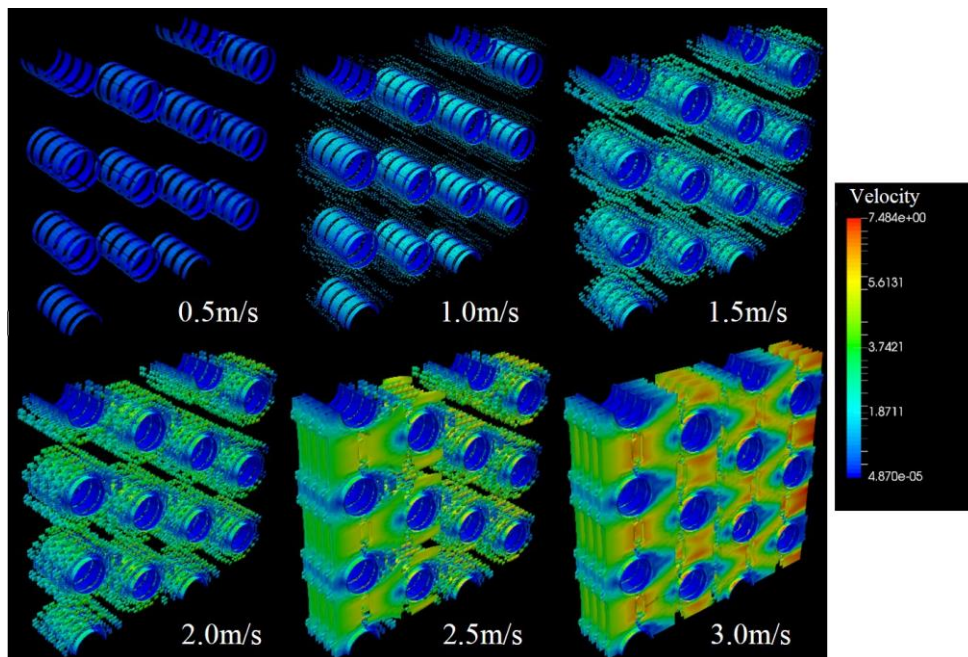


Abbildung 21: Akkumulierte Frostmasse für verschiedene Luftzufuhrgeschwindigkeiten von 0,5 m/s bis 3 m/s. Auf der Luftzufuhrseite sind folgende Randbedingungen festgelegt: Temperatur 275 K, relative Luftfeuchtigkeit 90 %. Die Rohr- und Lamellentemperaturen sind auf 263 K festgelegt. Die Frostzone ist durch die Geschwindigkeitsgröße farbcodiert. Die Zeit für alle 6 Figuren beträgt 1800 s.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

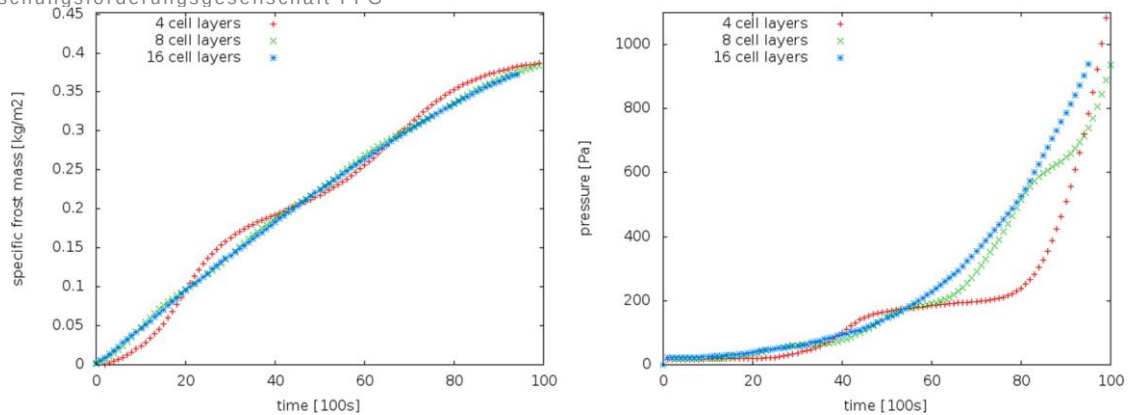


Abbildung 22: Akkumulierte Frostmasse (links) und entsprechender Druckverlust (rechts) für unterschiedliche Anzahl von Zellschichten zwischen den Finnen für Rohr- und Finnentemperatur von 263 K, Luftzufuhrseitentemperatur von 275 K, Luftzufuhrseiten-Relativfeuchte von 90 % und eine Luftzufuhrseitengeschwindigkeit von 2 m/s.

Um die Abhängigkeit der Ergebnisse vom Rechnernetz zu testen, wurden mehrere Zellschichten zwischen den Lamellen eingeführt. Abb. 22 vergleicht die angesammelte Frostmasse (links) und den statischen Druck (rechts) für diese Simulationen unter Verwendung der Randbedingungen des Referenzfalls. Es zeigt sich, dass vier Zellschichten nicht ausreichen, um eine glatte Vereisungs- und Druckkurve aufzunehmen. Die beobachteten Schwingungen können damit verbunden sein, dass jede der Schichten anschließend mit Frost gefüllt wird. Je mehr Zellschichten vorhanden sind, desto mehr wird dieser Prozess fortgesetzt. Mit 16 Zellschichten können keine Schwingungen beobachtet werden. Die meisten symmetrischen Simulationen wurden mit 8 Zellschichten durchgeführt, so dass (schrittweise) Schwingungen, die in den folgenden Ergebnissen noch vorhanden sind, auf diesen Parameter zurückzuführen sind und eine glatte Kurve mit einer Kurve extrahiert werden kann, die für eine bestimmte Zeit an die höheren Druckwerte gekoppelt ist.

Abb. 23 vergleicht die angesammelte Frostmasse und den damit verbundenen Druckverlust, wenn - ausgehend vom Referenzfall - die Temperatur von Rohren und Finnen von 259 K auf 279 K variiert wird. Ein schneller Anstieg des Druckabfalls ist nur bei niedrigen Temperaturen von 259 K auf 265 K vorhanden. Bei Rohr- und Finnentemperaturen von 259 K und 261 K kann eine vollständige Blockade des Wärmeübertragers in etwa ein bis zwei Stunden Echtzeit erreicht werden. Der in der Vereisungskurve beobachtete Gradient ist an die Finnen- und Rohrtemperatur gebunden. Natürlich wird bei Temperaturen ab 273 K kein Frost beobachtet. In dieser Abbildung werden Berechnungen für zwei verschiedene Anzahlen von Zellschichten verglichen. Wenn 16 Zellschichten verwendet werden, sind die Ergebnisse glatt und es kann kein schrittweises Verhalten (wie bei acht Zellschichten) beobachtet werden. Die Rechenzeiten verdoppeln sich in diesem Fall jedoch.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

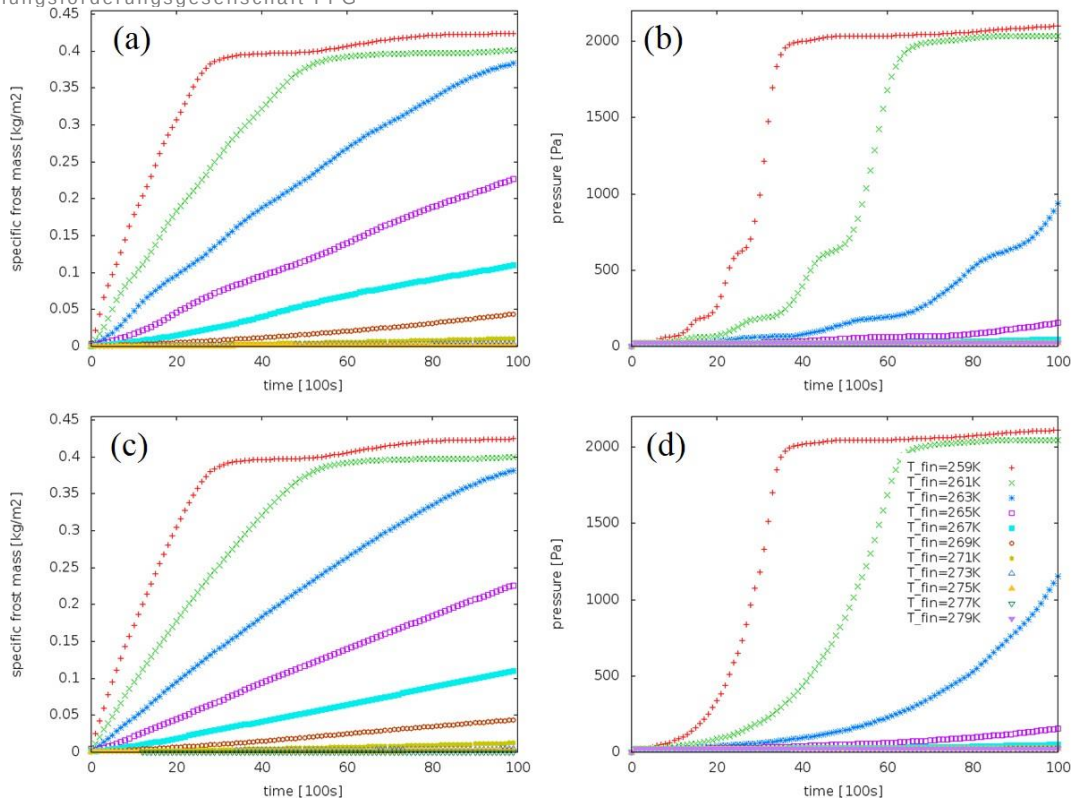


Abbildung 23: Akkumulierte Frostmasse (links) und entsprechender Druckverlust (rechts) für verschiedene Finnen- und Rohrtemperaturen bei einer konstanten Temperatur von 275K, einer konstanten relativen Luftfeuchtigkeit von 90% und einer Geschwindigkeit von 2m/s auf der Luftzufuhrseite; a,b: Ergebnisse aus Simulationen mit 8 Zellschichten zwischen Finnen; c,d: Berechnungen mit 16 Zellschichten zwischen den Finnen.

Die Abhängigkeit von Frostmasse und Druckverlust von der Temperatur auf der Luftzufuhrseite ist in Abb. 26 dargestellt. Die Temperatur an Rohren und Finnen wurde auf 263 K festgelegt und die relative Luftfeuchtigkeit auf der Zuluftseite beträgt 90 % für alle Berechnungen. Die Erhöhung der Temperatur der Luftzufuhrseite erhöht die Wassermenge, die für die Bildung von Frost auf der Lamelle und den Rohren zur Verfügung steht, so dass eine Verstopfung des Wärmetauschers bei höheren Temperaturen der Luftzufuhrseite wesentlich schneller erreicht wird.

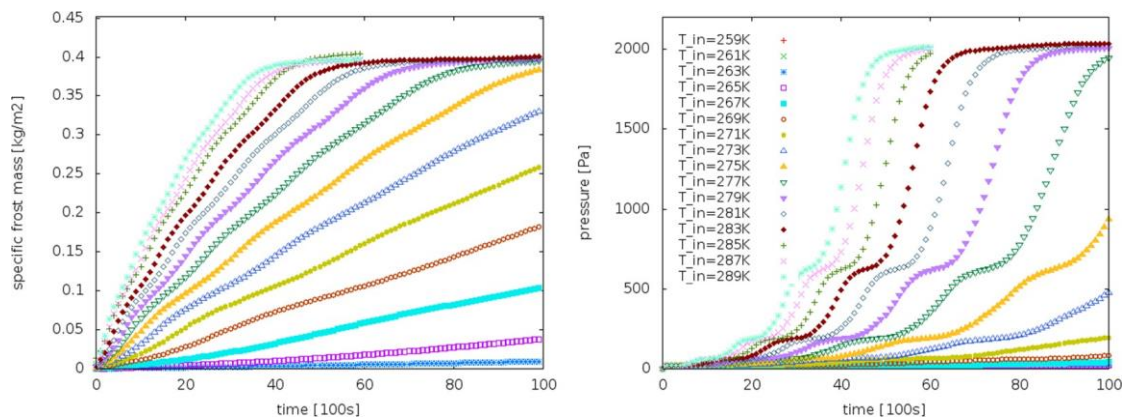


Abbildung 24: Akkumulierte Frostmasse (links) und entsprechender Druckverlust (rechts) für unterschiedliche Temperaturen auf der Luftzufuhrseite bei konstanter relativer Luftfeuchtigkeit von 90 % auf der Luftzufuhrseite und einer konstanten Finnen- und Rohrtemperatur von 263 K. Die Geschwindigkeit der Luftzufuhrseite ist auf 2 m/s festgelegt.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

Abb. 25 zeigt die Abhängigkeit von Frostmasse und Druckverlust bei Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit der Luftzufuhrseite von 10 % auf 100 % bei einer konstanten Temperatur auf der Luftzufuhrseite von 275 K - damit wird dort die absolute Feuchte (Wassergehalt) verändert. Die Temperatur an Finnen und Rohren wurde auf einen Wert von 263 K wie im Referenzfall eingestellt konstant gehalten. Ein ähnliches Verhalten wie bei der Variation der zuluftseitigen Temperatur (siehe Abb. 24) ist zu beobachten, wobei sich die Frostzeiten bei einer 100 %igen Luftfeuchtigkeit bei 275 K jedoch um etwa den Faktor zwei verschieben gegenüber einer Berechnung bei 90%iger Luftfeuchtigkeit bei 289 K gemäß dem angegebenen absoluten Wassergehalt.

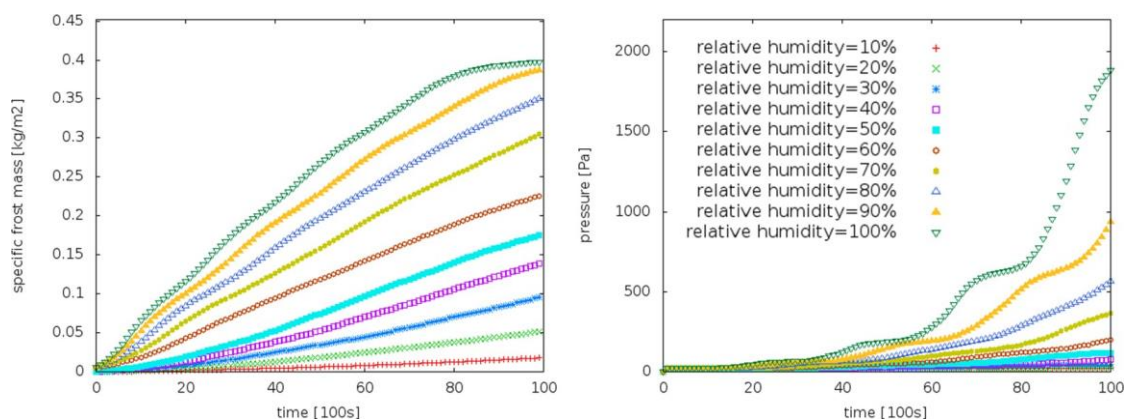


Abbildung 25: Akkumulierte Frostmasse (links) und entsprechender Druckverlust (rechts) für unterschiedliche relative Luftfeuchtigkeiten auf der Luftzufuhrseite und konstante Finnen- und Rohrtemperatur von 263 K und eine konstante Luftzufuhrseitentemperatur von 275 K. Die Luftzufuhrseitengeschwindigkeit ist auf 2 m/s festgelegt.

Die Frostmasse und der damit verbundene Druckverlust des symmetrischen Modells hängen auch vom Massenstrom durch den Wärmeübertrager ab. Es wurden Simulationen für verschiedene Geschwindigkeiten auf der Luftzufuhrseite im Bereich von 0,5 m/s bis 3 m/s durchgeführt. Alle anderen Randbedingungen entsprechen dem Referenzfall. Ein nichtlineares Verhalten kann sowohl für die Frostmasse als auch für den Druck beobachtet werden.

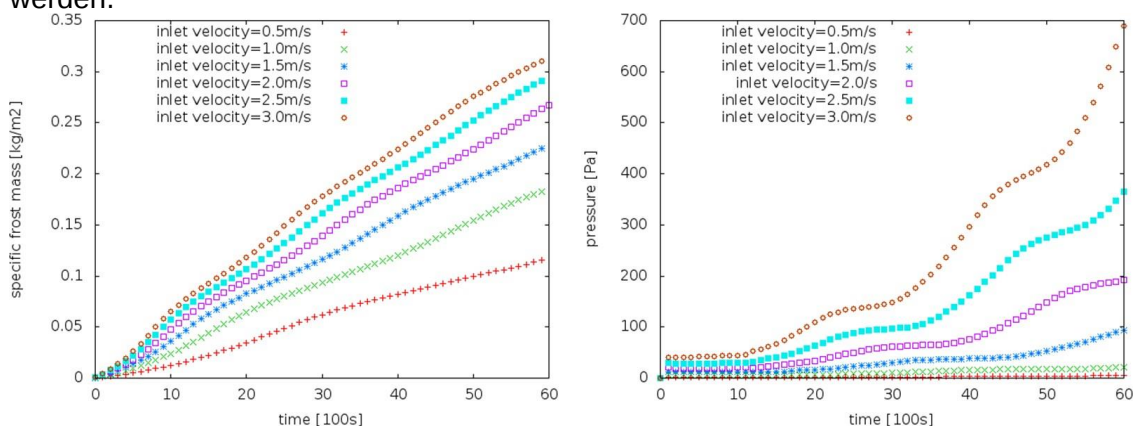


Abbildung 26: Akkumulierte Frostmasse (links) und entsprechender Druckverlust (rechts) für unterschiedliche Geschwindigkeitsgrößen auf der Luftzufuhrseite und eine konstante relative Luftfeuchtigkeit von 90%, konstante Finnen- und Rohrtemperatur von 263 K und konstante Luftzufuhrtemperatur von 275 K.

Das Wachstum der Frostschrift zwischen den Lamellen kann weiter analysiert werden, indem der Frostvolumenanteil α_f entlang von Linien senkrecht zur Strömung aufgetragen wird (siehe Abb. 27). Die Frostansammlungen beginnen mit kleinen Werten von α_f in Abb. 27a und führen zu einer nahezu vollständigen Frostabdeckung in Abb. 27c. Für jeden der Zeitschritte sind zwei Kurven dargestellt. Direkt vor den Rohren (orange) gezogene Linien zeigen eine geringere Frostbedeckung als Linien vor den Spalten zwischen den Rohren (blau), wo mehr Kaltwärmetauscherfläche vorhanden ist.

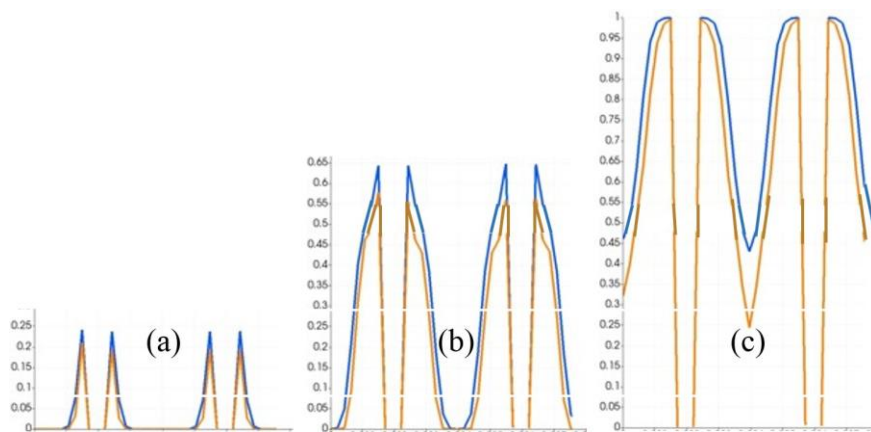


Abbildung 27: Akkumulation von Frost im Laufe der Zeit um die Lamellen herum, die zwei Lamellenschichten aufweisen. Die y-Achse zeigt den Frostvolumenanteil α_f .

Die Simulationen mit den Gesamt-Wärmeübertragermodellen folgten einem zweistufigen Ansatz. Im ersten Schritt wurde eine Laplace-Berechnung durchgeführt, um die Wärmeleitungsgleichung zur Verteilung (Diffusion) der Rohrtemperaturen auf die Finnenflächen zu lösen. Dann wurden die Temperaturen an Finnen und Rohren festgelegt und der Navier-Stokes-Löser mit dem oben vorgestellten Vereisungscode gestartet (und für die symmetrischen Simulationen verwendet). Für die Simulationen wurden Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit auf der Abluftseite gemäß den Experimenten auf 275 K und 90 % eingestellt. Die Geschwindigkeit wurde auf 2 m/s eingestellt.

Nachfolgend ist die Vereisung für die Simulationen mit Temperaturverteilung Konfiguration A auf den Rohren dargestellt, die dem Versuchsaufbau mit einem verdampfenden Kältemittel entspricht. Deutlich zu erkennen sind frostfreie Bereiche, die sich auf Rohre beziehen, die bei erhöhten Temperaturen etwas unter 273 K fast vollständig gasförmiges Kältemittel enthalten. Der Wärmeübertrager ist jedoch größtenteils vollständig mit Frost bedeckt. Dies ist nicht der Fall, wenn ein Temperaturprofil an den Rohren nach der Konfiguration B verwendet wird. Hier erlaubt eine lineare Temperaturverteilung zwischen 263 K und 273 K auf den Rohren (und damit den Finnen) nur an ausgewählten Stellen eine vollständige Wärmeübertragerabdeckung. Dies ist auch in Abb. 28 zu sehen, wo die Frostmasse durch statischen Druck für längere Frostzeiten eingefärbt wird. Da unterschiedliche Impuls-

Randbedingungen vorliegen, wird der Druck für diese Fälle über einen Bereich von ca. 31 Pa für die Konfiguration A im Vergleich zu 182 Pa für die Konfiguration B verschoben. Die Frostansammlung ist für die Konfiguration A wesentlich homogener als die lineare Temperaturverteilung der Konfiguration B, die im oberen Teil eine nahezu vollständige Blockade aufweist, die zu hohen lokalen Druckwerten führt. Dieses Teil ist in Abb. 29 vergrößert. Hier wird die angesammelte Frostmasse durch Temperatur (Abb. 29 links) und Geschwindigkeitsgröße (Abb. 29 rechts) eingefärbt. Die lokale Blockade führt dort zu geringen Strömungsgeschwindigkeiten. Die Frostmasse auf einer Scheibe des Wärmetauschers ist in Abb. 10 links dargestellt, um den starken Einfluss der linearen Temperaturrandbedingung der Konfigurationskonfiguration B weiter darzustellen.

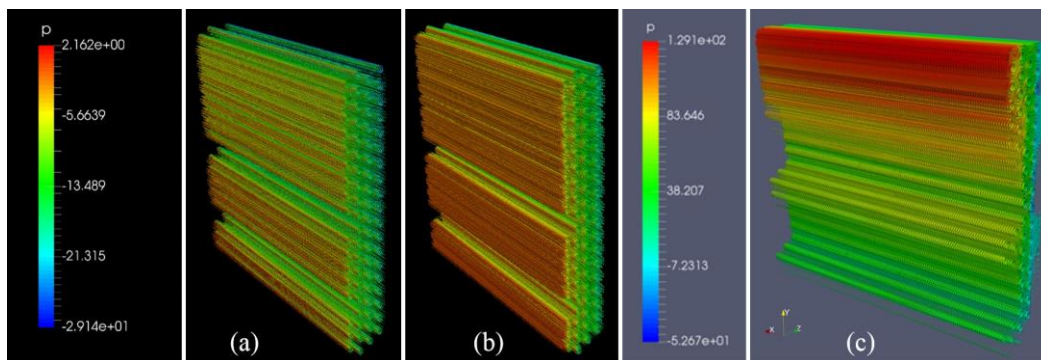


Abbildung 28: Frostmasse eingefärbt mit dem statischen Druck beim anschließender Vereisung des Wärmeübertragers für die Konfiguration A (a, b) und die Konfiguration B (c).

Der Einfluss der Frostbildung auf die lokalen Strömungsgeschwindigkeiten ist auch an einer vertikalen Schnittebene für eine Finnentemperaturverteilung gemäß Konfiguration B in Abb. 30 mehrfach dargestellt. Der Durchfluss wird immer ungleichmäßiger, wenn sich um die Rohre herum Frost ansammelt (vgl. die Vergrößerungseinsätze Abb. 30a* bis Abb. 30d*). Diese Geschwindigkeitsinhomogenitäten können auch ganz stromaufwärts bis zur Abluftseite beobachtet werden. Dieses Verhalten ist auch für die Lamellen- und Temperatureinstellung Konfiguration A zu sehen, wo im unteren Teil der Abluftseite hohe Geschwindigkeiten beobachtet werden können.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

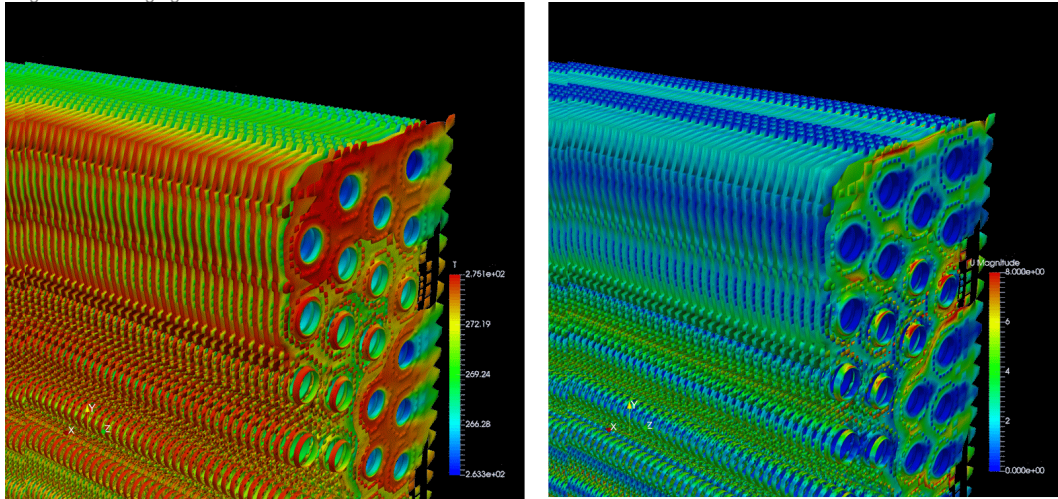


Abbildung 29: (links) Akkumulierte Frostmasse, eingefärbt mit der Temperatur für die Konfiguration B; (rechts) Akkumulierte Frostmasse, eingefärbt mit dem Betrag der Geschwindigkeit für die Konfiguration B.

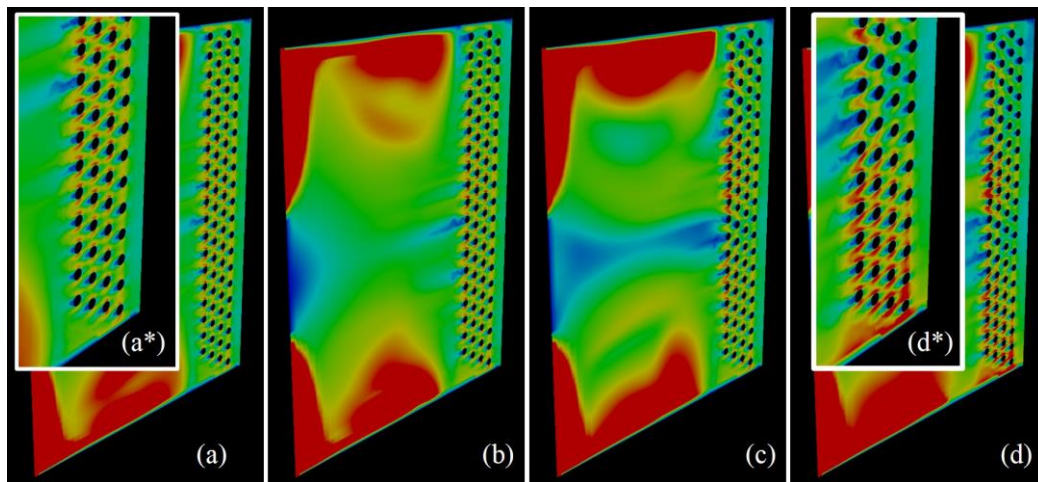


Abbildung 30: Betrag der Geschwindigkeit (Farbbereich 0,6 m/s) für einen vertikalen Schnitt durch den Wärmeübertrager für das Temperaturprofil Konfiguration B für verschiedene Zeiten bei der anschließenden Vereisung des Wärmetauschers. Für die Figuren (a) und (d) ist eine vergrößerte Ansicht als Einsätze (a*) und (d*) enthalten.

Die Berechnungen am Gesamt-Wärmeübertragermodell wurden mit den verschiedenen Finnen- und Rohrtemperaturkonfigurationen A und B und unterschiedlichen Impuls-Randbedingungen auf der Luftzufuhrseite durchgeführt. Abbildung 31 zeigt, dass die Frostmassenakkumulation bei gleichem Massenstrom für die Konfiguration B im Vergleich zur Konfiguration A wesentlich langsamer ist. Die Einführung einer Drall-Randbedingung auf der Luftzufuhrseite hat keinen Einfluss auf die Frostkurve, da die Strömungsgeschwindigkeiten an der Stelle des Wärmetauschers vergleichbar sind und kleine lokale Unterschiede keine wesentliche Rolle bei der Vereisung der Lamellen spielen. Bei der Änderung des Massenstroms auf der Zuluftseite ist eine Änderung gemäß den symmetrischen Parameterstudien zu beobachten.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

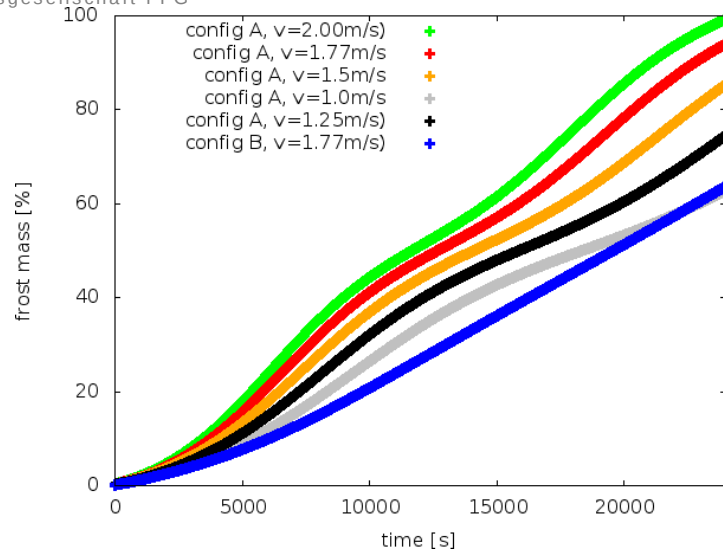


Abbildung 31: Vergleich der angesammelten Frostmasse für das Gesamt-Wärmeübertragermodell für verschiedene Rohr-/Finnentemperatur- und Geschwindigkeits-Randbedingungen.

Weiters können die Ergebnisse der symmetrischen Simulationen für die verschiedenen Rohr- und Rippentemperaturen zur Berechnung der Frostmasse und des Druckverlustes für verschiedene Rohr- und Finnenkonfigurationen verwendet werden. Die Frostmasse kann berechnet werden, indem man die spezifische Frostmasse bei einer bestimmten Temperatur addiert und mit dem Bereich multipliziert, in dem diese Temperatur beobachtet wird. Der Druck wird durch den Mittelwert über die verschiedenen Bereiche des Wärmetauschers angegeben. In Abb. 32 sind die Ergebnisse für die Finnen- und Rohrtemperatur-Konfiguration Konfiguration A und B zusammengefasst, verglichen mit einer konstanten Rohr- und Finnentemperatur von 263 K, die die größte Frostmasse ergibt. Die Rekonstruktion basiert auf den Ergebnissen und ist für 8 und 16 Zellschichten zwischen den Lamellen dargestellt.

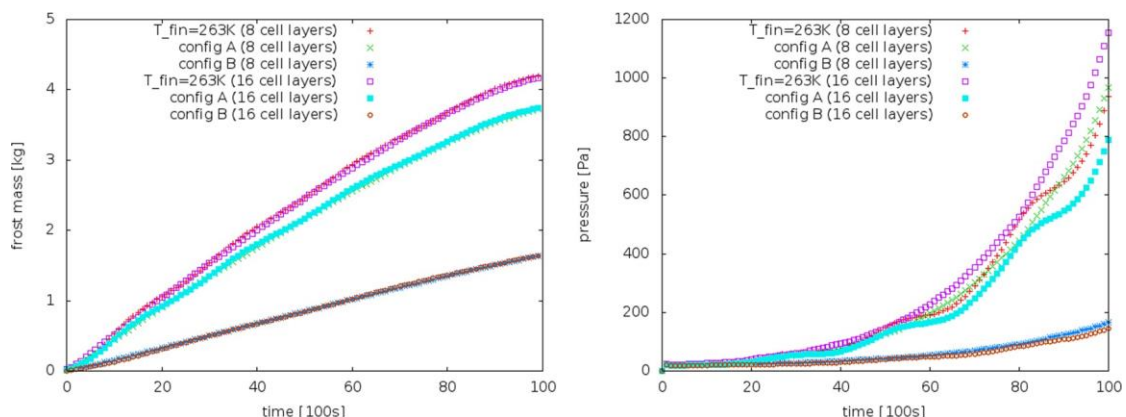


Abbildung 32: Akkumulierte Frostmasse über die Zeit (a) und entsprechender Druckverlust (b) für die Rekonstruktion eines Gesamt-Wärmeübertragers basierend auf den Ergebnissen des symmetrischen Modells. Die Ergebnisse der Rohr- und Finnentemperaturkonfigurationen Konfiguration A, Konfiguration B und einer Konstante von 263 K werden verglichen. In dieser Abbildung sind die Ergebnisse für zwei verschiedene Zellschichten zwischen den Lamellen dargestellt.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

In diesem Arbeitspaket wurde das Frostwachstum an einem Wärübertrager in der SilentAirHP-Wärmepumpenbaugruppe mit numerischen Ansätzen analysiert und mit experimentellen Ergebnissen verglichen. Frostmasse und Frostschichtdicke sind durch den Einsatz von Maßstabs- und Bilderfassungstechniken verfügbar. Unter Verwendung der experimentellen Randbedingungen für ein verdampfendes Kältemittel wurden numerische Simulationen an der gesamten Wärmetauscheranordnung durchgeführt. Frostmasse, steigende Luftströmungsgeschwindigkeiten und Druckanstieg beim anschließenden Frosten und Blockieren des Wärmetauschers wurden zusätzlich für den Betrieb mit einem nicht verdampfenden Kältemittel berechnet, das eine lineare Temperaturverteilung entlang der Kältemittelrohre gewährleistet.

Ein kleiner symmetrischer Abschnitt des Wärmeübertragers wurde numerisch analysiert, indem parametrische Studien für verschiedene Finnen- und Rohrtemperaturen sowie wechselnde Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit auf der Luftzufuhrseite des Wärmeübertragers durchgeführt wurden. Darüber hinaus wurden Simulationen mit verschiedenen Massenströmen durch den Wärmeübertrager durchgeführt.

Experimentelle Daten sind durch Messungen der Masse des angesammelten Frosts verfügbar. Nach etwa 3 Stunden hat sich im Experiment 2 kg Frostmasse angesammelt, wobei sich der Gradient der Akkumulation nach etwa 85 Minuten ändert. Dieses zweistufige Frostwachstum ist bei dem numerischen Ansatz und der Rekonstruktion nicht zu beobachten, wo ein homogenerer Anstieg zu beobachten ist, wobei sich jedoch auch der Gradient mit der Zeit verringert, wie im Experiment beobachtet. Die Rekonstruktion des Frostwachstums aus den Daten der symmetrischen Simulationen übervoraussagt die experimentellen Gewichtsmessungen um etwa 30 %, wenn man sich auf den ersten Wachstumsgradienten konzentriert. Es ist jedoch zu beachten, dass bereits geringe Temperaturänderungen zu höheren Werten zu einem schnellen Rückgang der Frostmasse in den Simulationen führen.

Darüber hinaus kann die im Experiment beobachtete kumulierte Frostschicht mit den numerischen Daten verglichen werden. Scharfe Strukturen werden im Anfangsfrostzustand beobachtet und bei nachfolgender Frostbildung des Bereichs zwischen den Lamellen immer mehr geglättet.

Die Fähigkeit, die Wärmeübertragerleistung einschließlich der Vereisung ohne multi-core Gesamt-Simulationsmodelle vorherzusagen, ist entscheidend für die Einführung dieser Vereisungsmodelle in die Entwicklungskette von Wärmepumpenwärmeübertragern, da bei einer Änderung der Geometrie des Wärmeübertragers (z.B. Abstand, Tiefe und Krümmung

der Lamellen) nur die symmetrischen Simulationen für einen gegebenen Satz von Randbedingungen durchgeführt werden müssen.

3.2 Experimentelle Methodenentwicklung

Aufbau der akustischen Messkuppel

Der Aufbau der akustischen Messkuppel (Abb. 33a) wurde im Rahmen der Detailplanung abgeändert (Abb. 33b), um flexibler auf unterschiedliche Geometrien von Wärmepumpen reagieren zu können. Das neue Konzept beinhaltet maximal sechs verschiebbare Ständer, die an ihrem obersten Punkt in einer Sternanordnung miteinander verbunden werden können. Der Abstand zum Mittelpunkt ist hierbei variabel. Die Mikrophone werden auf in der Höhe verstellbaren horizontalen Auslegern angebracht. Die Ausleger können zudem um den Ständermittelpunkt rotieren. Durch diese Bauart kann jeder beliebige Punkt im Raum erreicht werden. Abb. 33c zeigt das akustische Messgitter / Dome bei ersten Tests an einer Wärmepumpe.

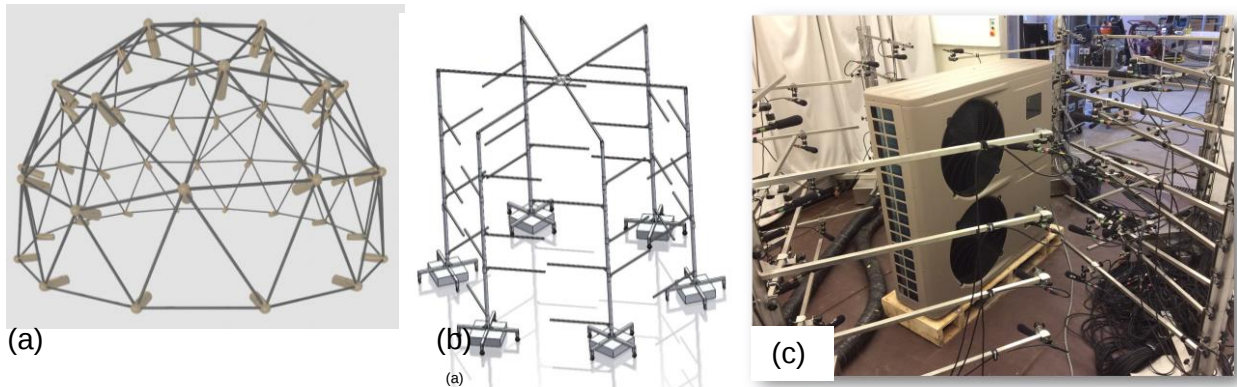


Abbildung 33: Akustisches Messgitter / Dome. (a) Konzept laut Antrag (b) verbessertes Konzept (c) erste Messungen mit dem aufgebauten akustischen Messgitter / Dome an einem industriellen Wärmepumpenprototyp.

Im Rahmen dieses Tasks wurde auch die Messwerterfassung konzipiert, realisiert und erfolgreich getestet. Es kam eine Mehrkanal-Datenaufzeichnungssystem zum Einsatz, dass die simultane Aufzeichnung von 64 Mikrophenen erlaubt. Softwareseitig wurde mit Reaper eine skriptfähige Recording-Umgebung ausgewählt und eingebunden. Sowohl die Kalibrierung der Mikrophone als auch die tatsächliche Messung ist über Tablets ferngesteuert aus den Klimakammern möglich.

Aufbau des Active Noise Cancelling Moduls

Active Noise Cancelling (ANC, Störschallunterdrückung) ist eine attraktive Methode, um die akustischen Emissionen von z.B. Luft-Wasser Wärmepumpen zu reduzieren und in ihrem Charakter zu verändern. Die Methode findet in modernen Kopfhören sowie im Automobil- und Flugzeugbereich bekannte Anwendungen. Aufgrund der Verfügbarkeit von schnellen Signalprozessoren kann die seit 1930 bekannte Methode nun erfolgreich realisiert werden.

Eine ungewollte Schallquelle wird mit einem Mikrophon aufgezeichnet und in Echtzeit mit Hilfe eines Prozessors analysiert. Im einfachsten Fall wird ein einzelnes phaseninvertiertes Signal erstellt und über einen Lautsprecher ausgegeben. Dieses mischt sich mit dem

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

ursprünglichen Signal. Destruktive Interferenzen führen zu einer deutlichen Reduktion des ursprünglichen Signals. In der realen Anwendung sind diese Interferenzen nicht perfekt und eine teilweise Auslöschung kann erreicht werden, die auch von der Position des Schallempfängers abhängt. Für die Anwendbarkeit dieser Methode im Feld der Wärmepumpen spielen Installation, Adaption und eine optimale Kopplung an die Struktur eine große Rolle. Zunächst wurde mit einem Rechteckskanal (siehe Abb. 34 links) ausgestattet mit Ventilator, Mikrophon und Lautsprecher gearbeitet. Im Anschluss wurde die Methode auf ein 300mm Rohr angewendet (siehe Abbildung 9 rechts). Die erreichbare Schallreduktion beim Rechteckskanal liegt bei etwa 7 dB (sh. Abb. 35 links). Die Schallreduktion wird v.a. durch Reduktion der primären Frequenzbeiträge erreicht (sh. Abb. 35 rechts). [14] [15]



Abbildung 34: (links) ANC Rechteckskanal im einem 16 Kanal Mikrophon Halbkreis zur Bestimmung der orts aufgelösten Schallreduktion; (rechts) 300 mm kreisförmige Variante

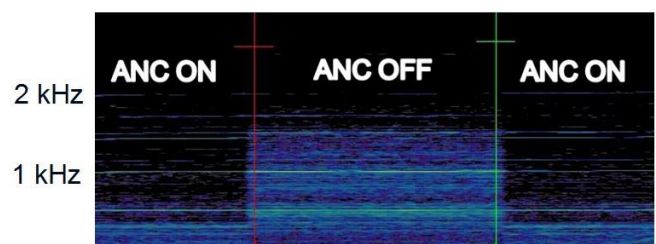
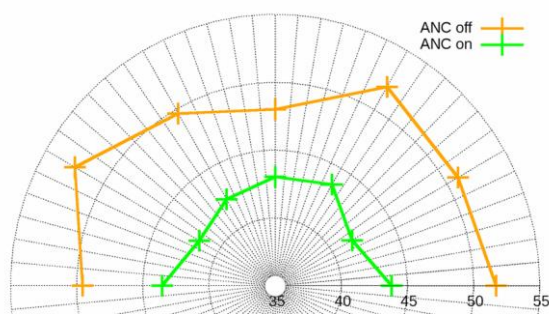


Abbildung 35: (links) Schallreduktionspotential beim Rechteckskanal. Der Radius gibt den gemessenen Schallpegel wieder.; (rechts) Die Aktivierung des Gegenschalls (ANC on) führt zur Unterdrückung bestimmter Frequenzen. Tonale Anteile bleiben dennoch im Vergleich zum ursprünglichen Signal (ANC off) erhalten.

Abbildung 36 zeigt einen Aufbau mit fünfzähliger Symmetrie: dabei wird das Rohr mit 400 mm Durchmesser auf fünf gleiche Bereiche aufgeteilt, um einen für Active Noise Cancelling optimalen ein-dimensionalen Schallcharakter zu erzielen. Abschließende Analysearbeiten Abb. 37 zeigt die resultierenden Frequenzspektren in den einzelnen Rohrsektoren jeweils mit deaktiviertem und aktiviertem ANC System. Es wurde gezeigt, dass es möglich ist, eine Schallquelle in fünf Kanäle aufzuteilen und die Schallereignisse mit nur einem

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

Referenzmikrofon mittels ANC zu reduzieren. Die besten Voraussetzungen für ANC sind bei kleinen Schallquellen, einer großen Lautstärke der Quelle, weichem Dämpfungsmaterial, kleiner Strömungsgeschwindigkeit und geringer Strömungsturbulenz gegeben. Zusammenfassend kann man feststellen, dass eindimensionale Schallfelder gut mit „Antischall“ bekämpft werden können, je dreidimensionaler die Anordnung der Schallfelder wird, desto schwieriger werden Gegenschallmaßnahmen. Für eine Anwendung im Bereich der Ausblasung des Ventilators scheint Gegenschall als Maßnahme derzeit nicht geeignet.

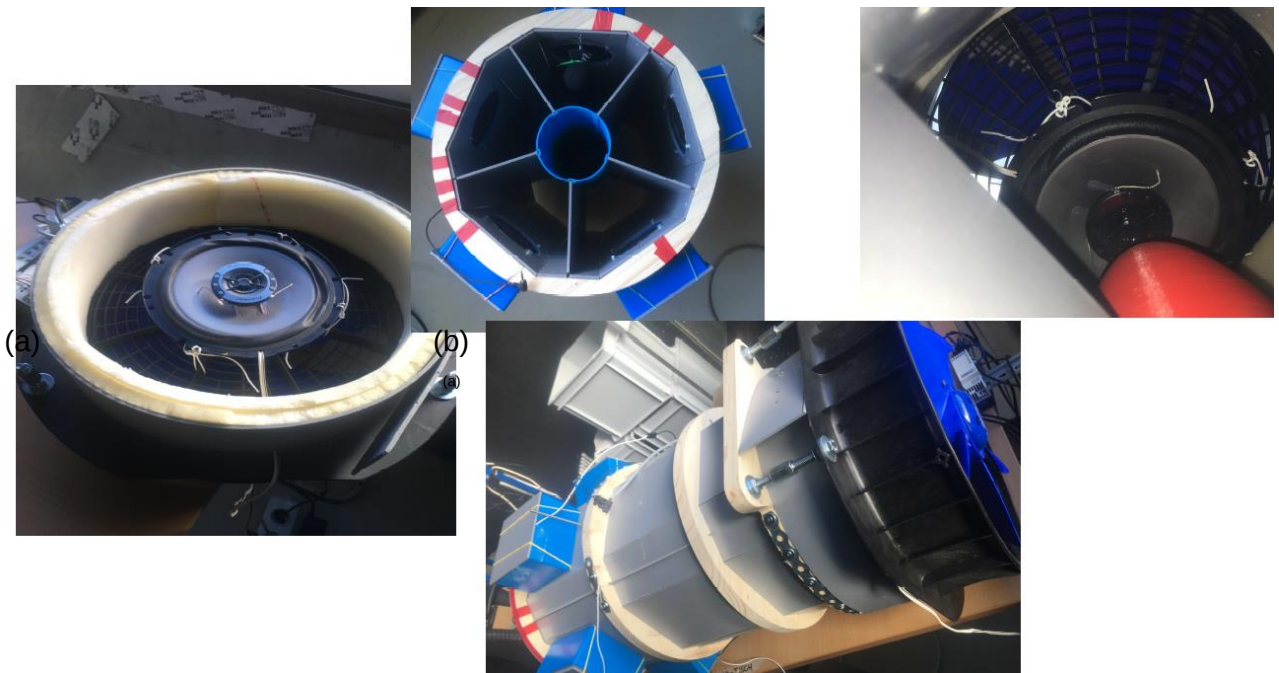


Abbildung 36: Aufteilung eines Rohres mit 400 mm Durchmesser auf fünf gleiche symmetrische Teile zur Reduktion der Dreidimensionalität des Schallfeldes.

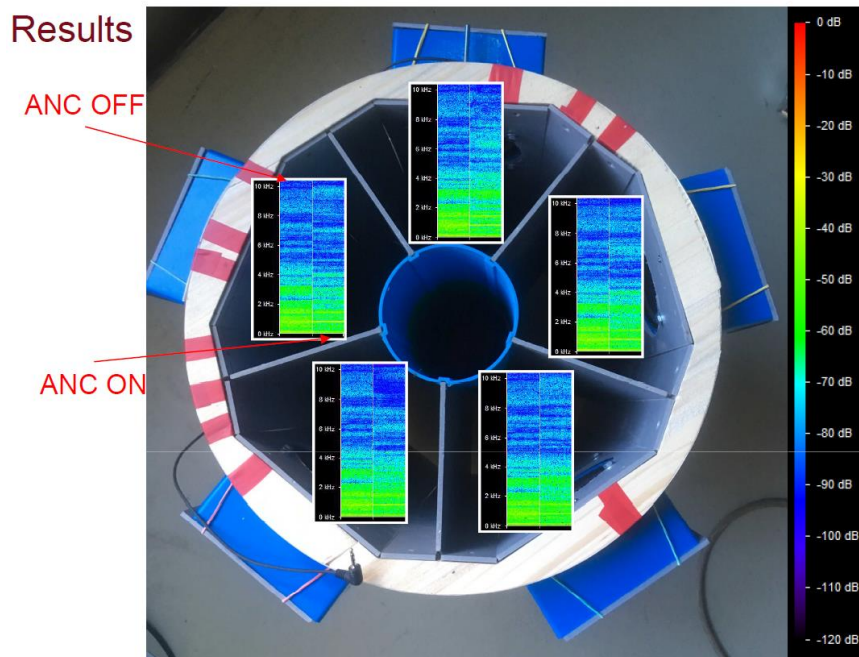


Abbildung 37: Resultierte Frequenzspektren in der unterteilten Rohrgeometrie jeweils mit deaktiviertem und aktiviertem ANC System.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

Aufbau des Messkanals

Im Rahmen des Projektes hat sich gezeigt, dass es sinnvoll ist, einige Komponenten mit Hilfe einer Halbraummessung zu charakterisieren. [16] [17]

Messungen wurden sowohl ohne Strömung (siehe Abbildung 38 links und 39) als auch in saugender und drückender Strömung (siehe Abb. 38 rechts) durchgeführt.

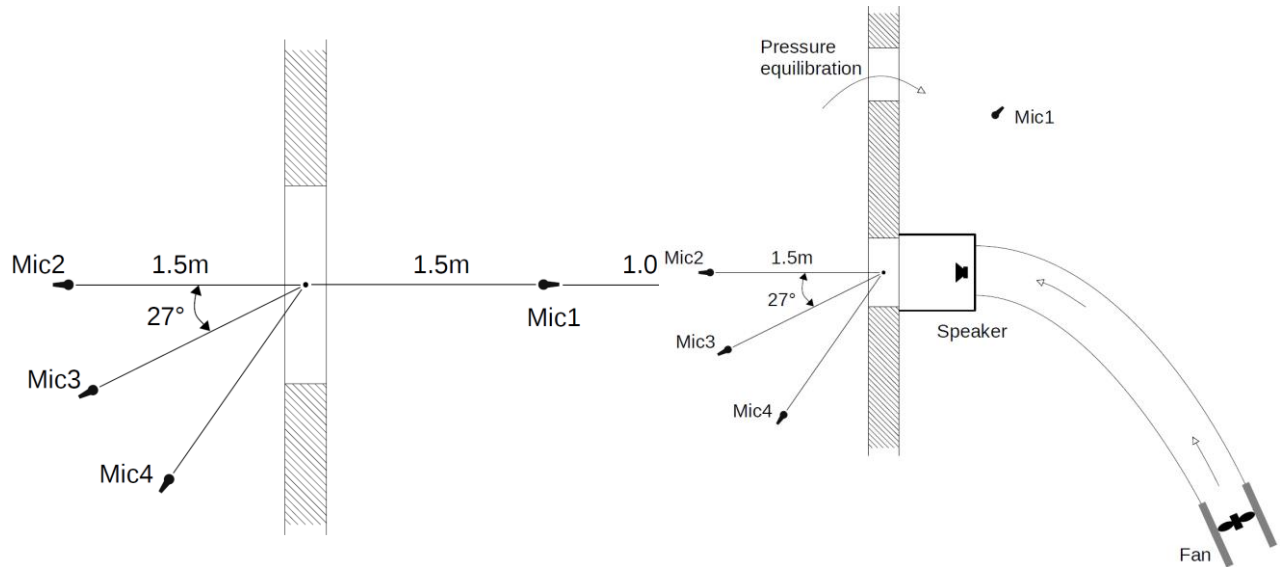


Abbildung 38: (links): Schematik des Messaufbaus zum Messung des Transmissionsverhaltens von WT und Schalldämmmaterialien ohne Strömung. (rechts): Aufbau für Messungen im saugenden oder drückenden Strömungsfeld.

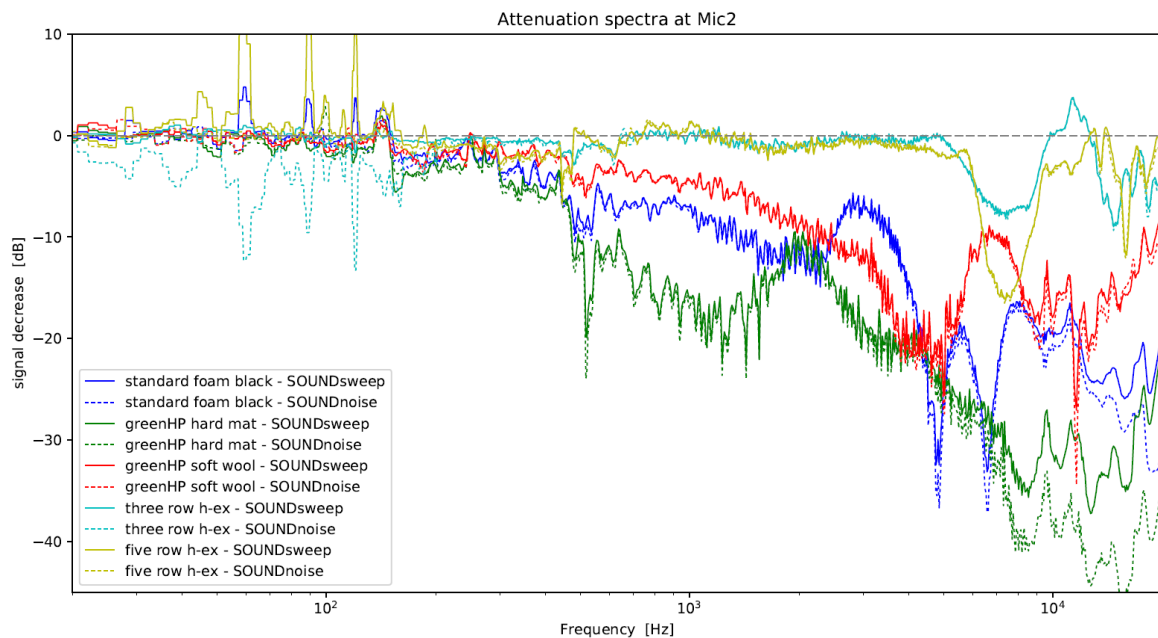


Abbildung 39: Spektrale Analyse der Daten des Mikrofons 2 dargestellt aus Differenz zum jeweiligen Signal ohne Wärmetauscher oder Dämm-Material

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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



Abbildung 40: Versuchsaufbau für Messungen der Transmissionseigenschaften von WT und Dämm-Materialien in saugender und drückender Strömung (Schematik siehe Abbildung 38 rechts).

Verbindung der Druckmesssensoren

Ursprünglich war die Messung des Schalldrucks an den Innenseiten des durchströmten Bereichs vorgesehen. Während der ersten Arbeiten im Projekt und nach Gesprächen in der Community wird der Messung der Vibrationen der Geräte ebenfalls eine große Bedeutung zugemessen. Die Schallschnelle an den Oberflächen steht im Zusammenhang mit dem Schalldruck und wird über Vibrationssensoren gemessen. Deshalb wurden die Vibrationssensoren anstelle von Wanddrucksensoren eingesetzt und damit strukturabhängige Schallschnelle zugänglich gemacht. Eine simultane Messung von Vibration (Schallschnelle), Schalldruck (mittels Mikrofone) und Strömungsgeschwindigkeit (mittels CTA Hitzdrahtanemometer) wurde realisiert und ausgewertet. Die Korrelation dieser drei Größen liefert aussagekräftige Aussagen über die Zusammenhänge der Beteiligten Schallproduktions- und Ausbreitungsmechanismen. [16] [17]

Diese Methode wurde bei einer innenaufgestellten Wärmepumpe und zwei unterschiedlichen Wärmepumpen in der Klimakammer erfolgreich getestet (siehe Abbildung 41 - 44). Mit dem entwickelten System ist die Bewertung baulicher Veränderungen an der Wärmepumpe (Kombinierte Aussage zeitlicher Mittelwerte, Untersuchung der Signalbeiträge mittels Crosscorrelation, Analyse transienter Ereignisse) möglich. Außerdem ist die Grundlage für (remote) Machine Health Monitoring gelegt (Strömungs- und Akustikuntersuchung am Außengerät, Fingerprinting von Betriebszuständen, Detektion/Überwachung von transienten Ereignissen).

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

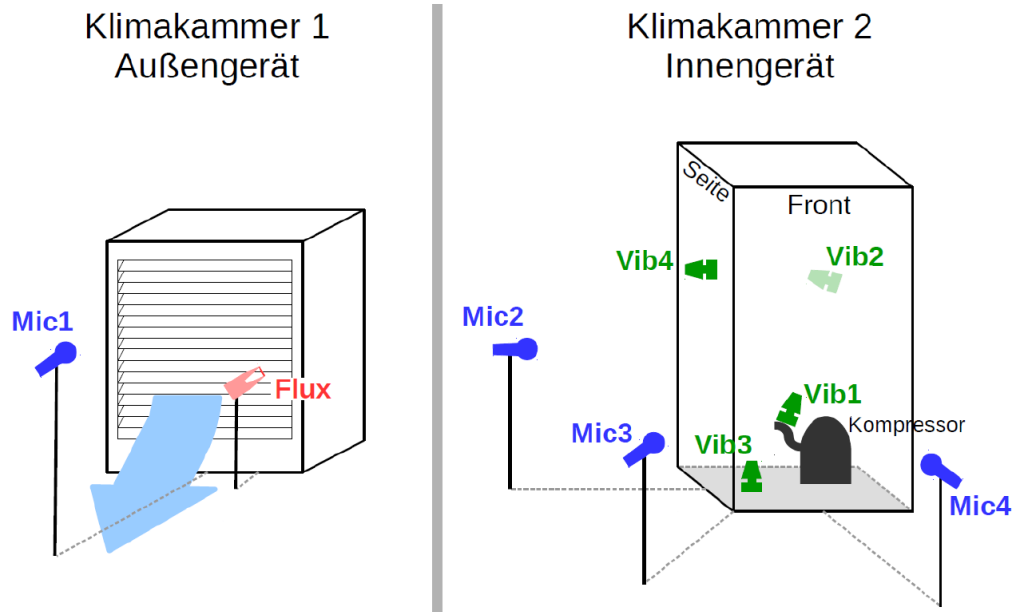


Abbildung 41: Sensorplatzierung bei Außengerät und Innengerät in der Doppelklimakammer des AIT. Dargestellt sind die zeitgleich gemessenen Sensoren für Strömung, Schall und Vibration.

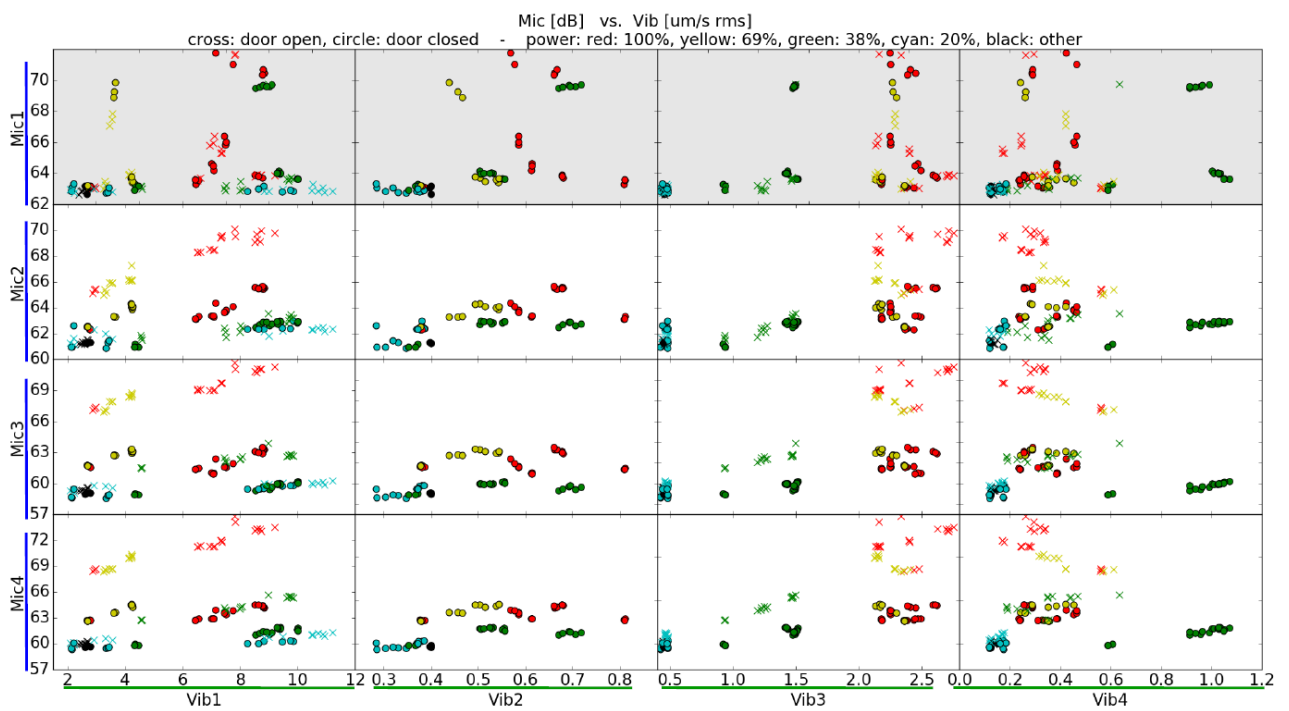


Abbildung 42: Korrelation zeitlicher Mittelwerte von Mikrofon- und Vibrationssignalen für unterschiedliche Wärmepumpeneinstellungen.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

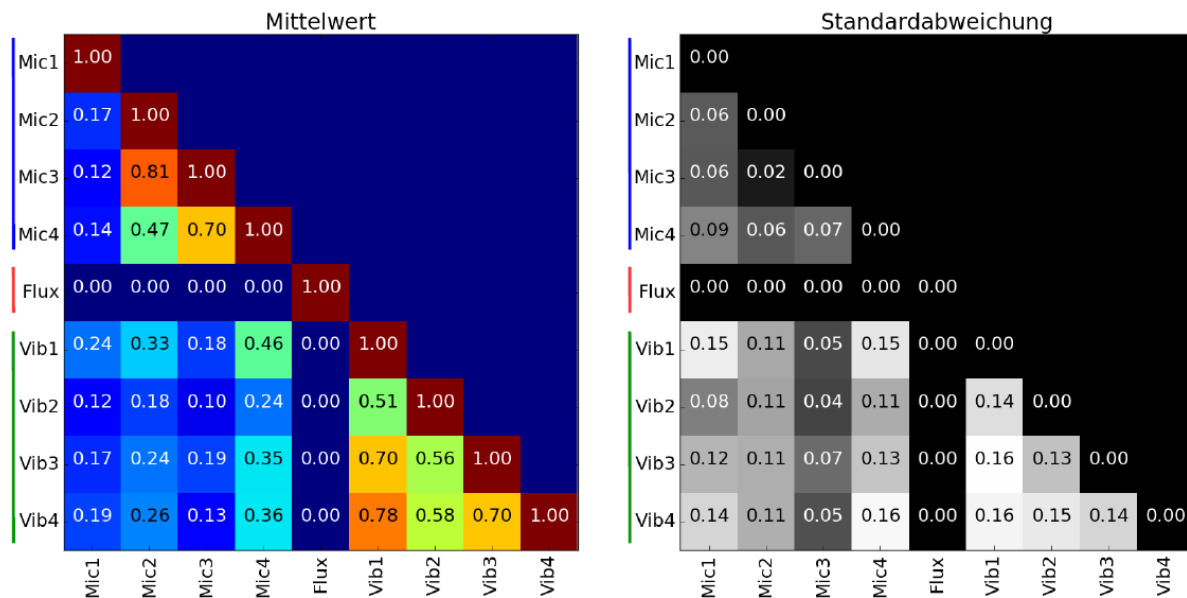


Abbildung 43: Kreuzkorrelation der Zeitreihen für eine geschlossene Wärmepumpenfront und 38% der Leistung.

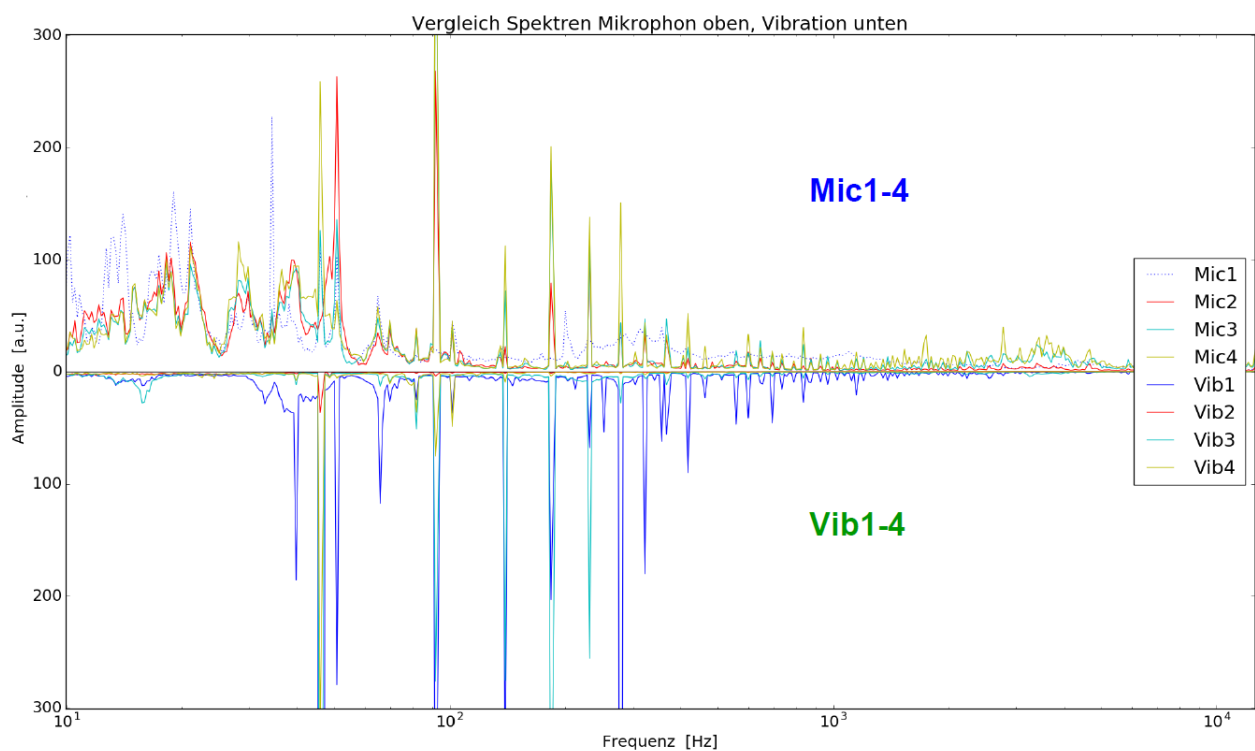
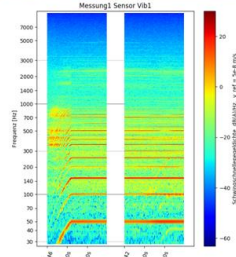


Abbildung 44: Vergleich von Mikrophon- und Vibrationssignalen. Es sind deutliche Übereinstimmungen zu erkennen, die eine Korrelation von Vibration und Akustik in ausgewählten Frequenzen veranschaulichen.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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



Base of compressor

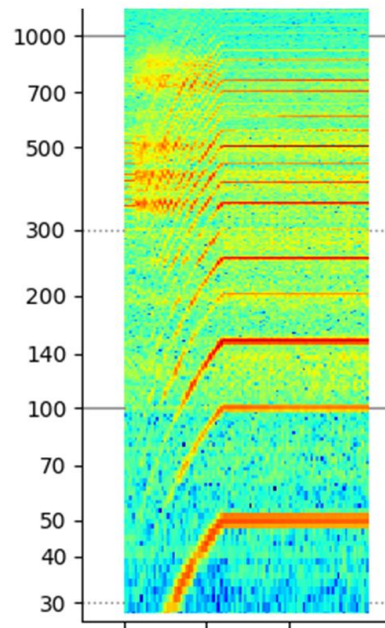


Abbildung 45: Kompressorhochlauf im zeitlichen Frequenzverlauf eines Vibrations-Sensors montiert auf der Basis des Kompressors. Gut zu erkennen ist die zeitliche Änderung des Frequenzverhaltens während des Hochlaufs. Die x-Achse zeigt die Zeit, die y-Achse die unterschiedlichen Frequenzen an.

3.3 Versuchsaufbau der Luft-Wasser-Wärmepumpe

Entwicklung der Versuchs-Luft-Wasser-Wärmepumpe

Die SilentAirHP besteht aus zwei Teilen die übereinander verbaut sind (Abbildung 46). Der obere Teil besteht hauptsächlich aus dem Ventilator und dem Verdampfer, während im unteren Teil die restlichen Komponenten verbaut sind. Aufgrund der Tatsache, dass beide Teile voneinander getrennt werden können, kann die SilentAirHP sowohl als Kompaktgerät als auch als Split-Gerät betrieben werden.



Abbildung 46: CAD – Zeichnungen der SilentAirHP.

Eine Systemskizze ist in Abbildung 47 zu sehen.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

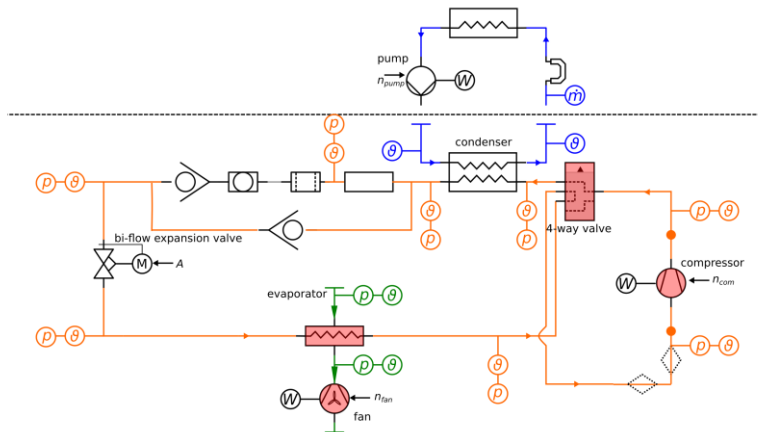


Abbildung 47: Systemskizze und Messschema der SilentAirHP. Alles unterhalb der strichlierten Linie ist in der tatsächlichen SilentAirHP verbaut. Die Wärmeabnahme, sowie die dazugehörigen Sensoren oberhalb der strichlierten Linie gehören zur AIT Klimakammer. Rot eingefärbt sind die schallkritischen Komponenten.

Aufbau der Luft-Wasser-Wärmepumpe

Die Versuchs-Luft/Wasser Wärmepumpe wurde aufgebaut (sh. Abbildung 48) und erfolgreich getestet. Die Arbeiten zur Anpassung der SilentAirHP an einigen weiterführenden Schallreduktionsmaßnahmen wurden durchgeführt.

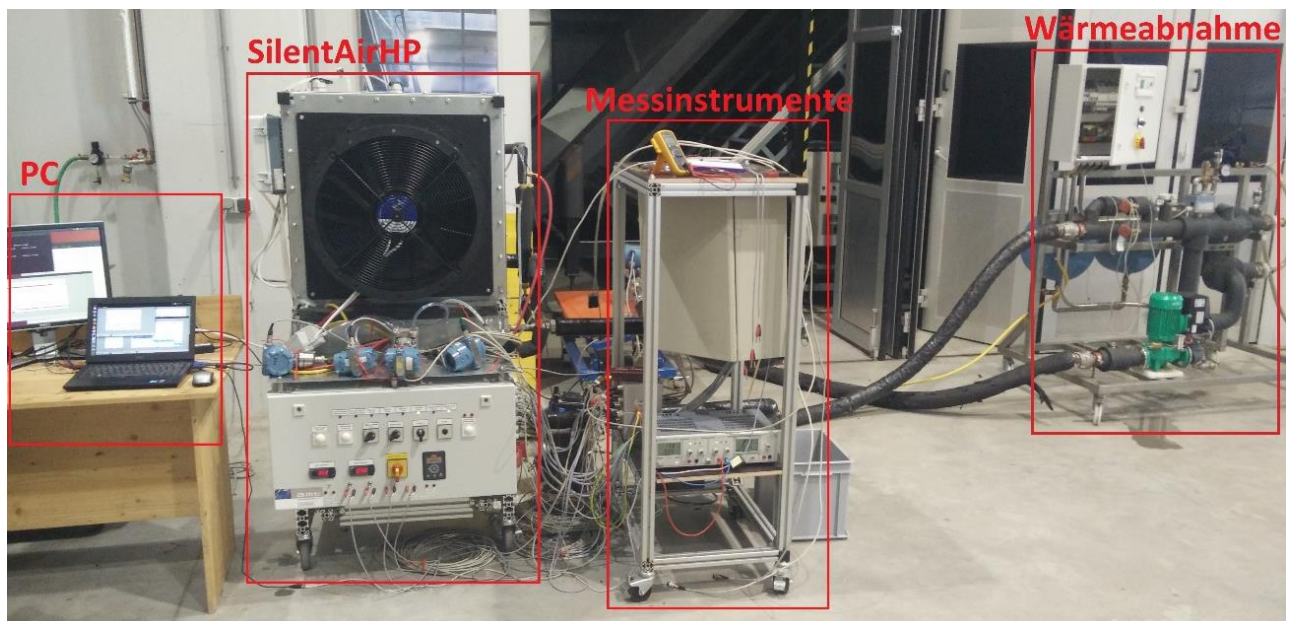


Abbildung 48: Foto der aufgebauten Testmessung während der Reglerentwicklung. Gesamtaufbau der SilentAirHP inkl. PC, Messinstrumenten und Wärmeabnahme

Entwicklung von Schallreduktionsmodellen

Unterschiedliche Schallreduktionsmodule/-maßnahmen wurden zeitgleich mit der CAD-Planung erstellt [16], um eine spätere Kompatibilität sicherzustellen. Exemplarisch dafür ist in Abb. 49 eine nachrüstbare Schallreduktionsmaßnahme mit einem Kulissenschalldämpfer dargestellt.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

Insgesamt wurden folgende Module ausgelegt:

- Luftschallisolation des Verdichters
- Körperschallisolation des Verdichters
- Kapselung des Verdichters
- Schallabsorption im geraden Luftkanal
- Schallabsorption im Umlenkluftkanal
- Kulissenschalldämpfer im geraden Luftkanal
- Kulissenschalldämpfer im Umlenkluftkanal
- Diffusor für Ventilator
- Flügelblattoptimierung des Ventilators

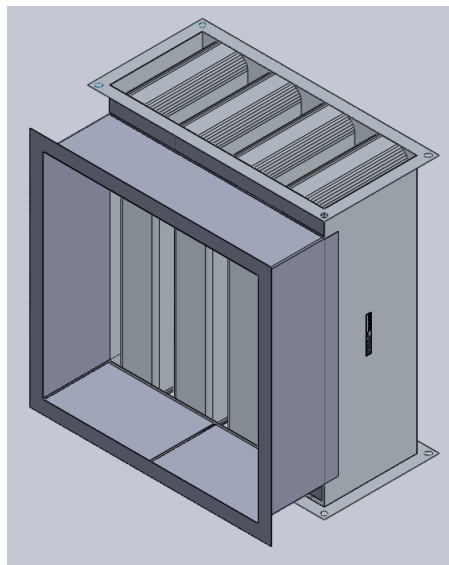


Abbildung 49: Kombinationsschalldämpfer zur Nachrüstung für eine Luftwärmepumpe. Der Einfluss des zusätzlichen Druckverlustes wird sowohl experimentell als auch mit den Simulationen untersucht werden.

Aufbau von Schallreduktionsmodellen

Die Schallreduktionsmodule wurden aufgebaut und sind einsatzbereit. [16]

Optimierung der Regelung auf Schallemissionen

Die ursprüngliche Regelung der SilentAirHP wurde auf Schallemissionen hin optimiert und Adaptionen bezüglich Schallzielgrößen implementiert. Dies ist auch weiter oben im Abschnitt „Entwicklung von Regelungsstrategien“ diskutiert.

3.4 Messungen

Untersuchung der Auswirkungen von Schallreduktionsmaßnahmen und Komponentenänderungen

Die Testphase wurde erfolgreich abgeschlossen. Die wichtigsten Resultate sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Vertiefend steht eine Diplomarbeit zur Verfügung. [18]

Tabelle 3: Bewertungskatalog aufbauend auf dem „Leitfaden zur Akustik von Luft-Wasser-Wärmepumpen“ des „Verbands Wärmepumpe Austria“. [19] Resultate beziehen sich auf die **jeweilige betrachtete Komponente der SilentAirHP**.

Maßnahme		Wirkungsmechanismus	Einfluss auf den Schallleistungspegel
Konstruktive Maßnahmen an der L/W-WP			
1	Kapselung des Verdichters	bei Außenaufstellung besonders wirksam	Ungekapselter Kompressor nicht verfügbar
2	Körperschallisolation des Verdichters		Wurde nicht untersucht
2a	Luftschallisolation des Verdichters	Anbringung einer Akustik-Verdichterhaube	Reduktion: <1 dB(A)
3	Körperschallisolation des Ventilators	Weniger Körperschallübertragung auf Gehäuse und Kanäle	Wurde nicht untersucht
4	Verbesserung der Strömung in Ventilatornähe	Diffusor	Reduktion: 2 dB(A)
4	Schallabsorbierende Kanalisolation	Dämmmaterial	Reduktion: <4 dB(A) bei maximaler Ventilator Drehzahl
6	Eckige Kanalumlenkungen mit zusätzlicher Auskleidung	Umlenkung als Reflexions-Schalldämpfer nutzen. Auf große Kanalbreite achten und Abstrahlung nach oben bevorzugen	Reduktion: 2 dB(A)
7a	Absorptions-Schalldämpfer	Umlenk-Kulissenschalldämpfer	Reduktion: 2.5 dB(A) ¹
7b	Absorptions-Schalldämpfer	Umlenkung	Reduktion: 2.5 dB(A) ²
8	Vermeidung von Kanalresonanzen	Abstimmung von Länge und Querschnitt der Kanäle	Wurde nicht untersucht
9	Leitbleche in Krümmern	Geringere Turbulenzen und geringerer Druckverlust	Wurde nicht untersucht
Komponentenspezifische Maßnahmen			
10	Lärmarmer Verdichter	Lärmreduktion der Quelle	Verdichter wurde nicht getauscht
11	Geräuscharmer Ventilator typ	Reduktion der Ventilatorgeräusche	Reduktion: 8 dB(A) ³
12	Entdröhnung der Ventilatorflügel	Geringere Körperschallabstrahlung durch die Flügel	Siehe 11
13	Optimierung des	Reduktion des	Siehe 4

¹ FC050@594rpm,6.67V 60.25 dBA // Ref FC050@594rpm,6.67V 62.55 dBA

² FC050@594rpm,6.67V 60.15 dBA // Ref FC050@594rpm,6.67V 62.55 dBA

³ ZN050@537rpm,4.79V 54.58 dBA // FC050@594rpm,6.67V 62.55 dBA // Daten bei gleichem Volumenstrom

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

	Betriebspunktes des Ventilators	Ventilatorgeräusches durch bessere Strömungsbedingungen	
14	Optimierung des Verdampfers	Reduktion des Druckverlustes über den Verdampfer	Abhängig von Ventilator Kennlinie (z.B.: 5 dB(A) bei Halbierung des Druckverlustes)
15	Anti-Eis-Beschichtungen	Verzögerung von Eisansatz, Veränderung Abtauverhalten des Wärmetauschers	Keine Änderung in der Schallleistung ⁴
Regelungstechnische Maßnahme			
16	Optimierung der Ventilator drehzahl	Durch verschiedene Schaltungen oder mit Vorwiderständen ist bei Bedarf eine einfache Drehzahlreduktion möglich	Abhängig von Ventilator Kennlinie (z.B.: 5 dB(A) bei Reduktion um 100 rpm)
17	Optimierung der Steuerung	Weniger Ein-/Aus-Schaltvorgänge und kürzere Betriebsdauer in der Nacht, Teillastbetrieb während der Nacht	Bei A2W35 und Nachtabsenkung (12h): 10 dB(A), Tag 4.5 dB(A) mehr. ⁵
18	Abtaustrategien	Geändertes Eisansatzverhalten	„Abtaugeräuschpegel“ < „Betriebs-pegel“
Aktive Maßnahmen			
19	Active Noise Cancelling (ANC)	Aktive Generierung von Gegenschall	Eindimensionale Schallfelder können mit Gegenschall gut bekämpft werden (~7dBA Reduktion.). Die dreidimensionalen Felder im Nachlauf des Ventilators können kaum beeinflusst werden.

In Abbildung 50 ist der Messaufbau dargestellt. Neben der Erfassung der thermodynamischen Größen der Klimakammer und der SilentAirHP wurden die Mikrofon signale des akustischen Doms, die synchronen Mikrofon- und Vibrationssignale und das transiente Gewichtssignal aufgezeichnet. Die Messungen wurden für die unterschiedlichen Schallreduktionsmaßnahmen durchgeführt. Abbildung 51 zeigt die Resultate einer Testmessung.

⁴ 10%-ige Verlängerung des Vereisungszeitraums

⁵ Bei A2W35, Teillast ganztags mit 69 dB(A) oder Nacht: 58.8 dB(A) und Tag 73.5 dB(A)

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

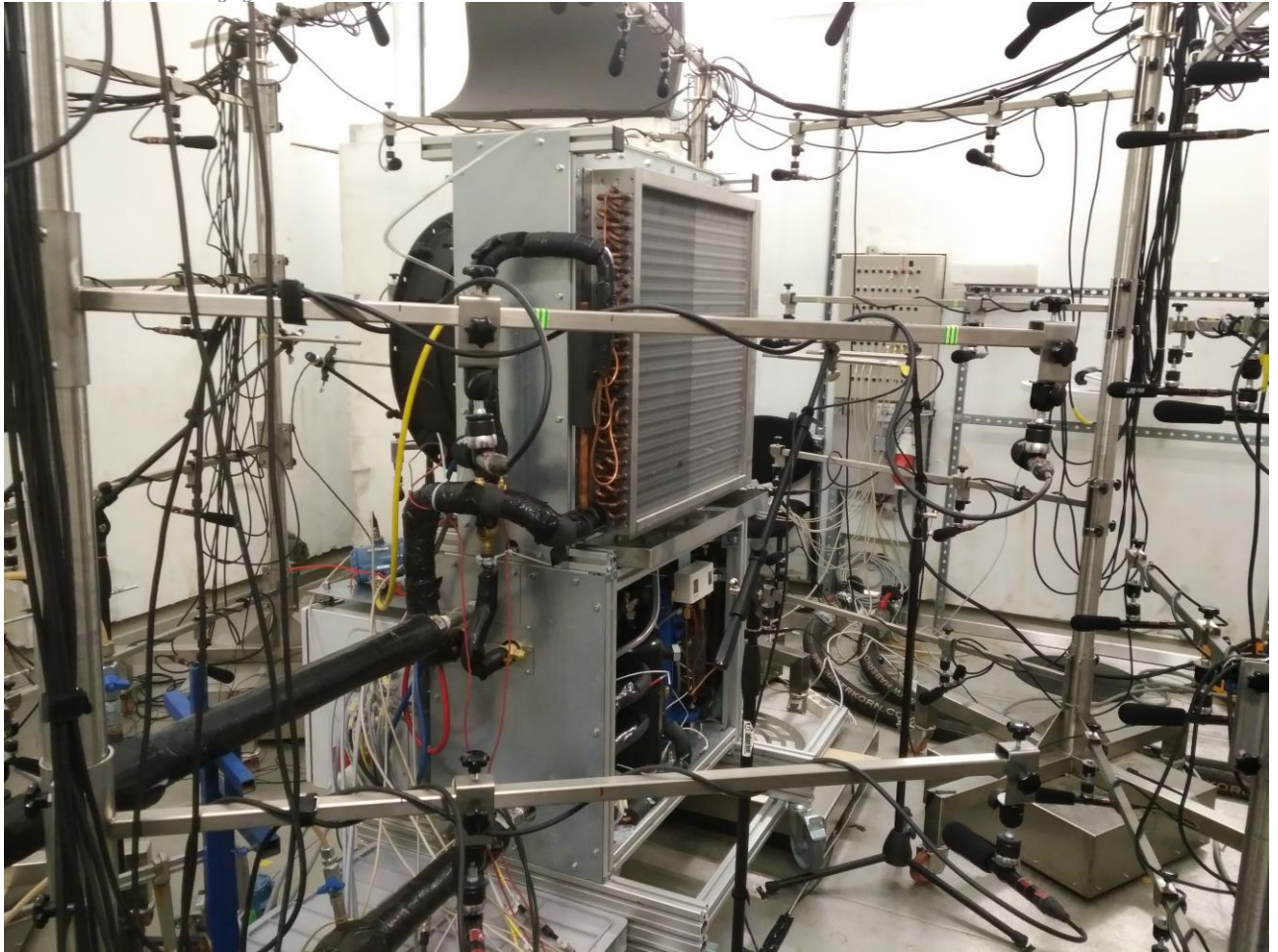


Abbildung 50: Messaufbau der SilentAirHP in der Klimakammer mit 64 Kanal Mikrofon-Dom, transienter Gewichtsbestimmung und synchroner Messung von Akustik und vier Vibrationssignalen.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

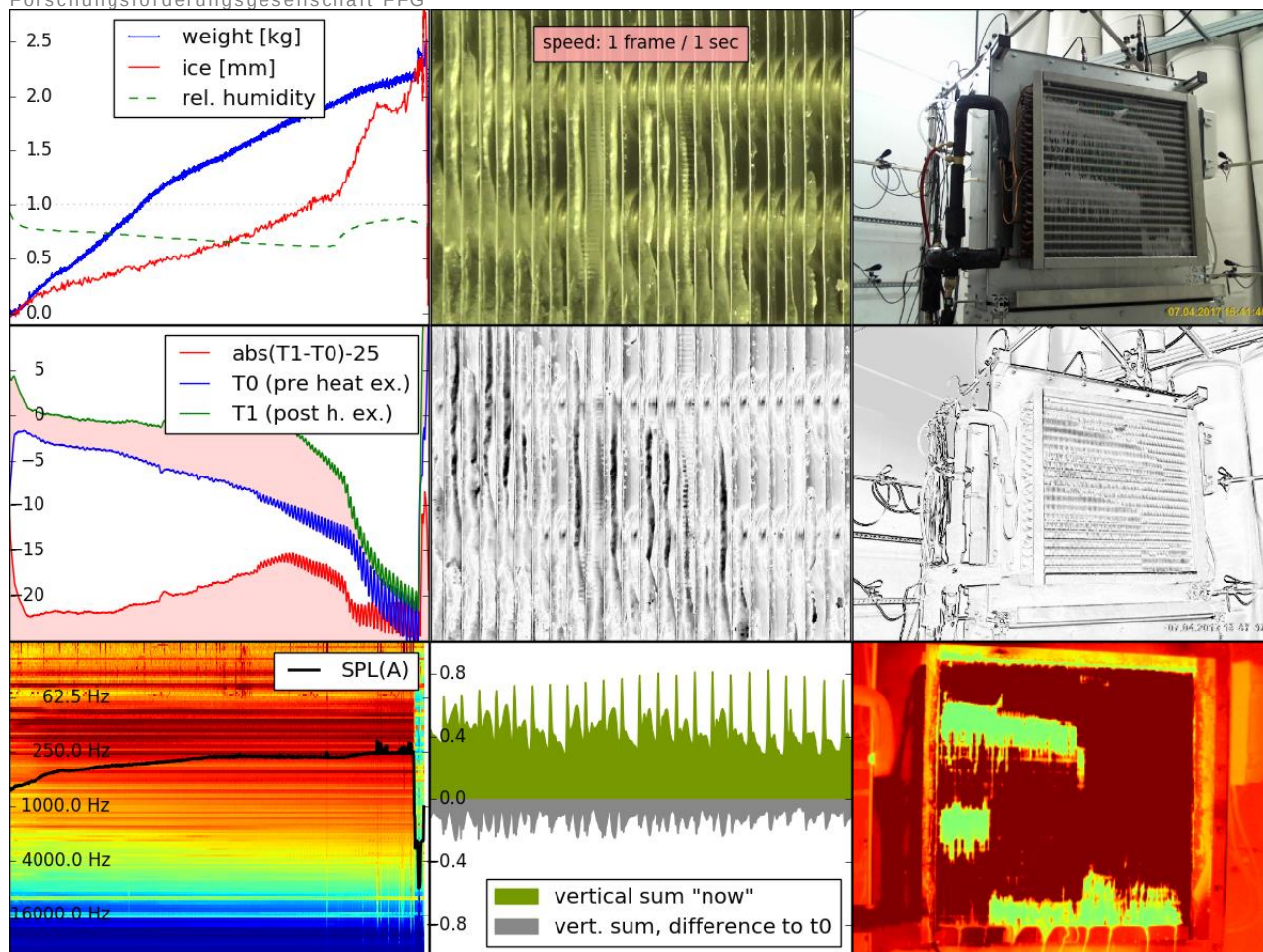


Abbildung 51: Überblick über das zeitliche Verhalten einer typischen Messung der SilentAirHP mit Vereisung. Von links nach rechts: erste Reihe: Gewicht und Eisdicke, Detailansicht Lamelle, Großansicht SilentAirHP Wärmetauscher; zweite Reihe: Temperatur im Hin- und Rücklauf des Kältekreises, Differenzbild der Lamellendetailansicht, Differenzbild des Überblicksbildes zur Veranschaulichung des Eisansatzes; dritte Reihe: zeitliche Entwicklung eines repräsentativen Mikrofonsignals, Helligkeitsanalyse des Eises an den Lamellen zur Eisdickenbestimmung, thermographische Aufnahme des Wärmetauschers.

Im Rahmen der Messungen wurden zunächst Hintergrundmessungen durchgeführt. Dies zeigt den Einfluss der notwendigen Klimakammertechnik.

Tabelle 4: Hintergrundmessung mit unterschiedlichen Einstellungen der Klimakammertechnik. Berechnet wurde der fiktive Schalleistungspegel der ausgeschalteten Wärmepumpe bei einer Temperatur von 2°C und einer relativen Luftfeuchte von 84%.

setting	water pump	humidity control	temperature control	heat pump	compressor	fan	SPL (dB(A))
1	off	off	off	off	off	off	35,7
2	off	off	off	on	off	off	50,9
5	off	off	on	off	off	off	53,7
4	off	on	on	off	off	off	53,6
3	on	on	on	off	off	off	53,7

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

Weiters wurde der Einfluss der für die Konditionierung der Klimakammer notwendigen Klimakammertechnik auf die Messung des Schallleistungspegels bei einer drehzahlabhängigen Ventilormessung bestimmt.

Tabelle 5: A-bewerteter Schallleistungspegel als Funktion der Steuerspannung des Ventilators; Untersuchung des Einflusses der Klimakammertechnik.

ZN050, fan setting (Volt)	SPL dB(A), 000 = Wasserpumpe aus, Regelung Luftfeuchtigkeit und Temperatur aus	SPL dB(A), 000 = Wasserpumpe ein, Regelung Luftfeuchtigkeit und Temperatur ein
0	50,9	
1,79	50,7	56,1
2,68	50,8	56,1
3,57	51,4	56,4
4,46	53,3	57,0
5,36	56,8	58,9
6,20	60,6	61,6
7,14	64,5	65,0
8,04	67,8	68,1
8,93	70,6	70,7

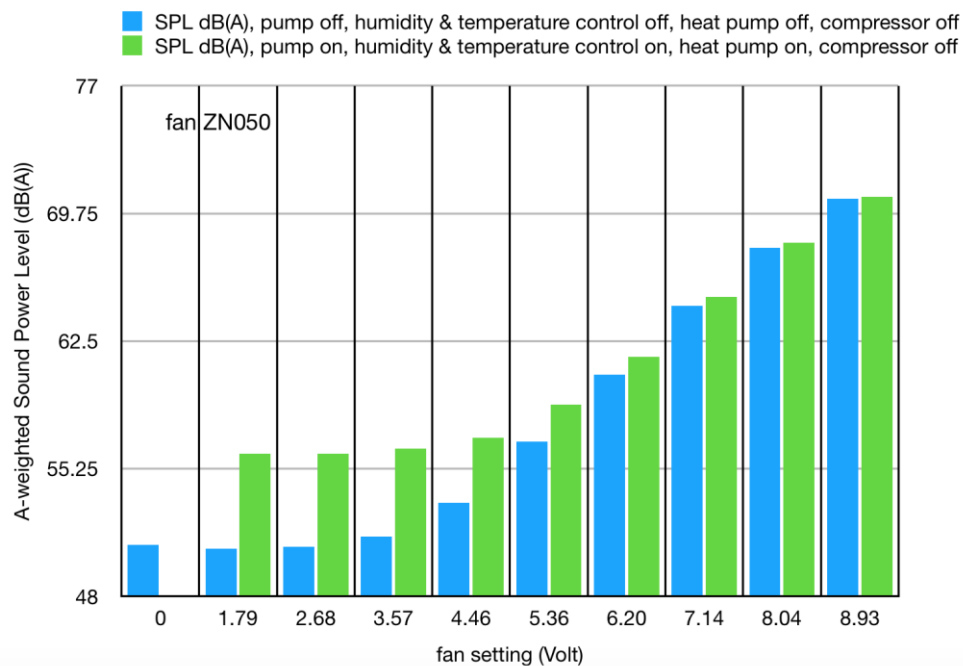


Abbildung 52: A-bewerteter Schallleistungspegel als Funktion der Steuerspannung des Ventilators bei der Untersuchung des Einflusses der Klimakammertechnik. Die beiden Ventilatoren ZN050 und FC050 haben unterschiedliche Drehzahl als Funktion der Steuerspannung. 10V Steuerspannung entsprechen 1120 rpm beim ZN050 und 890 rpm beim Ventilator FC050.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

Danach wurden ventilatordrehzahlabhängige akustische Emissionen vermessen:

Tabelle 6: A-bewerteter Schallleistungspegel als Funktion der der Steuerspannung des Ventilators

Ventilator- einstellung (Volt)	SPL dB(A), ZN050	SPL dB(A), FC050, Kulissenschall- dämpfer	SPL dB(A), FC050	SPL dB(A), FC050, Umlenkung
2,68	50,8		50,4	50,1
3,57	51,4			50,6
4,46	53,3	51,9	53,3	52,1
5,36	56,8	54,5	56,7	54,7
6,20	60,6	58,5	60,6	58,3
7,14	64,5	62,0	64,5	62,0
8,04	67,8	66,1	67,8	65,0
8,93	70,6	68,8	70,5	67,6
9,82		71,7	73,0	70,4

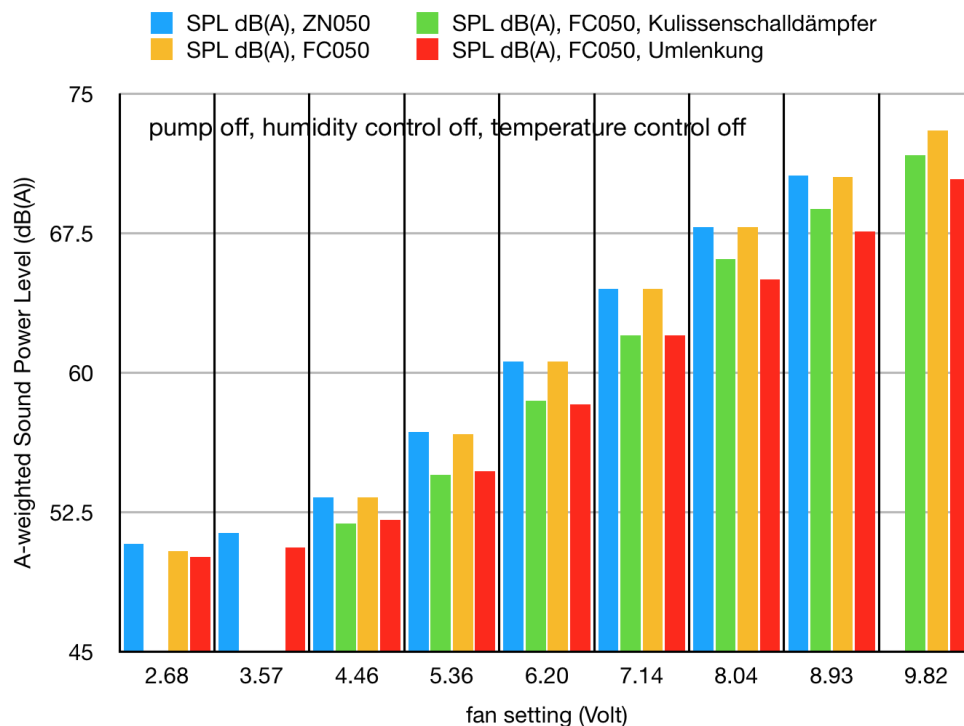


Abbildung 53: A-bewerteter Schallleistungspegel als Funktion der Steuerspannung des Ventilators für verschiedene bauliche Schalldämm-Maßnahmen und 2 unterschiedliche Ventilatoren

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

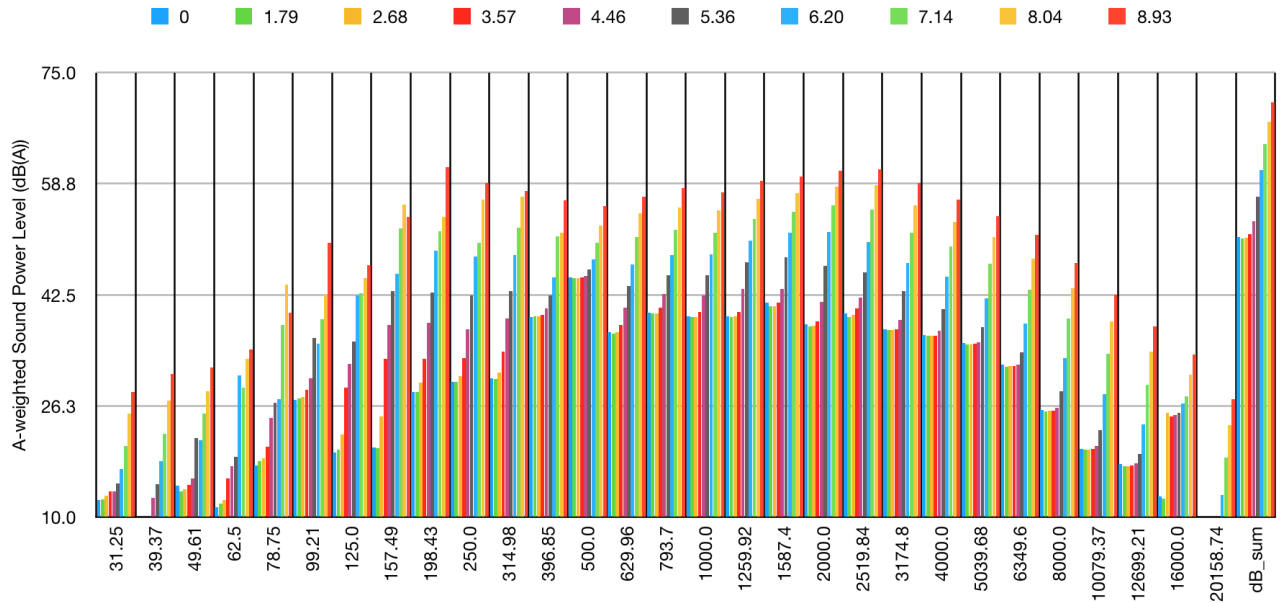


Abbildung 54: Spektraldarstellung des A-bewerteter Schallleistungspegels als Funktion der Steuerspannung des Ventilators ZN050

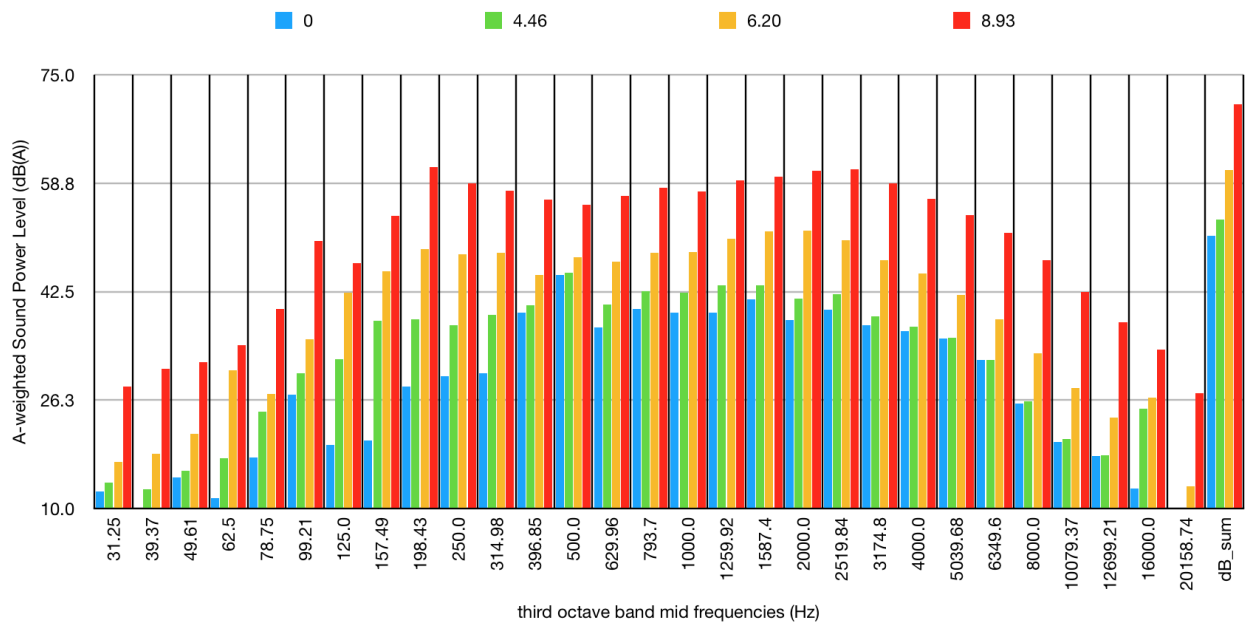


Abbildung 55: Detail-Spektraldarstellung des A-bewerteter Schallleistungspegels als Funktion der Steuerspannung des Ventilators ZN050

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

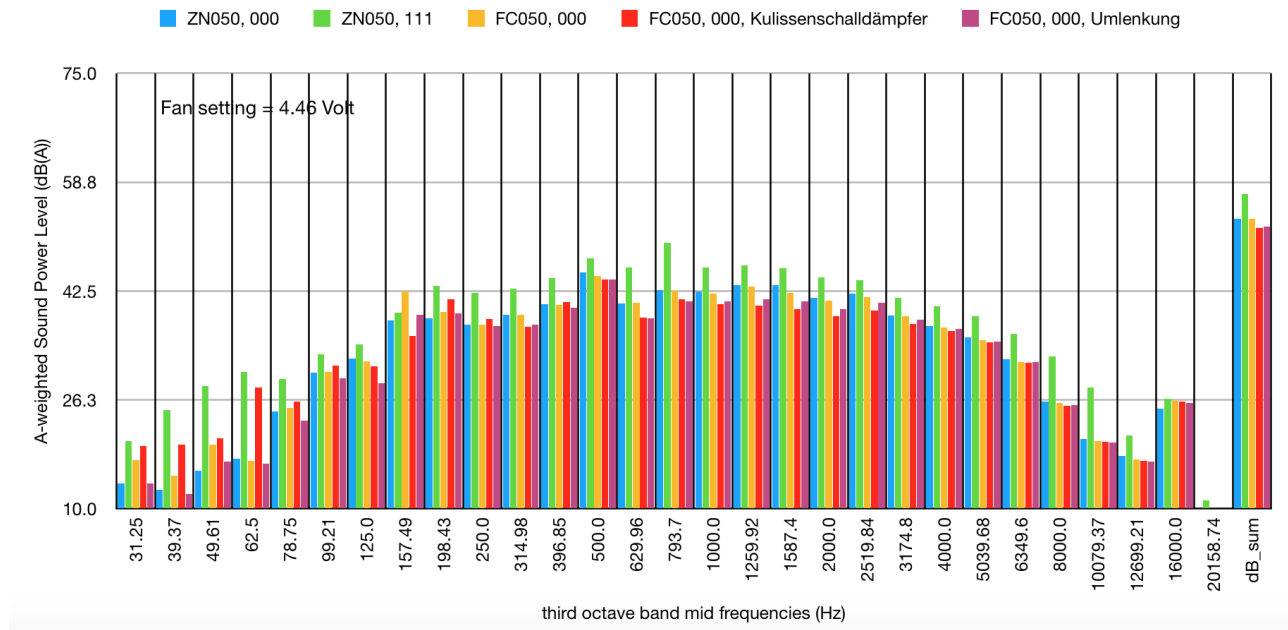


Abbildung 56: Spektraldarstellung des A-bewerteter Schallleistungspegels für eine Ventilator-Steuerspannung von 6.20 Volt für 2 unterschiedliche Ventilatoren und unterschiedliche Schalldämm-Maßnahmen

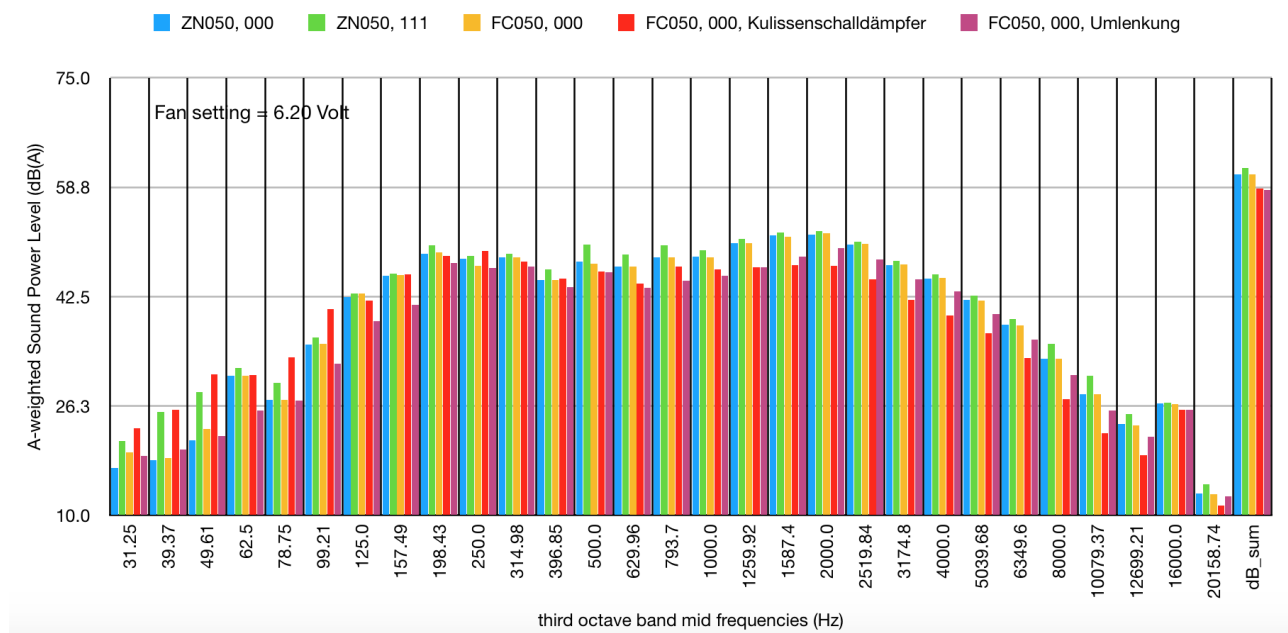


Abbildung 57: Spektraldarstellung des A-bewerteter Schallleistungspegels für eine Ventilator-Steuerspannung von 6.20 Volt für 2 unterschiedliche Ventilatoren und unterschiedliche Schalldämm-Maßnahmen

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

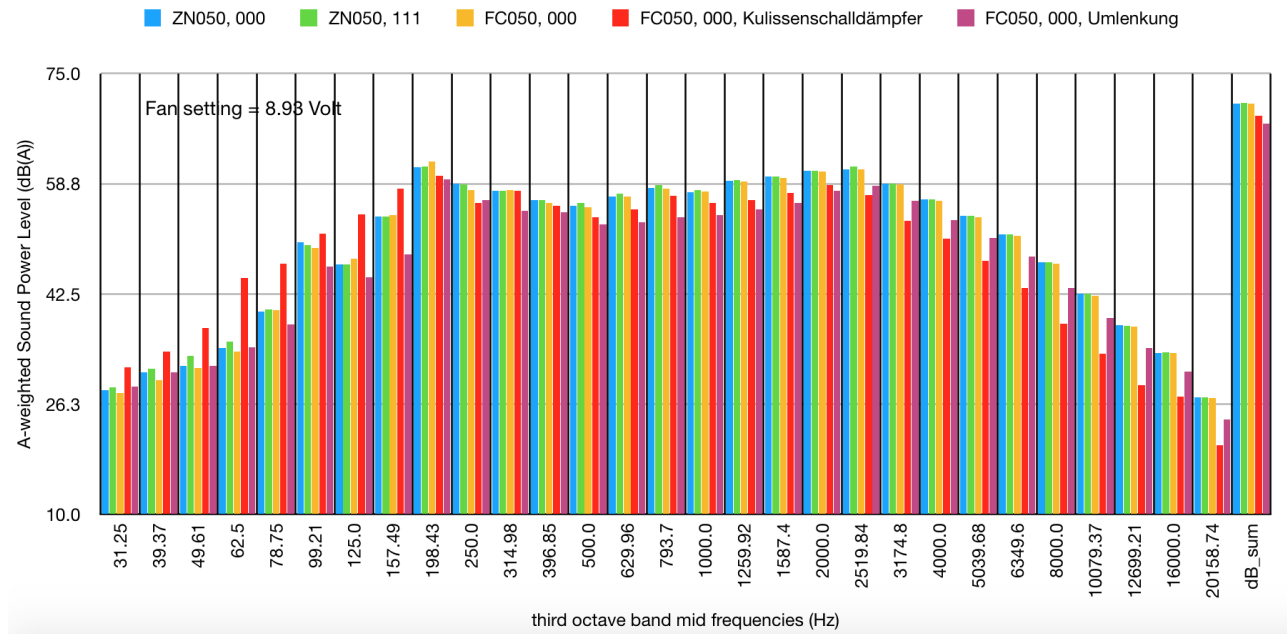


Abbildung 58: Spektraldarstellung des A-bewerteter Schalleistungspegels für eine Ventilator-Steuerspannung von 6.20 Volt für 2 unterschiedliche Ventilatoren und unterschiedliche Schalldämm-Maßnahmen

Die Richtungsabhängigkeit der Schallemissionen wird beispielhaft für eine Ventilatorsteuerspannung von 6.20 Volt bei abgeschalteter Klimakammertechnik für den Ventilator ZN050 ohne und mit Umlenkung gezeigt. Die Mikrofone 05, 13, 21, 29, 37 und 45 sind dabei rund um die Wärmepumpe angeordnet. Das Mikrofon 64 hängt oberhalb der Wärmepumpe.

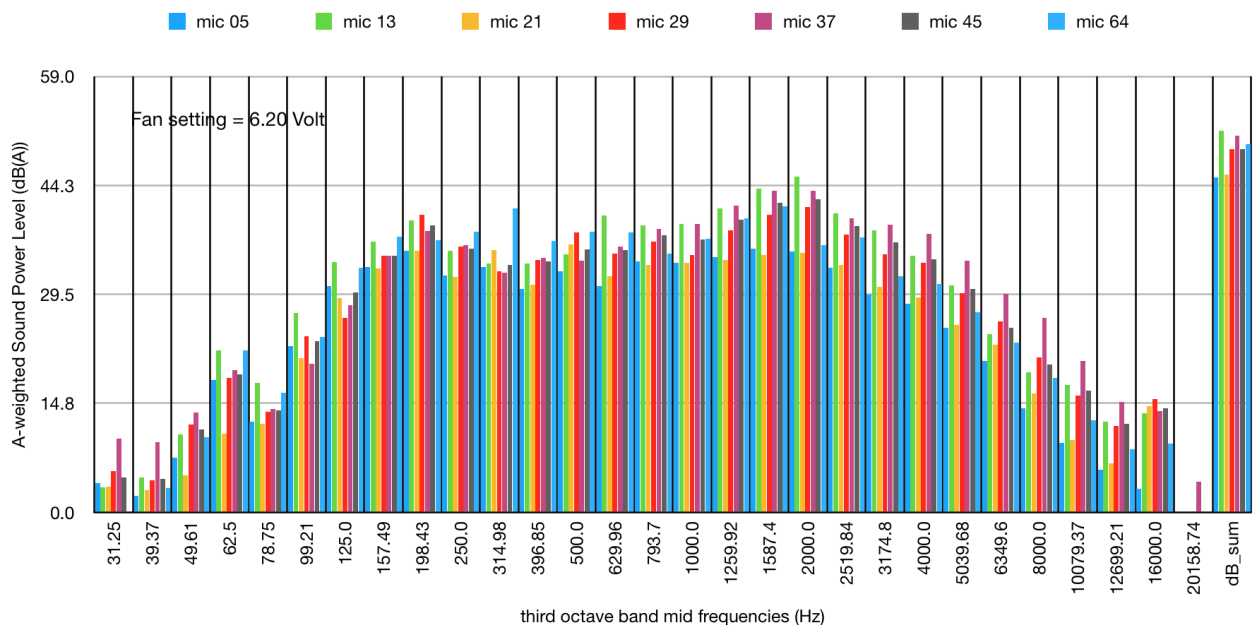


Abbildung 59: Spektraldarstellung des A-bewerteter Schalldruckpegels für eine Ventilator-Steuerspannung von 6.20 Volt für der Ventilator ZN050 ohne bauliche Maßnahme bei abgeschalteter Klimakammertechnik. Gezeigt sind die Spektren von unterschiedlichen Mikrofonen (siehe Abbildung 38).

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

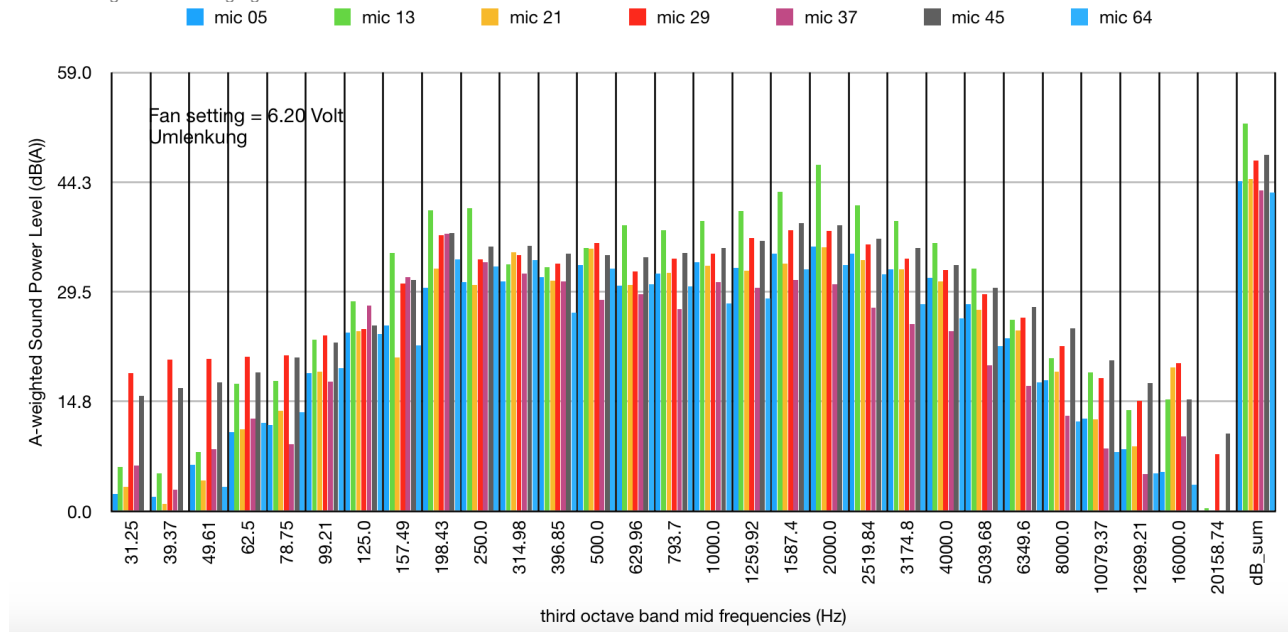
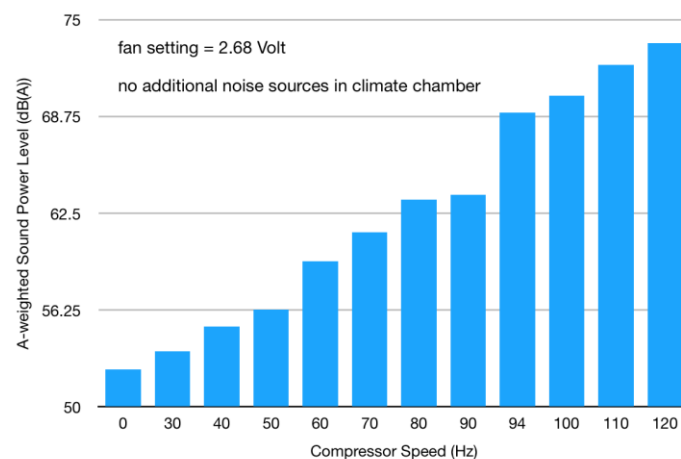


Abbildung 60: Spektraldarstellung des A-bewerteter Schalldruckpegels für eine Ventilator-Steuerspannung von 6.20 Volt für der Ventilator ZN050 mit Umlenkung bei abgeschalteter Klimakammertechnik. Gezeigt sind die Spektren von unterschiedlichen Mikrofonen (siehe Abbildung 63).

Es folgten Messungen in Abhängigkeit der Kompressordrehzahl. Gezeigt sind sowohl Schallleistungspegel als auch Schalldruckpegel an ausgewählten Mikrofonpositionen.

Tabelle 7 und Abbildung 61: A-bewerteter Schallleistungspegel als Funktion der Kompressordrehzahl

Ventilator FC050, Ventilatoreinstellung 2.68 Volt, Klimakammer: Wasserpumpe, Luftfeuchtigkeits- und Lufttemperatursteuerung ein	
compressor speed (Hz)	SPL dB(A), 100
0	52,4
30	53,6
40	55,2
50	56,3
60	59,4
70	61,3
80	63,4
90	63,7
94	69,0
100	70,1
110	72,1
120	73,5



Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

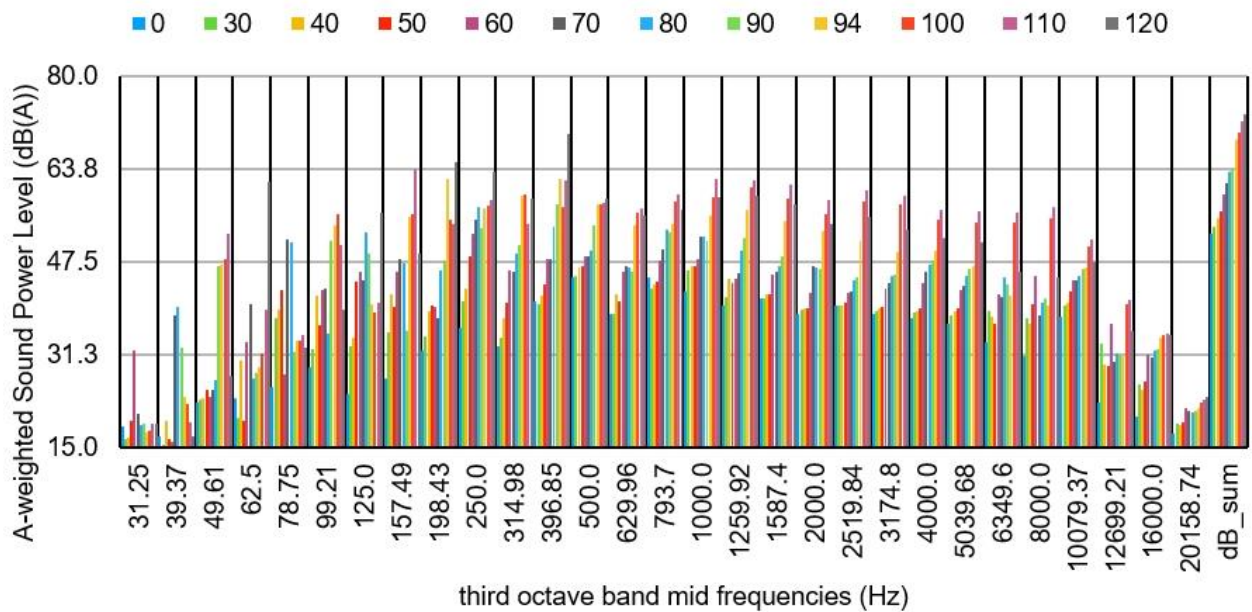


Abbildung 62: Spektraldarstellung des A-bewerteter Schallleistungspegels in Abhängigkeit der Kompressordrehzahl

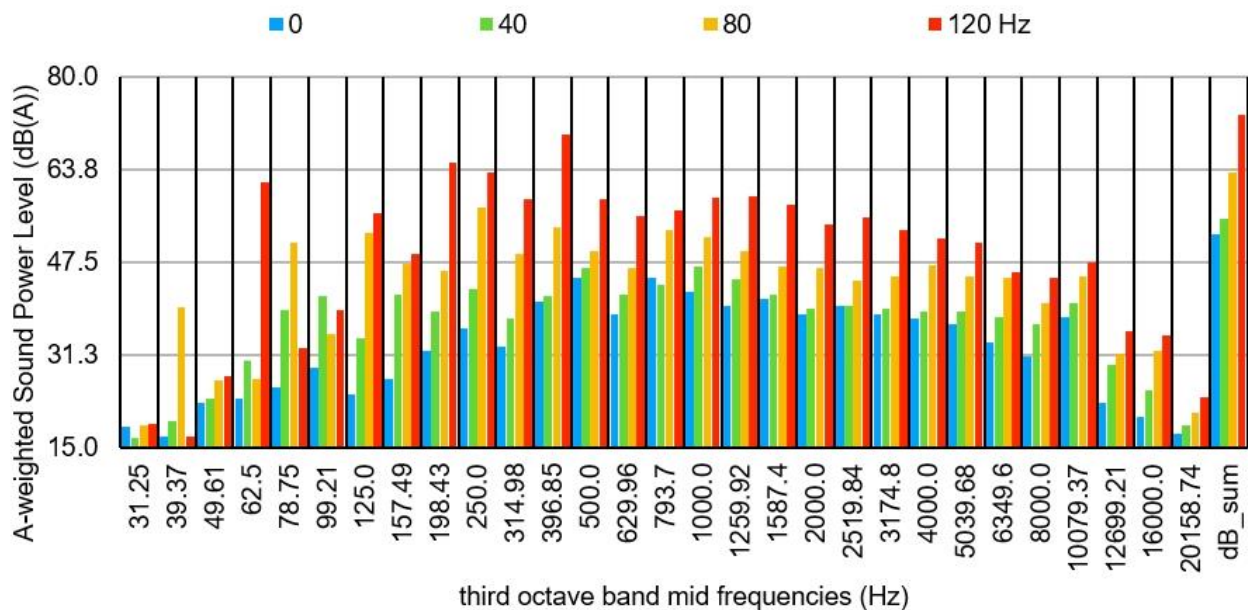


Abbildung 63: Detail-Spektraldarstellung des A-bewerteter Schallleistungspegels in Abhängigkeit der Kompressordrehzahl

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

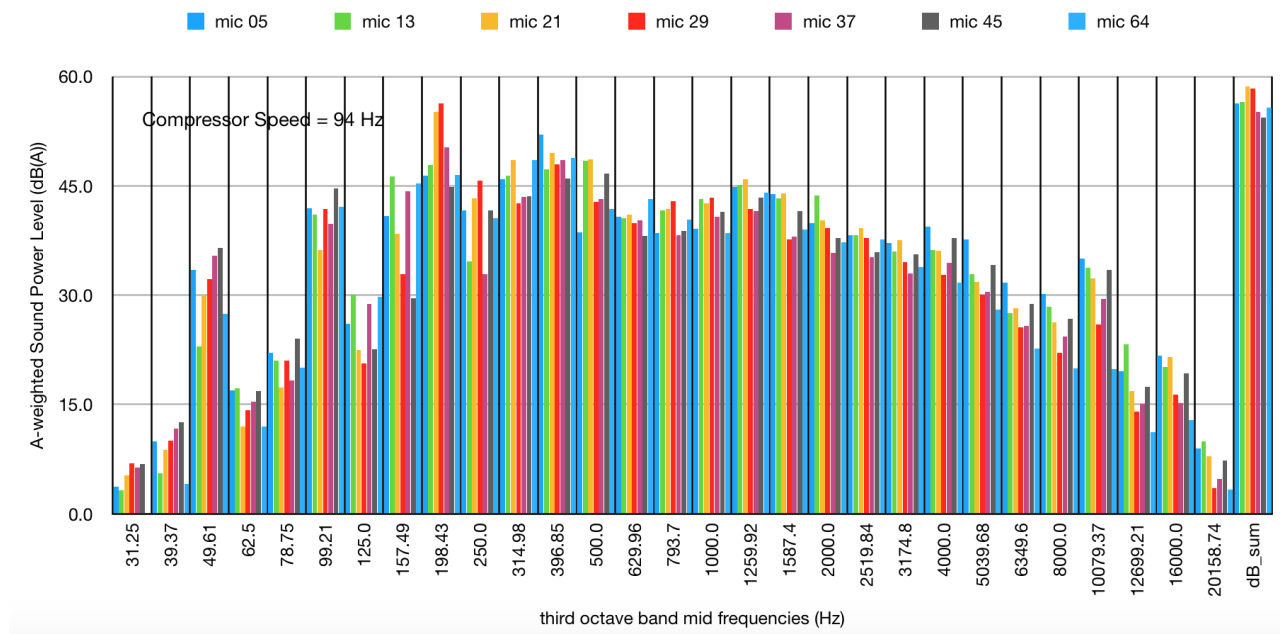


Abbildung 64: Spektraldarstellung des A-bewerteter Schalldruckpegels für eine Kompressor-Drehzahl von 94 Hz. Gezeigt sind die Spektren von unterschiedlichen Mikrofonen (siehe Abbildung 38).

Alle weiteren Messungen wurden mit der Wärmepumpe in Betrieb durchgeführt, dabei kamen unterschiedliche Wärmeübertrager zum Einsatz: ein konvektioneller vertikaler Rohr-Finnen-Wärmeübertrager, ein schräggestellter Aluminium Mikrochannel-Wärmeübertrager und der beschichtete konvektionelle vertikale Rohr-Finnen-Wärmeübertrager. Tabelle 8 fasst die Resultate zusammen. Exemplarisch sind Zeitverläufe im Anhang 7.1 zusammengestellt.

Tabelle 8: Zusammenfassung der Resultate

Messung	L _{w,min} dB(A)	L _{w,max} dB(A)	Fantyp	Konstruktive Maßnahme	Klima- kammer	Anmerkung
Nov. 17-16	65	68	ZN050	Diffusor	A2W35	P _{fan} ca. 50W
Nov. 17-17	66	69	FN050	-	A2W35	P _{fan} ca. 65W
Nov. 17-18	66	69	FC050	-	A2W35	P _{fan} ca. 85W
Nov. 17-19	66	66,5	FC050	Umlenk- Kulissenschall- dämpfer	A2W35	P _{fan} ca. 85W
Nov. 17-20	66	67	FC050	Umlenkung	A2W35	P _{fan} ca. 85W
Nov. 18-01	68	71	ZN050	-	A10W35	Testrun 12.11. / 15:13
Nov. 18-02	67,5	70	ZN050	-	A10W35	Testrun 12.11. / 15:42
Nov. 18-03	69,5	70,5	ZN050	-	A8W35	12.11. / 15:56
Nov. 18-04	62,5	63	ZN050	-	A10W35	Testrun 12.11. / 15:59
Nov. 18-05	67,8	70	ZN050	-	A2W35	13.11. / 11:27
Nov. 18-06	67,5	71	ZN050	-	A2W35	13.11. / 13:16

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

Nov. 18-07	68	71.5	ZN050	Diffusor	A2W35	13.11. / 15:08
Nov. 18-08	61 (48,5)	61,5 (50)	ZN050	Diffusor Comp = 94, fan = 594	A2W35	14.11. / 12:41
Nov. 18-09	65* (53)	68* (56)	ZN050	Diffusor Foam on Compressor Comp = 64, fan = 594	A2W35	14.11./ 14:41
Nov. 18-10	64* (52)	65* (53)	ZN050	Microchannel-HEX Diffusor Comp = 47, fan = 594	A2W35	14.11. / 16:54
Nov. 18-11	64* (52)	66.5* (54.5)	ZN050	Diffusor But Sponge removed Comp = 94, fan = 445.5	A2W35	15.11. / 07:24
Nov. 18-12	64* (52)	67* (55)	ZN050	Comp = 94, fan = 400	A2W35	15.11. / 08:33
Nov. 18-13	64,5*(52, 5)	65.5* (53,5)	ZN050	Comp = 70.5, fan = 594	A2W35	15.11. / 09:42
Nov. 18-14	66* (54)	70* (58)	ZN050	Diffusor	A2W35	16.11. / 14:36
Nov. 18-15	65* (53)	70* (58)	ZN050	Diffusor, Comp = 94	A2W35	19.11. / 13:02
Nov. 18-16	65* (53)	79* (57)	ZN050	Diffusor, Comp = 94	A12W35	20.11. / 09:21
Nov. 18-17	65.5* (53,5)	70* (56)	ZN050	Diffusor, Comp = 94	A10W35	21.11. / 15:07
Nov. 18-18	66 (53)	67 (55)	ZN050	Diffusor, Comp = 94, fan = 594 Wheels removed, spring added	A12W35	22.11. / 11:01
Nov. 18-19	66,5	69	ZN050	Diffusor, Comp = 94, fan = 594 Spring removed, dampers added	A12W35	22.11. / 14:26
Nov. 18-20	35,5		ZN050	Background (1,0,0) **	20°C	23.11. / 07:23
Nov. 18-21	35		ZN050	Background (0,0,0) **	20°C	23.11. / 07:25
Nov. 18-22	56,5		ZN050	Background (1,0,1) **	20°C	23.11. / 07:28
Nov. 18-23	57		ZN050	Background (1,1,1) **	20°C	23.11. / 07:35
Nov. 18-24	36	38	ZN050	Background (0,0,0) **	20°C	23.11. / 07:37
Mar. 19-01	67	72.5	ZN050	-	A2W35	
Mar. 19-02	67	71	ZN050	-	A2W35	
Mar. 19-03	67	70,5	ZN050	Diffusor (kein Grid auf Fan, Grid nur auf Diffusor)	A2W35	
Mar. 19-05	69	70	FC050	-	A2W35	unstable

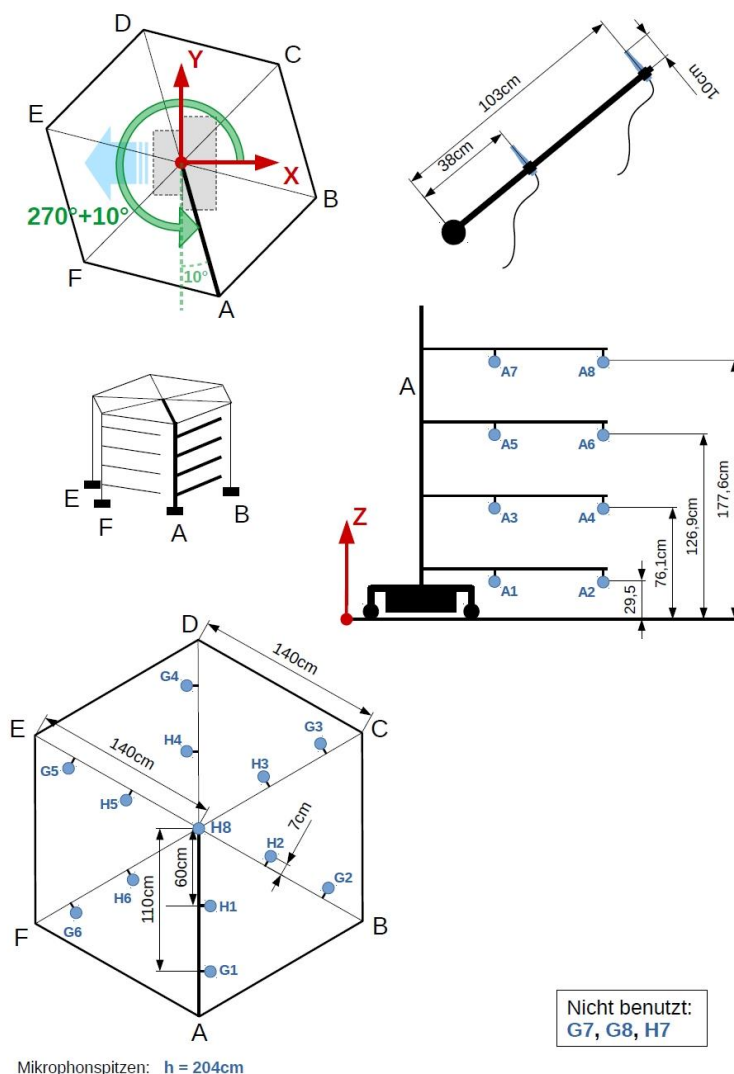
Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

Mar. 19-06	67,5	71.5	FC050	-	A2W35	
Mar. 19-07			FC050	Abdeckung oberhalb Kompressor		Kompressor Scan
Mar. 19-08			FC050	Abdeckung oberhalb Kompressor		Fan Scan
Mar. 19-09	64	67,5	FC050	Abdeckung oberhalb Kompressor	A7W35	
Mar. 19-10	64	67.5	FC050	Abdeckung oberhalb Kompressor	A4.5W35	
Mar. 19-11	65	69	FC050	Abdeckung oberhalb Kompressor	A0W35	

* SPL berechnet aus Mic 64 Position

** Einstellung (x,y,z): x = Wasserpumpe, y = Befeuchter, z = Luftstrom der Klimakammer



Mikrophonspitzen: h = 204cm

Abbildung 65: Darstellung des Aufbaus des akustischen Doms. Eingezeichnet sind die Mikrofonpositionen für die Darstellungen der Richtungsabhängigkeit.

Untersuchung der Auswirkungen bei Vereisung

In Abbildung 66 ist die Positionierung einer hochauflösenden Kamera vor dem Wärmeübertrager der SilentAirHP gezeigt. Das Frostverhalten ist beispielhaft in Abb. 67 und

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

das Abtauverhalten in Abbildung 68 gezeigt. Eine Bildanalyse ermöglicht die Extraktion eines „Highlight-Event“ Kurve, die gemeinsam mit dem transienten Gewichtssignal in Abb. 69 gezeigt ist. Dies ermöglicht eine Charakterisierung des Vereisungsverhaltens. Die asymmetrische Vereisung aufgrund der durch die Röhren aufgeprägten asymmetrischen Temperaturverteilung der Finnen ist abschließend in Abbildung 70 zu sehen. Der Effekt der Vereisung auf den Schallleistungspegel ist auch in der Tabelle 8 als Unterschied zwischen Minimum und Maximum angeführt. Er liegt ca. bei 2 - 4 dB(A).

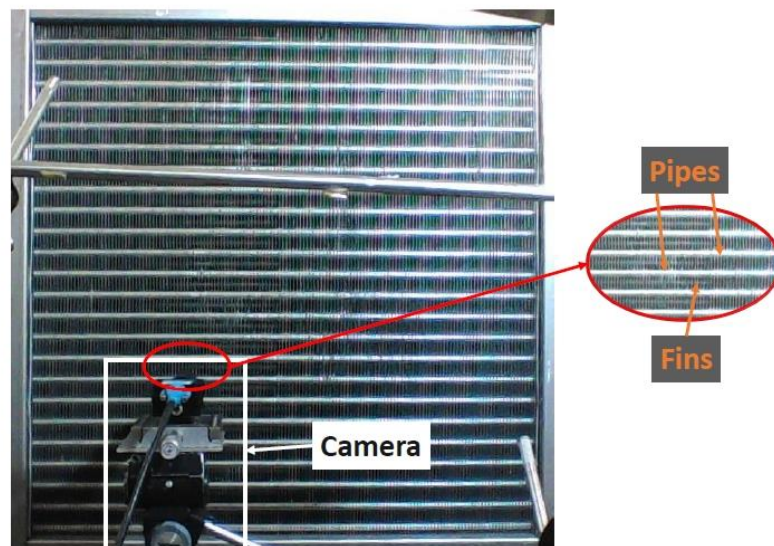


Abbildung 66: Oberfläche des SilentAirHP-Wärmetauschers und der Makrokamera zur Visualisierung der Frostansammlung an den Wärmetauscherlamellen.

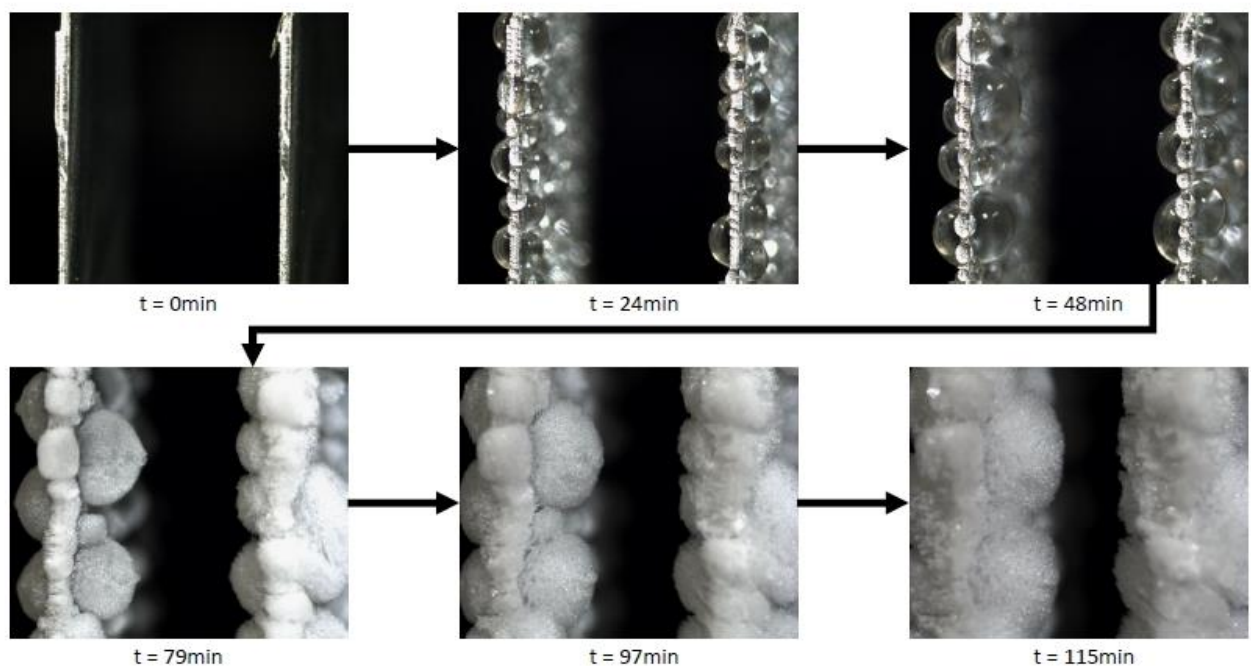


Abbildung 67: Frostansammlung an zwei Lamellen des SilentAirHP Wärmeübertragers

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

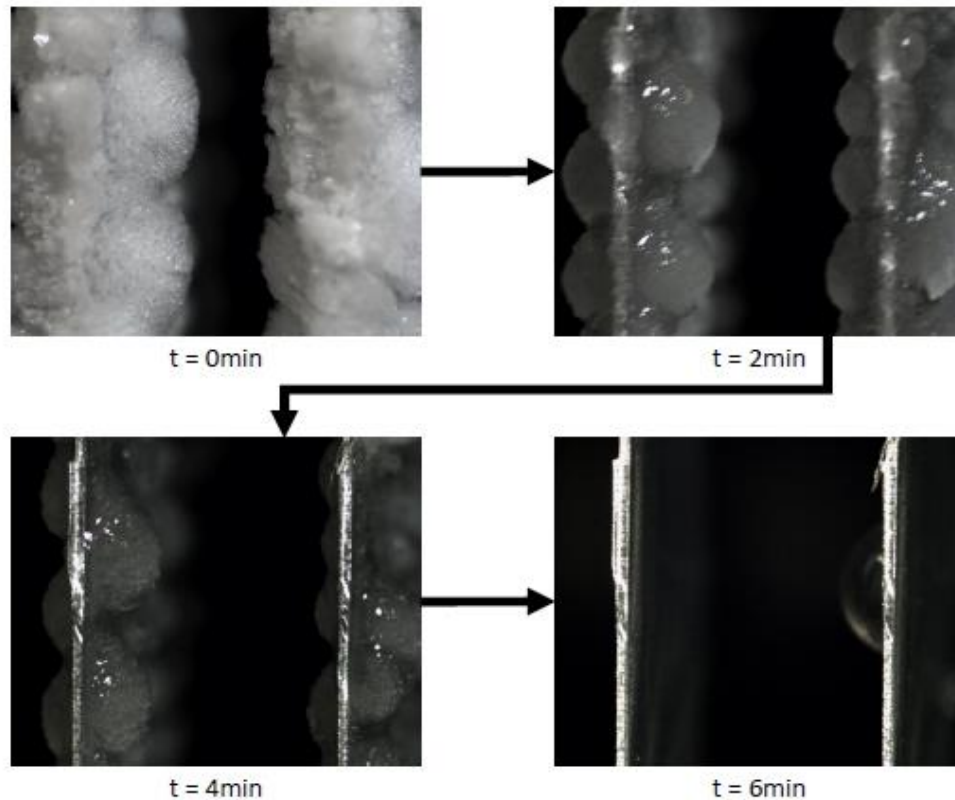


Abbildung 68: Abtauverhalten des SilentAirHP Wärmeübertragers

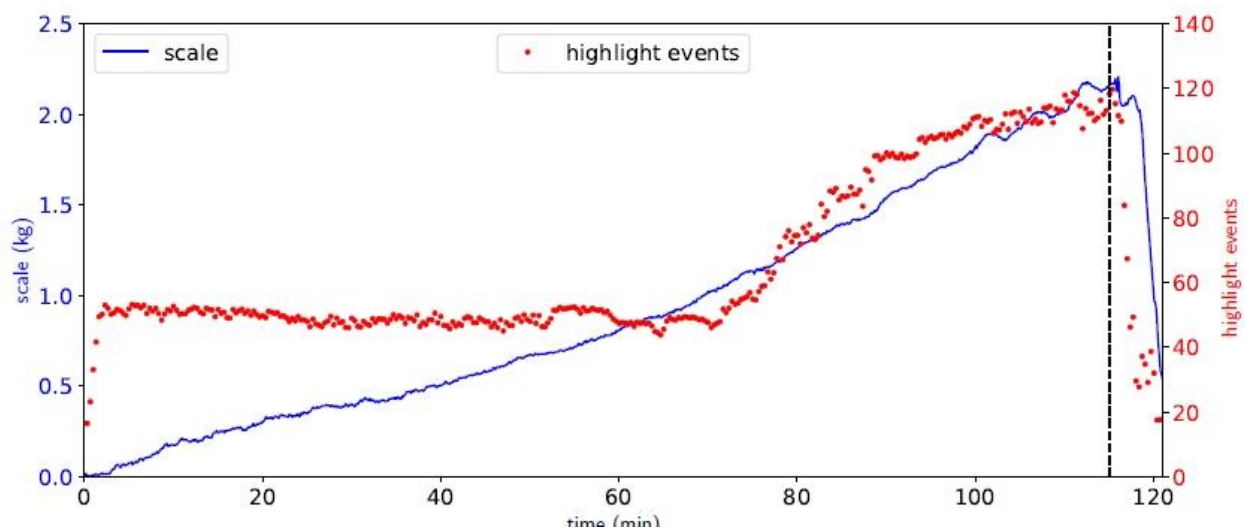


Abbildung 69: Gewichtsmessung und Anzahl der Highlight-Ereignisse auf Basis der Bildanalysen der SilentAirHP während des Frostbetriebs und des Abtaubetriebs. Die Zeit, in der das Auftauen stattfindet, ist eingeleitet wird, wird durch eine gestrichelte Linie gekennzeichnet.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

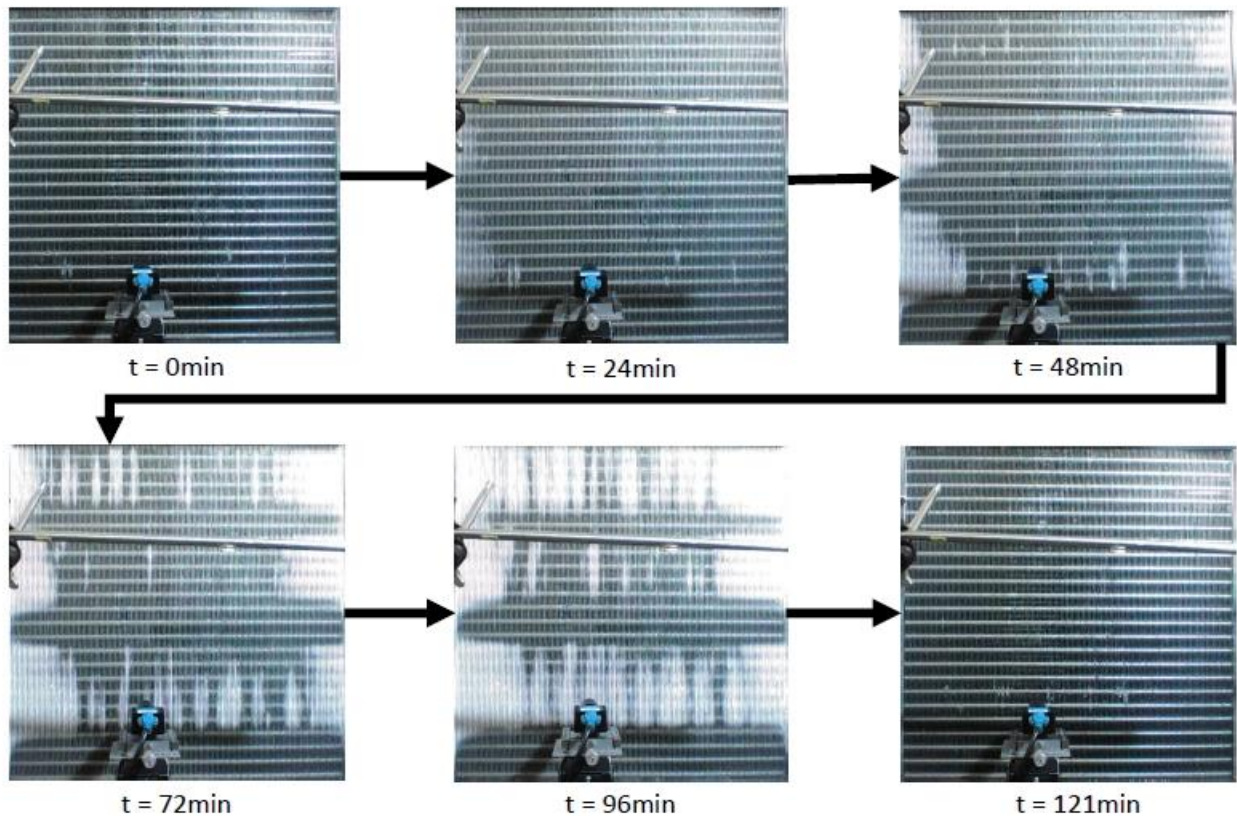


Abbildung 70: Ungleichmäßige Frostbildung auf der Wärmetauscheroberfläche des SilentAirHP.

Untersuchung von schallkritischen Stellen

Simultane Messung von Strömungsturbulenz, Wanddruckschwankungen und emittierter Schallleistung wurden durchgeführt. Wie weiter oben beschrieben, wurde diese Methode einer innenaufgestellten Wärmepumpe und zwei unterschiedlichen Wärmepumpen in der Klimakammer erfolgreich getestet (siehe auch Abb. 68 - 70). Vibrationsmessungen wurden auch an der SilentAirHP durchgeführt.

Psychoakustik

Ziel der Untersuchung war es, Geräusche von Wärmepumpen in verschiedenen Richtungen und unter Anwendung verschiedener, potentiell lärmindernder, Maßnahmen psychoakustisch zu evaluieren.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

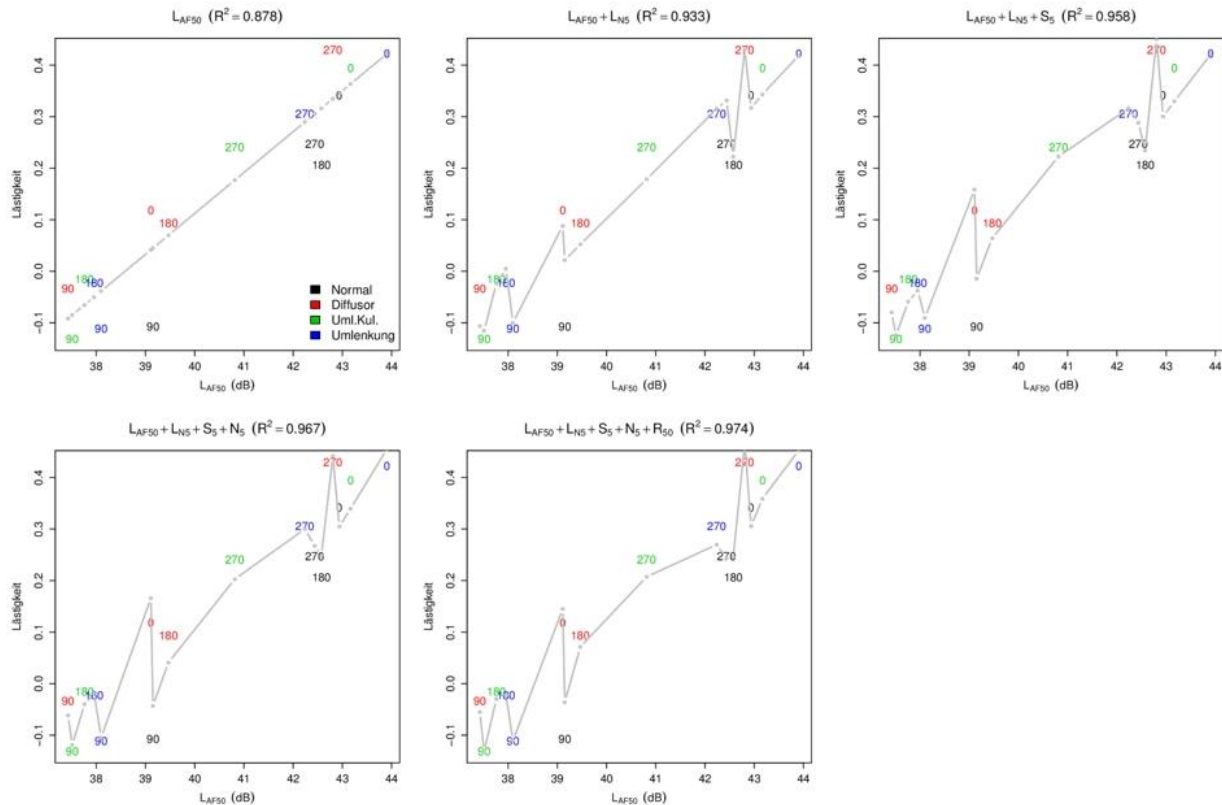


Abbildung 71: Lästigkeit als Funktion des L_{AF50} und die stufenweise Modellselektion inklusive Modellfit (graue Linie)

Aus diesen Messungen ging der Zusammenhang zwischen Lästigkeitsurteilen für die Wärmepumpen und dem L_{AF50} ⁶ klar hervor.

Die Linie zeigt die Vorhersage auf Basis der Vorhersage des im Titel angezeigten linearen Modells. Weiters ist auch der Anteil der erklärten Varianz angegeben (R^2). Hier sieht man, dass der L_{AF50} die Urteile tendenziell erklärt und wie die sukzessiv hinzugefügten Parameter die bestehenden Abweichungen immer besser erfassen, wobei der Zuwachs der erklärten Varianz durch die beiden letzten Parameter weniger als 2% beträgt (95,8% auf 97,4%).

Aus den Untersuchungen haben sich folgende **Hauptpunkte** ergeben:

- Der Effekt der verschiedenen Maßnahmen auf die verschiedenen akustischen und psychoakustischen Maße ist sehr stark richtungsabhängig. Unterschiede sind besonders bei den Pegeln, der Lautheit und der Schärfe zu beobachten
- Diese Abhängigkeit zwischen Maßnahme und Richtung setzt sich auch bei der Wahrnehmung fort was sich durch eine signifikante statistische Interaktion zwischen Position und Zustand zeigt.
- Es ergab sich auch ein signifikanter Gesamteffekt der Messposition für die Lästigkeitsurteile. Aufgrund der signifikanten Interaktion mit dem Faktor Maßnahme müssen diese Effekte allerdings mit Vorsicht interpretiert werden.
- Die Unterschiede in den Lästigkeitsurteilen lassen sich sehr gut durch A-Pegel und

⁶ Schalldruckpegel der zu 50% der Zeit überschritten wird in dB(A)

Lautstärkepegel erklären. Die zusätzliche Verwendung der psychoakustischen Schärfe und auch Rauigkeit tragen zur besseren Erklärung bei.

Abschließend ist wichtig zu erwähnen, dass es sich bei den für die psychoakustischen Analysen verwendeten akustischen Daten um Emissionsmessungen handelte. Vor allem die Richtungsabhängigkeit kann sich durch Entfernung und auch durch Art der Aufstellung der Wärmepumpe verändern. Um die Richtungsabhängigkeit auch in größeren Entfernungen genauer zu untersuchen, wären Messungen in entsprechenden Situationen und weitere Wahrnehmungstests notwendig.

4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Das Projekt SilentAirHP konnte einen quantitativen Überblick über eine Vielzahl Schallreduktionsmaßnahmen geben. Im Rahmen des Projektes wurden eine Reihe von Services für Wärmepumpenhersteller etabliert:

- Zeitkorrelierte Vibration-Akustik-Strömungsgeschwindigkeitsmessungen zur Detektion von Schall- und Vibrationsquellen
- Schallquellenlokalisation mit Mikrofonringen und Wärmebildkameras
- Transiente, richtungs-, frequenz- und ortsabhängige Messung des Schalldruckpegels und daraus berechneter transienter Schallleistungspegel von Wärmepumpen unter definierten klimatischen Bedingungen (in der Klimakammer).
Kopplung von energetischen und akustischen Modellen im Rahmen von 1D Simulationstools (SSELib)
- Transiente Charakterisierung von Wärmepumpen mit Wärmebildkamera, Detailkameras (Frostdetektion mit Kanten- und Highlight-Event-Detektierung), Gewichtsbestimmung und akustischem Dom.
- 3D Simulationsrechnungen zur Bestimmung der Vereisung von Wärmepumpenverdampfern

Die Resultate des SilentAirHP sind wesentlicher Beitrag zum Projekt „Akustik Signatures of Heat Pumps“ der internationalen Energieagentur (Annex 51) [20], das von österreichischer Seite koordiniert wird. Weiters wurde in den letzten Jahren eine App für iOS entwickelt, die eine Visualisierung der Schallemissionen von Wärmepumpe mittels Augmented Reality ermöglicht. Die Daten hierzu werden von einer transienten 5-Kanal Messmethode geliefert, die aus dem Analysetool des akustischen Doms abgeleitet wurde.

5 Ausblick und Empfehlungen

Jede Anlage muss weitestgehend einzeln betrachtet werden, da es sich bei den Schallemissionen einer Wärmepumpe um das Resultat eines komplexen Zusammenspiels unterschiedlicher Schallentstehungsmechanismen (vibrierende Oberflächen,

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

schallabstrahlende Strömungen, Motorengeräusche) und Schallausbreitungsmechanismen handelt. So war im Fall der SilentAirHP der Kompressor die dominante Schallquelle und Adaptionen am Ventilator werden erst bei geringer Kompressordrehzahl effektiv. Viele Geräte positionieren aber den Kompressor nicht in der Außeneinheit, sodass Änderungen am Ventilator wesentlich sind. Grundsätzlich sind natürlich Adaptionen immer an der lautesten Komponente vorrangig vorzunehmen. Aufstellungsort und die Berücksichtigung der Richtungsabhängigkeit der akustischen Emissionen stellen wesentliche Aspekte dar. In den letzten drei Jahren wurde auch seitens der österreichischen Hersteller viel im Bereich Akustik gearbeitet, sodass nun auch Schalllabors vor Ort zur Verfügung stehen. Lastverschiebung und die Implementierung von „SilentModes“ sind nun gängige Verfahren bei modernen Wärmepumpen.

Am AIT wird nun eine aus der Methodik des akustischen Doms abgeleitete vereinfachte Form der transienten 5-Kanal Akustikmessung bei den üblichen Zertifizierungsmessungen durchgeführt, die in Folge die Datenbasis für die Visualisierungs mobile App (derzeit iOS) beliefert. Weiterführende Arbeiten werden im FFG Projekt „RAARA“ (Residential Area Augmented Reality Acoustics, FFG-Nr. 873588) ab Oktober 2019 durchgeführt. Damit stehen transiente Schallleistungspegel in die Hauptrichtungen der Wärmepumpe zur Verfügung, die eine vereinfacht richtungsabhängige akustische Visualisierung ermöglichen.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Ch. Reichl, J. Emhofer, Ch. Köfinger, T. Fleckl: "SilentAirHP - Advanced Methods for Analysis and Development of Noise Reduction Measures for Air-to-Water Heat Pump Systems", 66. Jahrestagung der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft, Universität Wien, 27.09.2016
- [2] N. Schmiedbauer, J. Emhofer, Ch. Köfinger, P. Wimberger, T. Fleckl, M. Gröschl, Ch. Reichl: "Active Noise Cancelling for Heat Pump Applications", 66. Jahrestagung der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft, Universität Wien, 27.09.2016
- [3] P. Wimberger, J. Emhofer, Ch. Köfinger, T. Fleckl, M. Gröschl, Ch. Reichl: "Space-, time- and frequency resolved recording and analysis of sound emissions and sound source localisation using a multichannel measuring system", 66. Jahrestagung der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft, Universität Wien, 27.09.2016
- [4] P. Wimberger: "Sound source localisation and space-, time- and frequency resolved analysis of sound emissions using a multichannel measuring system"; Bachelorarbeit; Betreuung: M. Gröschl, Ch. Reichl, J. Emhofer; TU Wien, Institut für Angewandte Physik, 2016.
- [5] N. Schmiedbauer: "Active Noise Cancelling im Anwendungsfeld der Luft-Wasser-Wärmepumpen" (Arbeitstitel). Diplomarbeit (in Fertigstellung), Betreuung: Prof. Martin Gröschl, TU Wien, Christoph Reichl, AIT
- [6] Dymola: <https://www.3ds.com/de/>
- [7] Modelica: <https://www.modelica.org>
- [8] TIL-Library: <https://www.tlk-thermo.com/>
- [9] ThermoCycle-Library: <http://thermocycle.net/>
- [10] J. Emhofer, R. Zitzenbacher, Ch. Reichl: "[Sound Source Extension Library for Modelica](#)"; Vortrag: 12th International Modelica Conference, Prag, Tschechische Republik; 15.05.2017 - 17.05.2017; in: "Proceedings of the 12th International Modelica Conference", Modelica Association, (2017), ISBN: 978-91-7685-575-1; 8 S.
- [11] D. Meisl: „Implementierung einer softwarebasierten Regelung einer Luft-Wasser-Wärmepumpe“, Diplomarbeit; Betreuung: G. Grabmair (FH Oberösterreich), J. Emhofer (AIT), 2017; Abschlussprüfung 20.09.2017
- [12] Ch. Reichl: "Heat and Mass Transfer in Renewable Energy Systems"; Habilitationsschrift, Technische Universität Wien, Faculty of Mechanical and Industrial Engineering, Institute of Fluid Mechanics and Heat Transfer, 2018.
- [13] M. Popovac, J. Emhofer, E. Wasinger, P. Wimberger, R. Zitzenbacher, D. Meisl, F. Linhardt, N. Schmiedbauer, Ch. Reichl: "OpenFOAM implementation of algebraic frosting model and its applications on heat pump evaporators"; Vortrag: 13th IIR Gustav Lorentzen Conference 2018, Valencia, Spain; 18.06.2018 - 20.06.2018; in: "13th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants (GL2018). Proceedings", IIF/IIR, (2018), Paper-Nr. 1203, 9 S.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

- [14] N. Schmiedbauer: „Active Noise Cancelling im Anwendungsfeld der Luft-Wasser-Wärmepumpen“ (Arbeitstitel). Diplomarbeit (in Fertigstellung); Betreuung: M. Gröschl, TU Wien, Ch. Reichl, AIT
- [15] N. Schmiedbauer, J. Emhofer, C. Köfinger, P. Wimberger, T. Fleckl, M. Gröschl, C. Reichl: "Aktive Störschallunterdrückung für Wärmepumpenanwendungen"; Vortrag: 43. Jahrestagung für Akustik, Kiel; 06.03.2017 - 09.03.2017; in: "Fortschritte der Akustik - DAGA 2017", Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA), (2017).
- [16] F. Linhardt: "Simultaneous measurements of sound, vibration, and flow, as well as determination of acoustic transfer functions in the context of air water heat pumps"; Diplomarbeit; Betreuung: M. Gröschl, Ch. Reichl; Technische Universität Wien, Institut für Angewandte Physik, 2018; Abschlussprüfung: 19.03.2018.
- [17] F. Linhardt, K. Alten, J. Emhofer, C. Köfinger, T. Fleckl, P. Wimberger, M. Gröschl, Ch. Reichl: "Charakterisierung der Schallabstrahlung von Luft-Wasser-Wärmepumpen mittels simultaner Hitzdrahtanemometrie, Vibrationsmessung und Schalldruckbestimmung"; Vortrag: 43. Jahrestagung für Akustik, Kiel; 06.03.2017 - 09.03.2017; in: "Fortschritte der Akustik - DAGA 2017", Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA), (2017), S. 1238 - 1241.
- [18] R. Zitzenbacher: "Schallreduktionsmaßnahmen für Luft/Wasser-Wärmepumpen"; Diplomarbeit, Betreuung: M. Steinbatz, J. Emhofer; FH Oberösterreich, 2017; Abschlussprüfung: 20.09.2017.
- [19] <http://www.waermepumpe-austria.at/verein-waermepumpe-austria/leitfaden-zur-akustik-von-waermepumpen.html>
- [20] <https://heatpumpingtechnologies.org/annex51/>

Weiterführende Literatur (SilentAirHP)

- Ch. Reichl, J. Emhofer, M. Popovac, G. Drexler-Schmid, P. Wimberger, F. Linhardt, K. Alten, T. Fleckl, Akustische Emissionen von Wärmepumpen, Chillventa, 15.10.2018, Nürnberg, Germany, eingeladener Vortrag
- Ch. Reichl, J. Emhofer, M. Popovac, G. Drexler-Schmid, P. Wimberger, F. Linhardt, K. Alten, T. Fleckl, International research: acoustic signatures of heat pumps, 11de Warmtepomp Symposium, 10.10.2018, Communicatiehuis, Gent, Belgien, eingeladener Vortrag
- P. Wimberger, J. Emhofer, Ch. Reichl, MicLocator - Determine multiple microphones' positions using sound wave delay and trilateration, 68th Annual Meeting of the Austrian Physical Society, 11.09.2018, TU Graz, Austria
- Ch. Reichl, J. Emhofer, M. Popovac, P. Wimberger, F. Linhardt, K. Alten, T. Fleckl: "IEA HPT Annex 51: Acoustic Signatures of Heat Pumps Update - Acoustic Transmission Measurements and Sound Source Detection", 26th ERCOFTAC Alpe Danube Adria Pilot-Center Meeting, TU Graz, Austria, 24.10.2017
- Ch. Reichl, J. Emhofer, T. Fleckl: „HPT TCP Annex 51: Reduktion der Schallabstrahlung von Luft-Wasser-Wärmepumpen“, European Heat Pump Summit, 22.-23.10.2017, Nürnberg, Deutschland.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

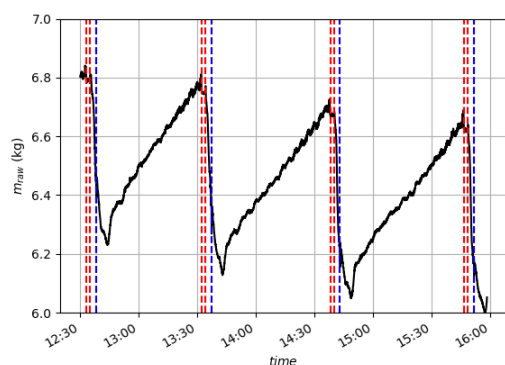
- Ch. Reichl, M. Popovac, E. Wasinger, D. Meisl, R. Zitzenbacher, F. Linhardt, P. Wimberger, N. Schmiedbauer, J. Emhofer, M. Gröschl: "*Experimental and numerical methods for the fluid dynamic and acoustic characterization of heat exchanger icing*"; Vortrag: 67. Jahrestagung der Österreichischen Physikalischen Gesellschaft (gemeinsam mit der Schweizerischen Physikalischen Gesellschaft), CERN und CICG, Genf, Switzerland; 21.-25.08.2017.
- Ch. Reichl, J. Emhofer, F. Lörcher, A. Strehlow, M. Popovac, P. Wimberger, C. Köfinger, A. Zottl, T. Fleckl: "*Transient Acoustic Signatures of the GreenHP with special focus on icing and defrosting*"; Vortrag: 12th IEA Heat Pump Conference, Rotterdam, NL; 15.-18.05.2017; in: "*Proceedings of 12th IEA Heat Pump Conference*", (2017), ISBN: 978-90-9030412-0.
- Ch. Reichl, M. Popovac, E. Wasinger, D. Meisl, R. Zitzenbacher, F. Linhardt, J. Emhofer: "*Icing of heat exchangers investigated by measurements and simulations on micro- and macroscale*"; Vortrag: 25th Ercoftac ADA Pilot Center Meeting und ERCOFTAC Spring Festival, Wien; 06.-07.04.2017.
- Ch. Reichl, J. Emhofer, P. Wimberger, N. Schmiedbauer, F. Linhardt, E. Wasinger, C. Köfinger, T. Fleckl: "SilentAirHP - Analyse und Entwicklung von Schallreduktionsverfahren für Luft-Wasser-Wärmepumpen"; Vortrag: 43. Jahrestagung für Akustik, Kiel; 06.-09.03.2017; in: "Fortschritte der Akustik - DAGA 2017", Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (DEGA), (2017), S. 1246 - 1249.

7 Anhang

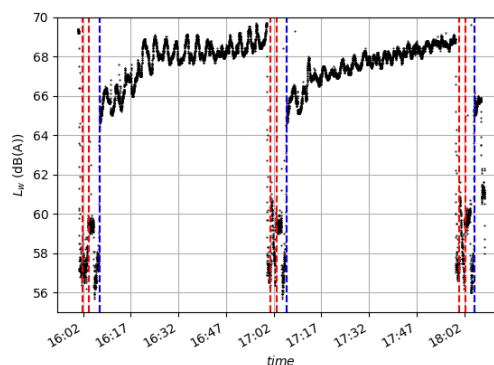
7.1 Exemplarische transiente Darstellung der Messungen

Unbeschichteter vertikaler Röhren-Lamellen-Wärmeübertrager

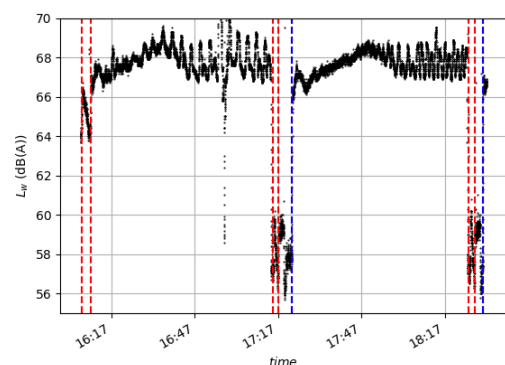
Messungen November 2017



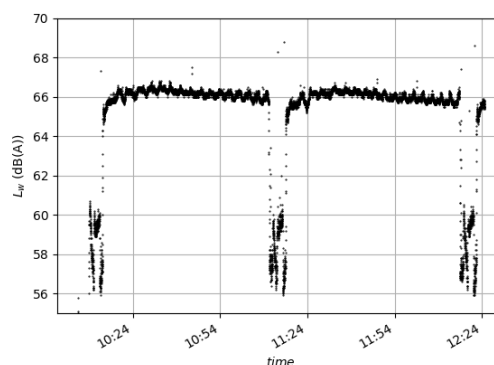
Nov17-16



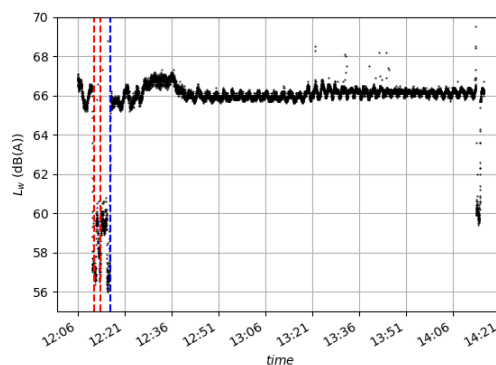
Nov17-17



Nov17-18



Nov17-19

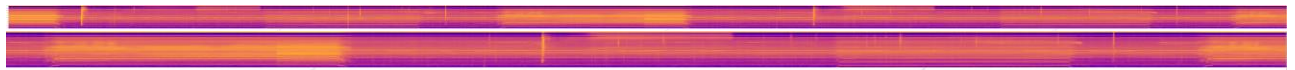


Nov17-20

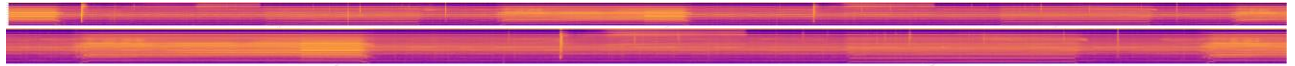
Abbildung 7.1-1: Zeitverlauf der A-gewichteten Schalleistungspegels für ausgewählte Messungen

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

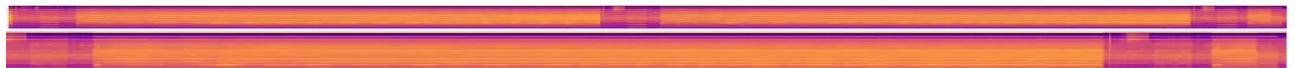
Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische
Forschungsförderungsgesellschaft FFG



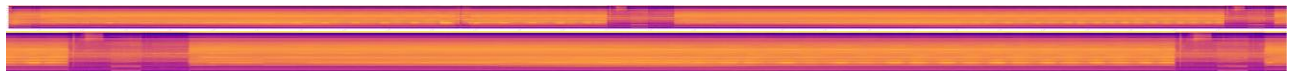
Nov17-15



Nov17-16



Nov17-17



Nov17-18



Nov17-19



Nov17-20

Abbildung 7.1-2: Zeitverlauf des Frequenzinhaltes des A-gewichteten Schalleistungspegels für ausgewählte Messungen (Wasserfalldiagramme) – jeweils Gesamt- und Detailzeitraum

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

Unbeschichteter schräggestellter Mikrokanal-Wärmeübertrager

Messungen November 2018

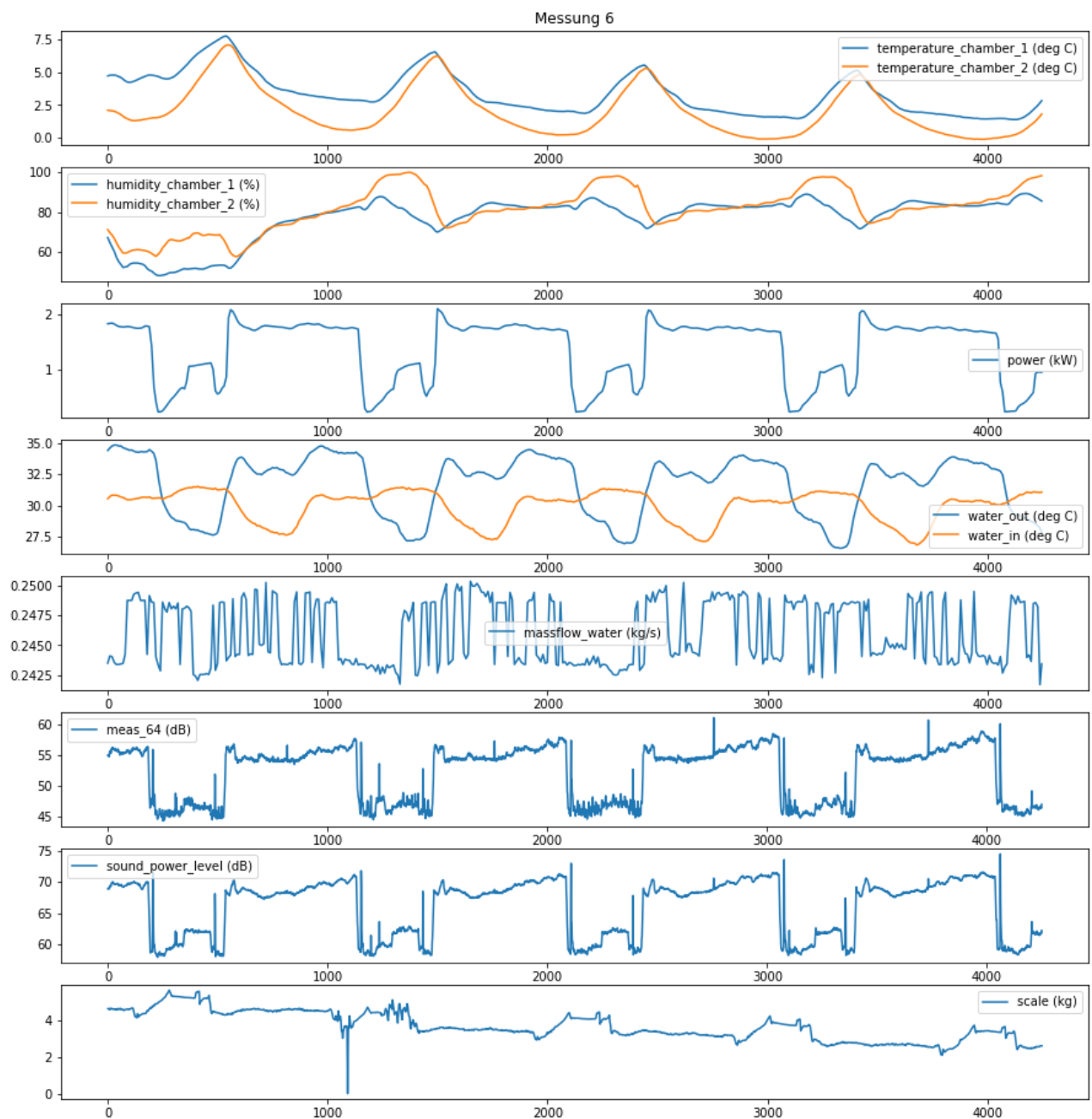


Abbildung 7.1-3: Zeitverlauf wesentlicher Klimakammerdaten, des Gewichts und des A-gewichteten Schalleistungspegels für Messung Nov18-06

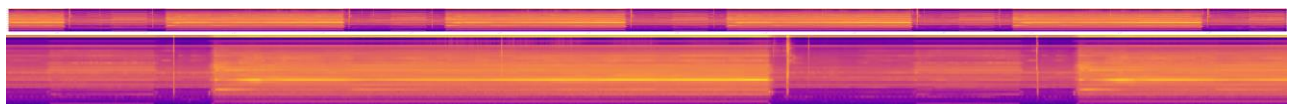


Abbildung 7.1-4: Zeitverlauf des Frequenzinhalts des A-gewichteten Schalleistungspegels (Wasserfalldiagramme) – jeweils Gesamt- und Detailzeitraum

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

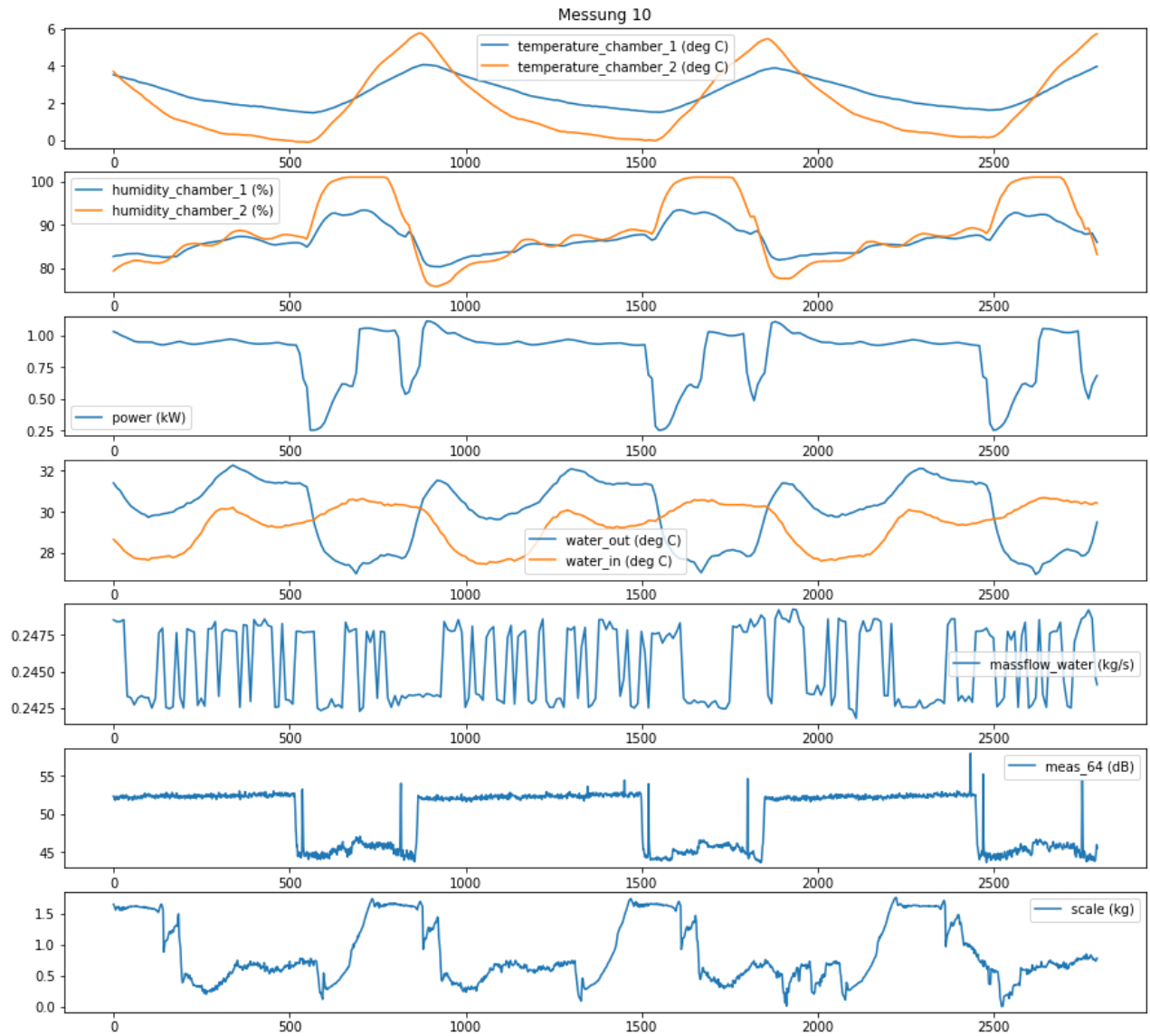


Abbildung 7.1-5: Zeitverlauf wesentlicher Klimakammerdaten, des Gewichts und des A-gewichteten Schalleistungspegels für Messung Nov18-10

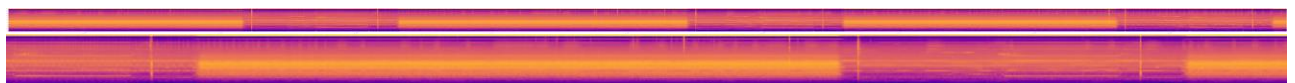


Abbildung 7.1-6: Zeitverlauf des Frequenzinhalts des A-gewichteten Schalleistungspegels (Wasserfalldiagramme) – jeweils Gesamt- und Detailzeitraum

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

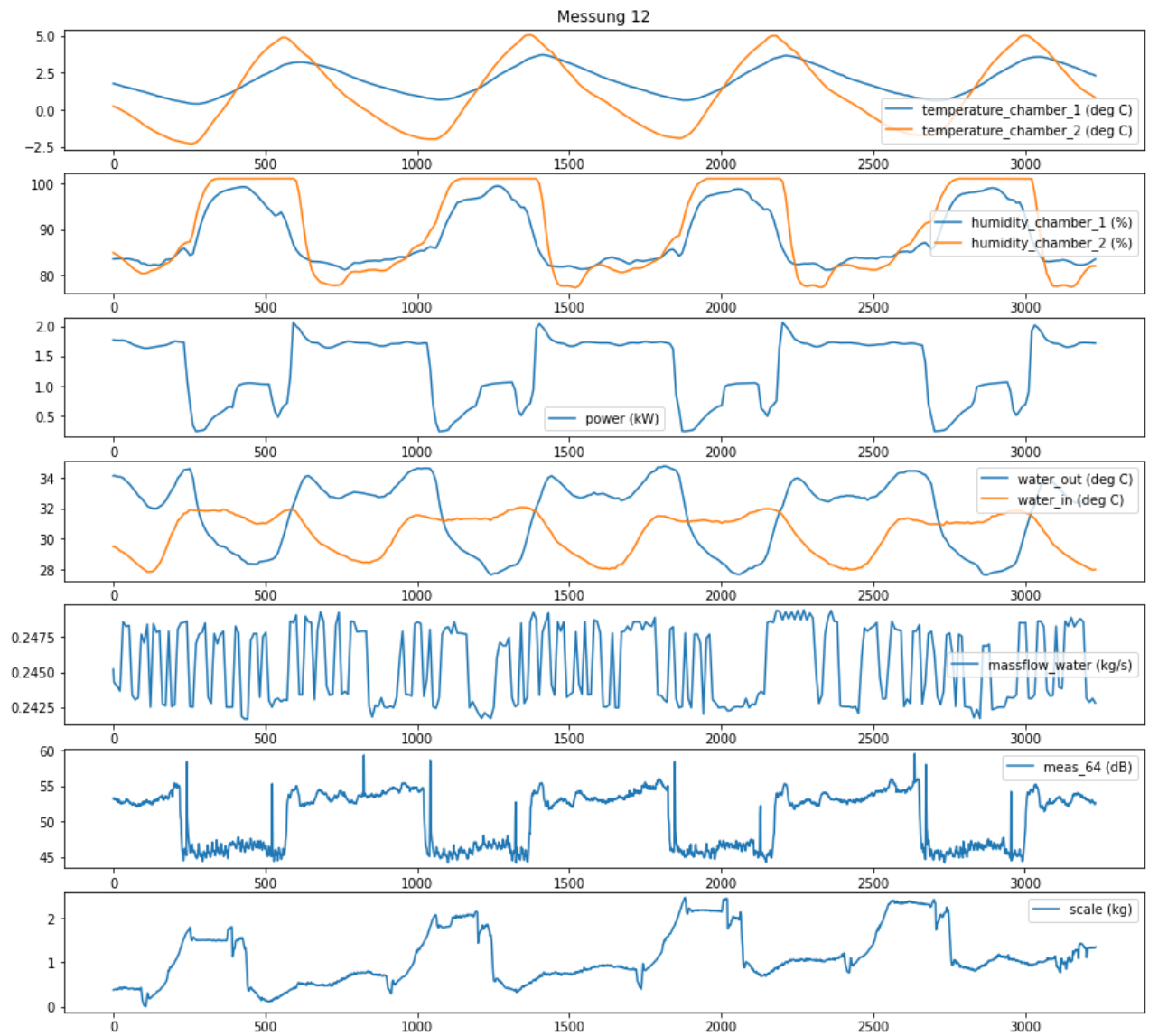


Abbildung 7.1-7: Zeitverlauf wesentlicher Klimakammerdaten, des Gewichts und des A-gewichteten Schalleistungspegels für Messung Nov18-12

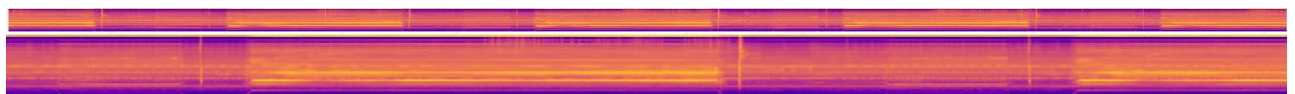


Abbildung 7.1-8: Zeitverlauf des Frequenzinhalts des A-gewichteten Schalleistungspegels (Wasserfalldiagramme) – jeweils Gesamt- und Detailzeitraum

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

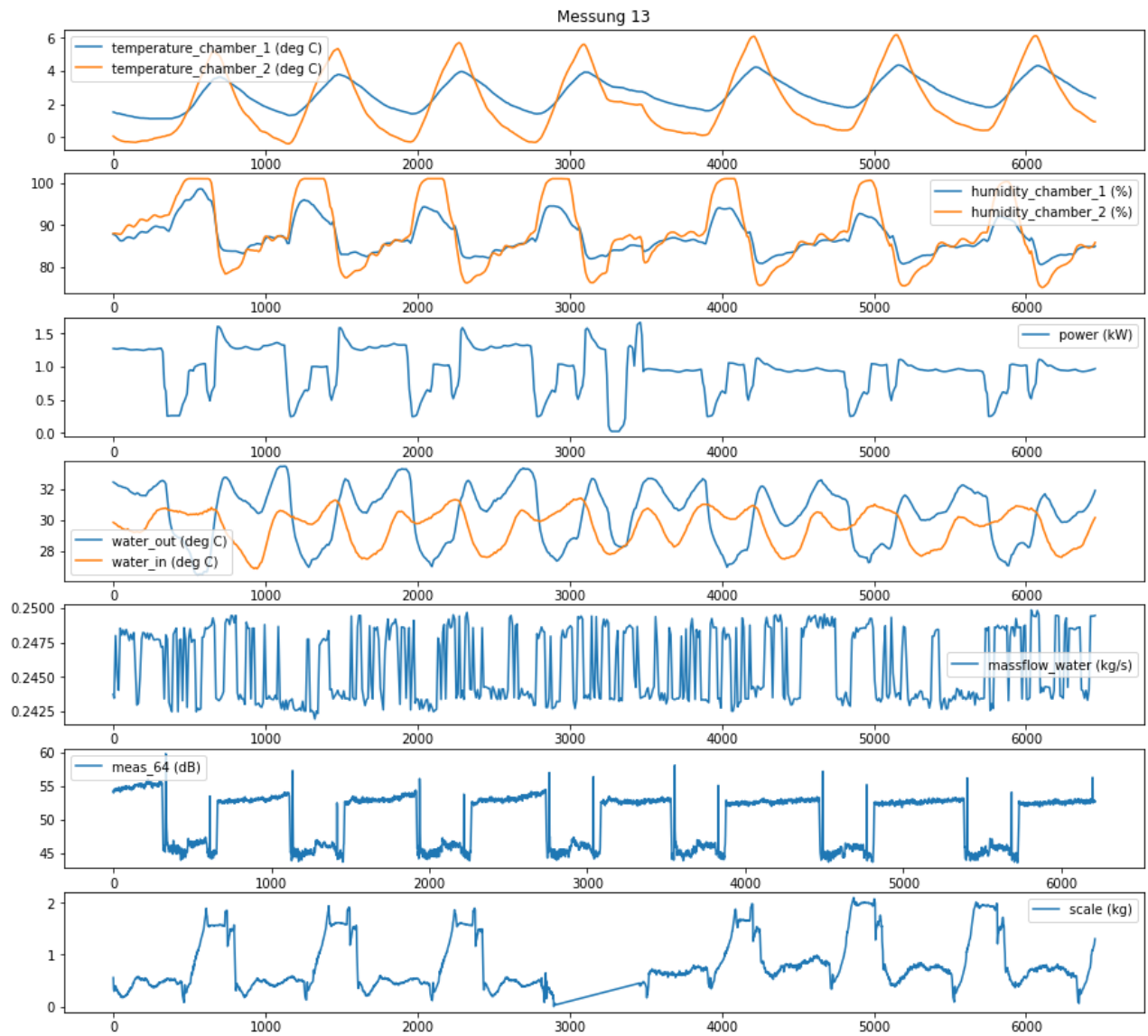


Abbildung 7.1-9: Zeitverlauf wesentlicher Klimakammerdaten, des Gewichts und des A-gewichteten Schalleistungspegels für Messung Nov18-13

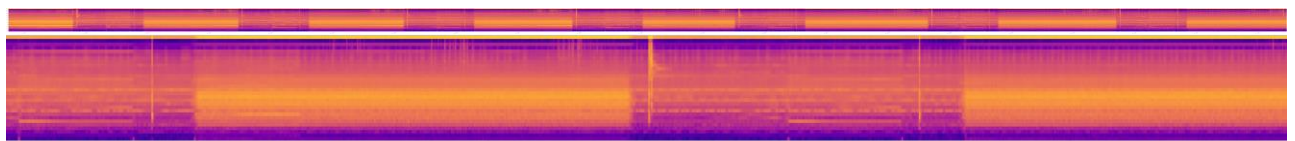


Abbildung 7.1-10: Zeitverlauf des Frequenzinhalts des A-gewichteten Schalleistungspegels (Wasserfalldiagramme) – jeweils Gesamt- und Detailzeitraum

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

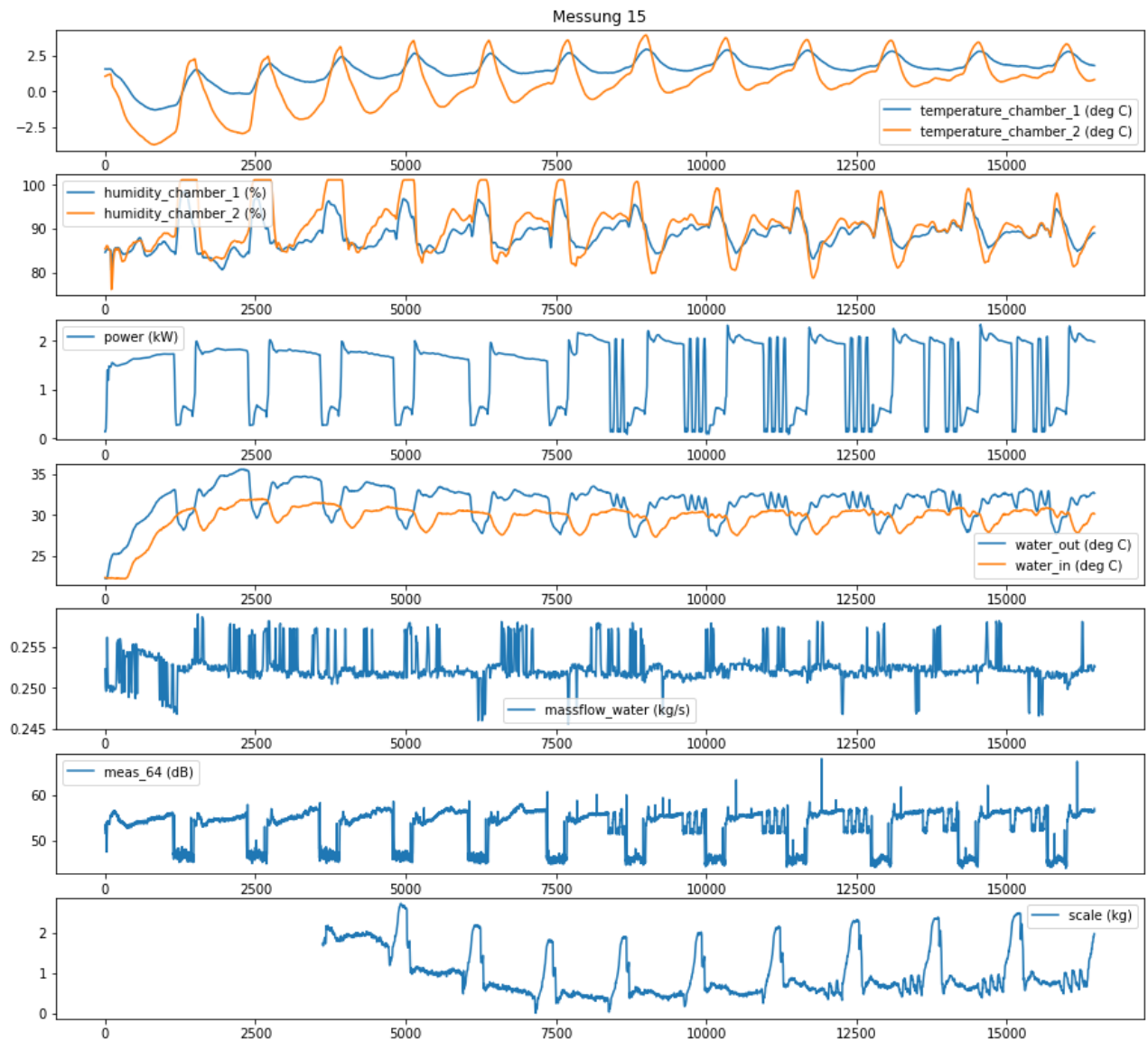


Abbildung 7.1-11: Zeitverlauf wesentlicher Klimakammerdaten, des Gewichts und des A-gewichteten Schalleistungspegels für Messung Nov18-15

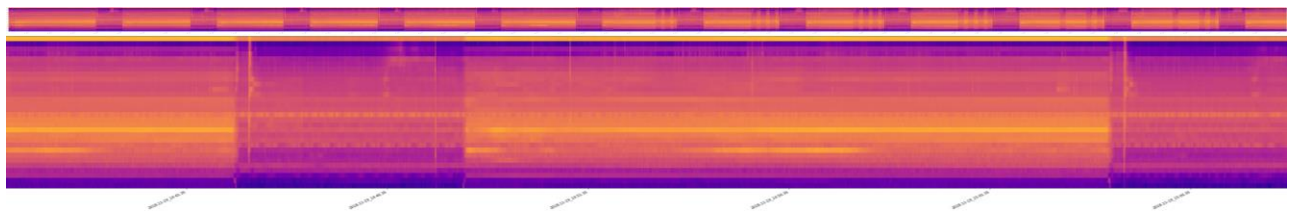


Abbildung 7.1-12: Zeitverlauf des Frequenzinhalts des A-gewichteten Schalleistungspegels (Wasserfalldiagramme) – jeweils Gesamt- und Detailzeitraum

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

Beschichteter vertikaler Röhren-Lamellen-Wärmeübertrager

Messungen März 2019

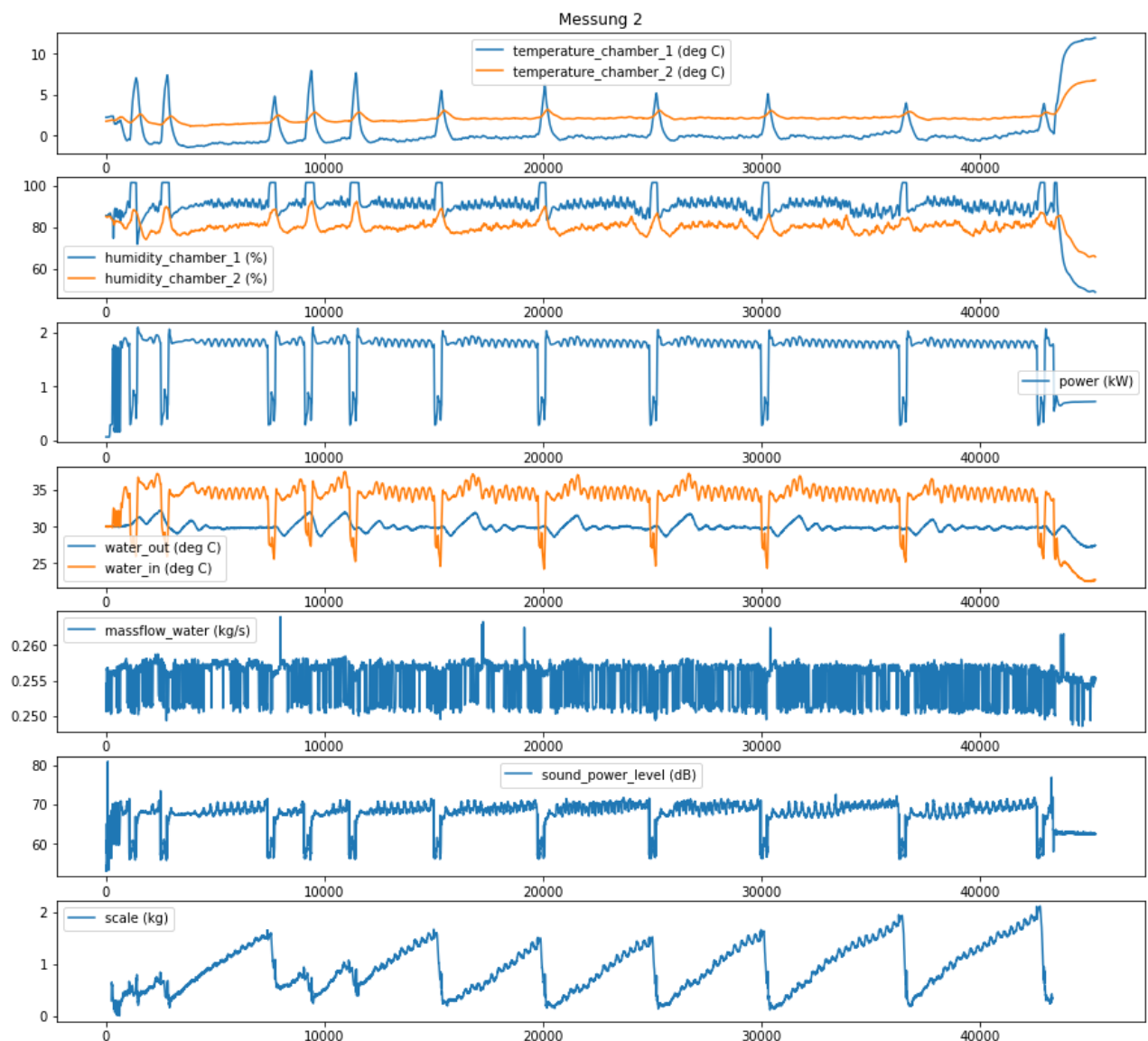


Abbildung 7.1-13: Zeitverlauf wesentlicher Klimakammerdaten, des Gewichts und des A-gewichteten Schalleistungspegels für Messung Mar19-02

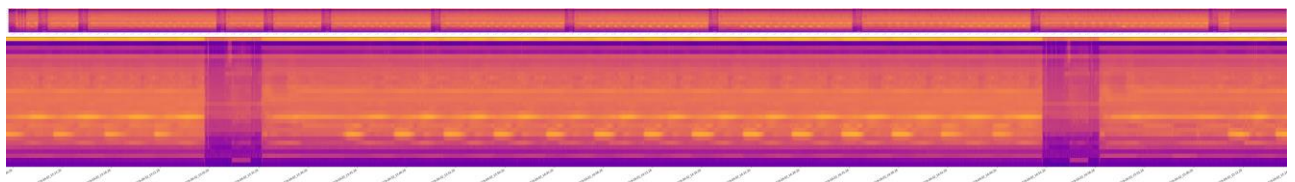


Abbildung 7.1-14: Zeitverlauf des Frequenzinhalts des A-gewichteten Schalleistungspegels (Wasserfalldiagramme) – jeweils Gesamt- und Detailzeitraum

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

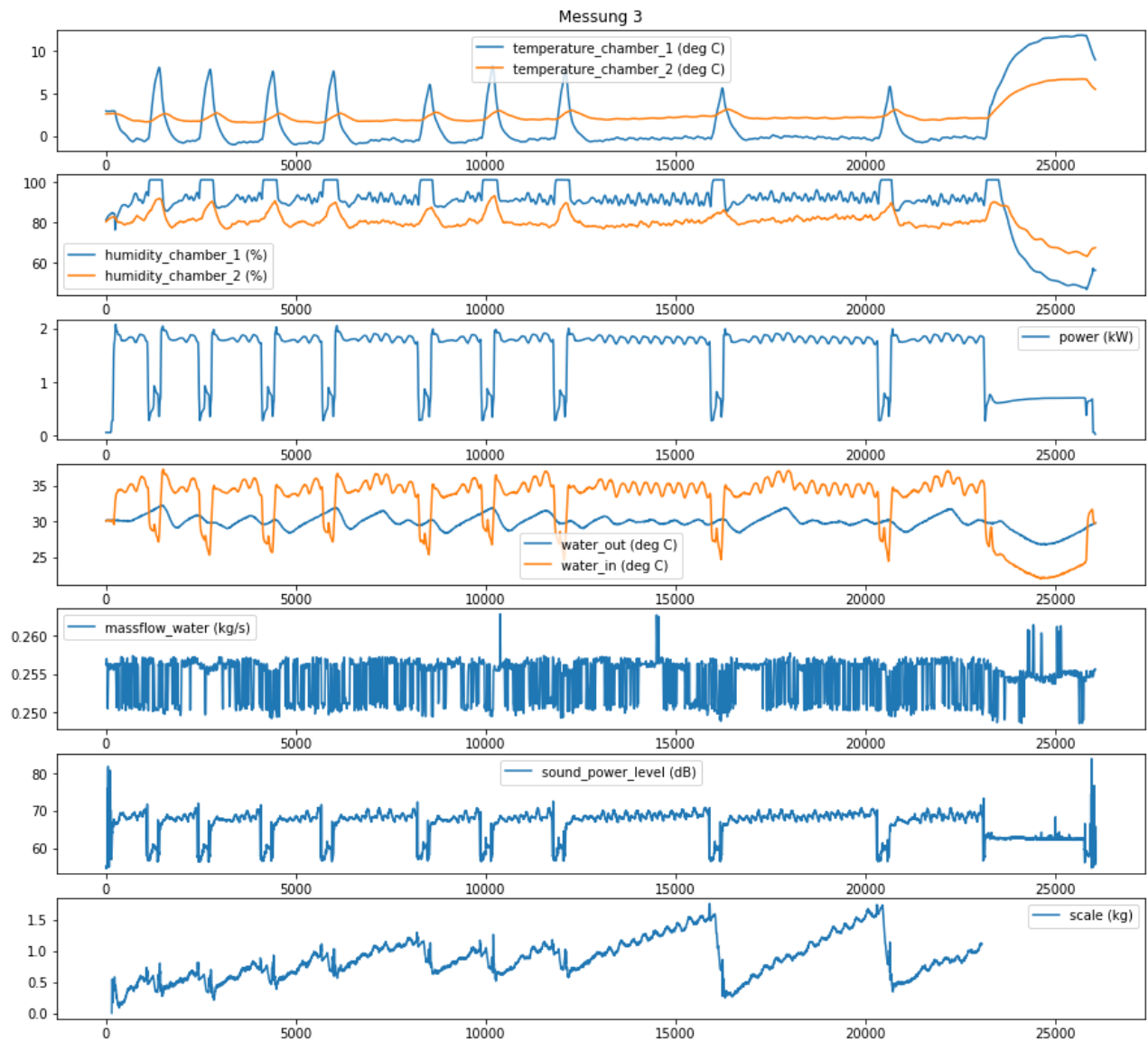


Abbildung 7.1-15: Zeitverlauf wesentlicher Klimakammerdaten, des Gewichts und des A-gewichteten Schalleistungspegels für Messung Mar19-03

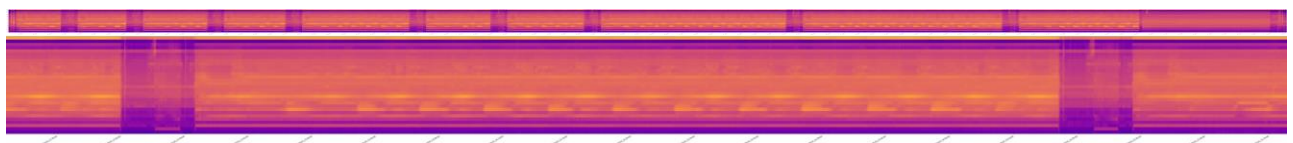


Abbildung 7.1-16: Zeitverlauf des Frequenzinhalts des A-gewichteten Schalleistungspegels (Wasserfalldiagramme) – jeweils Gesamt- und Detailzeitraum

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

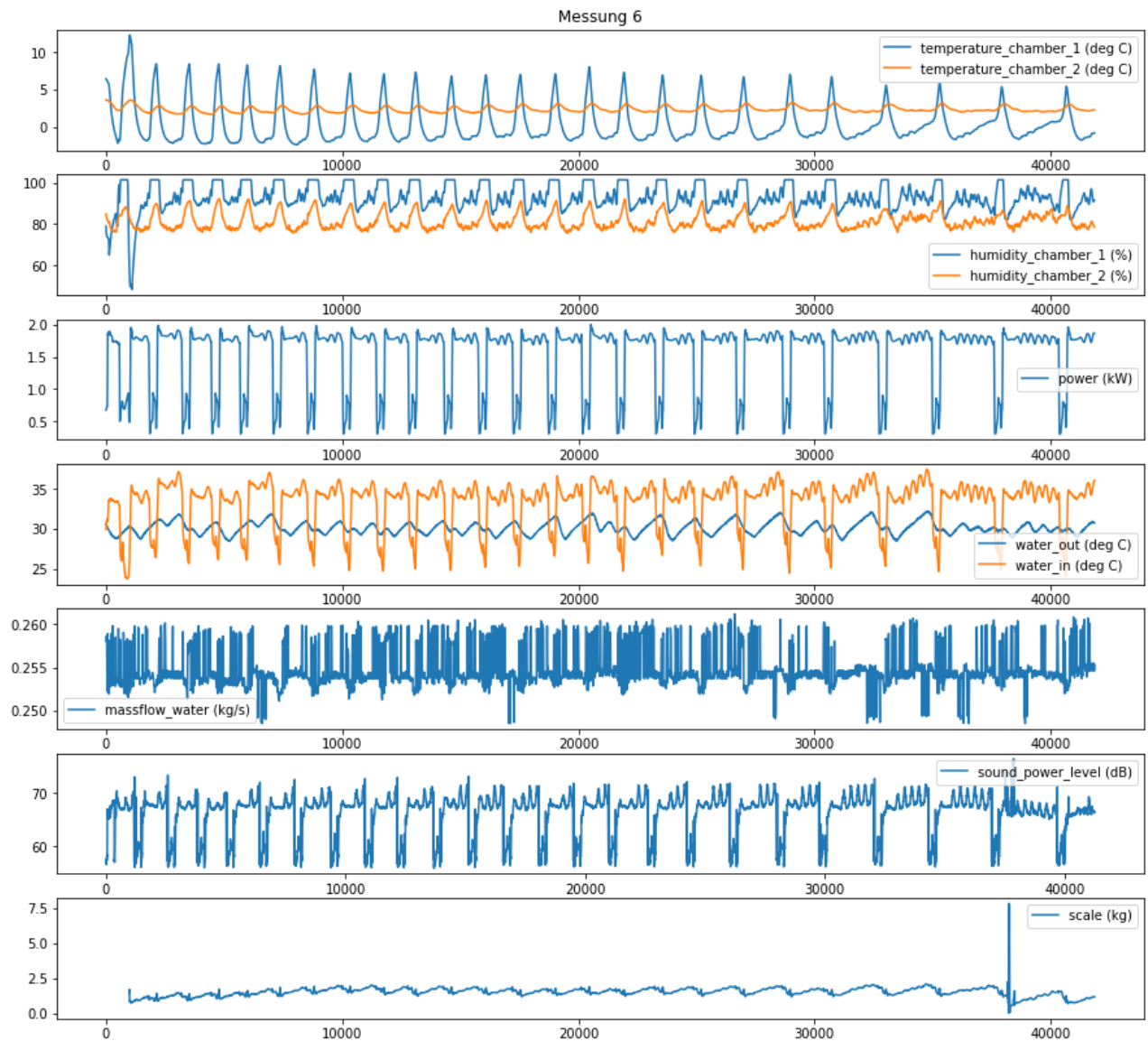


Abbildung 7.1-17: Zeitverlauf wesentlicher Klimakammerdaten, des Gewichts und des A-gewichteten Schalleistungspegels für Messung Mar19-06

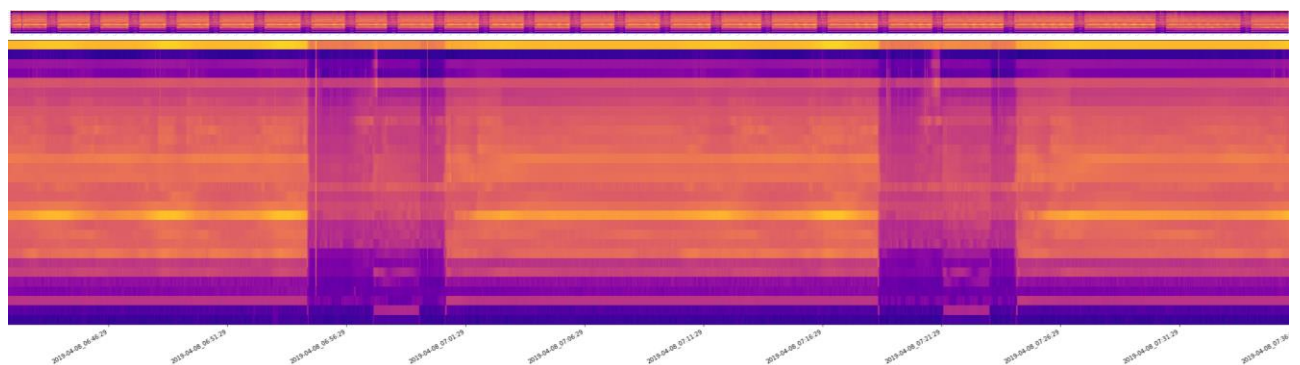


Abbildung 8.1-18: Zeitverlauf des Frequenzinhalts des A-gewichteten Schalleistungspegels (Wasserfalldiagramme) – jeweils Gesamt- und Detailzeitraum

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

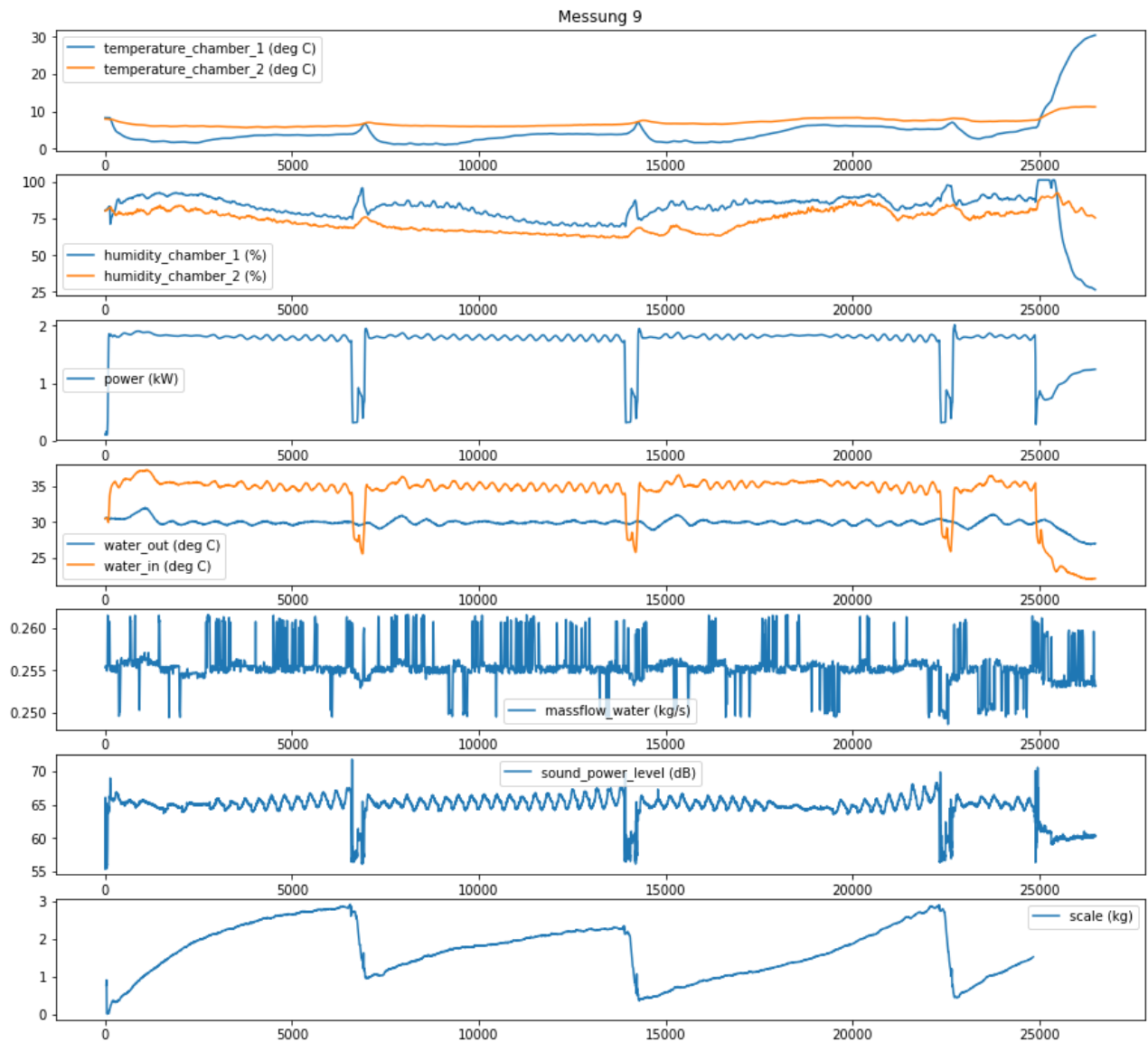


Abbildung 7.1-19: Zeitverlauf wesentlicher Klimakammerdaten, des Gewichts und des A-gewichteten Schalleistungspegels für Messung Mar19-09

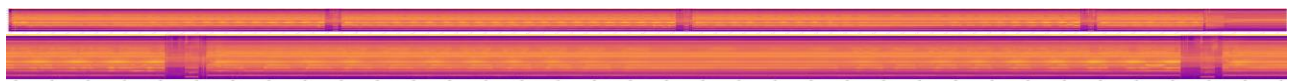


Abbildung 7.1-20: Zeitverlauf des Frequenzinhalts des A-gewichteten Schalleistungspegels (Wasserfalldiagramme) – jeweils Gesamt- und Detailzeitraum

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

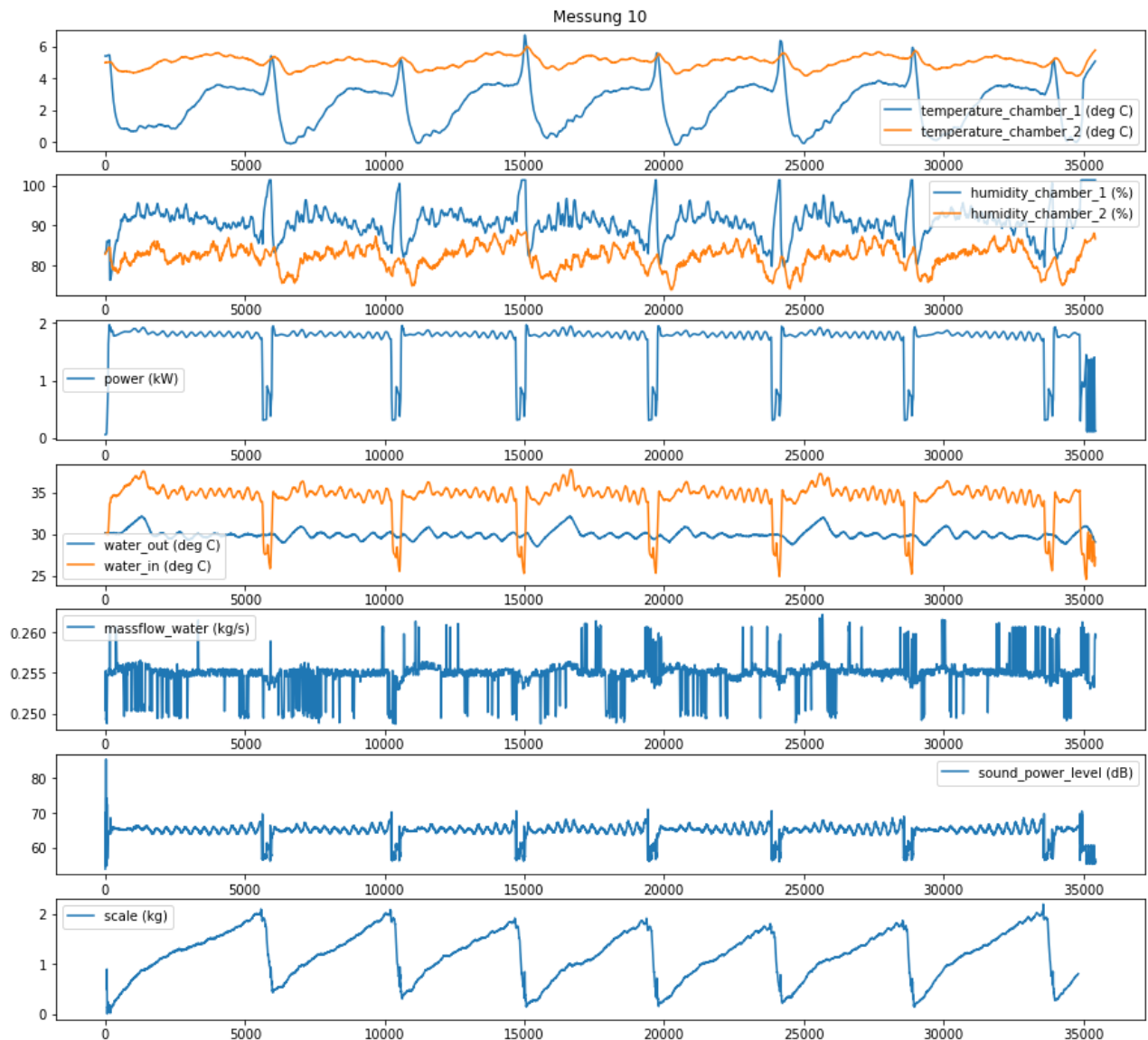


Abbildung 7.1-21: Zeitverlauf wesentlicher Klimakammerdaten, des Gewichts und des A-gewichteten Schalleistungspegels für Messung Mar19-10

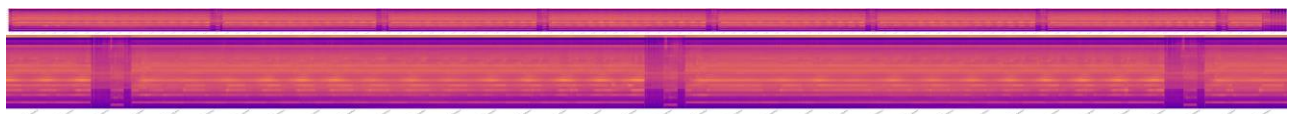


Abbildung 7.1-22: Zeitverlauf des Frequenzinhalts des A-gewichteten Schalleistungspegels (Wasserfalldiagramme) – jeweils Gesamt- und Detailzeitraum

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

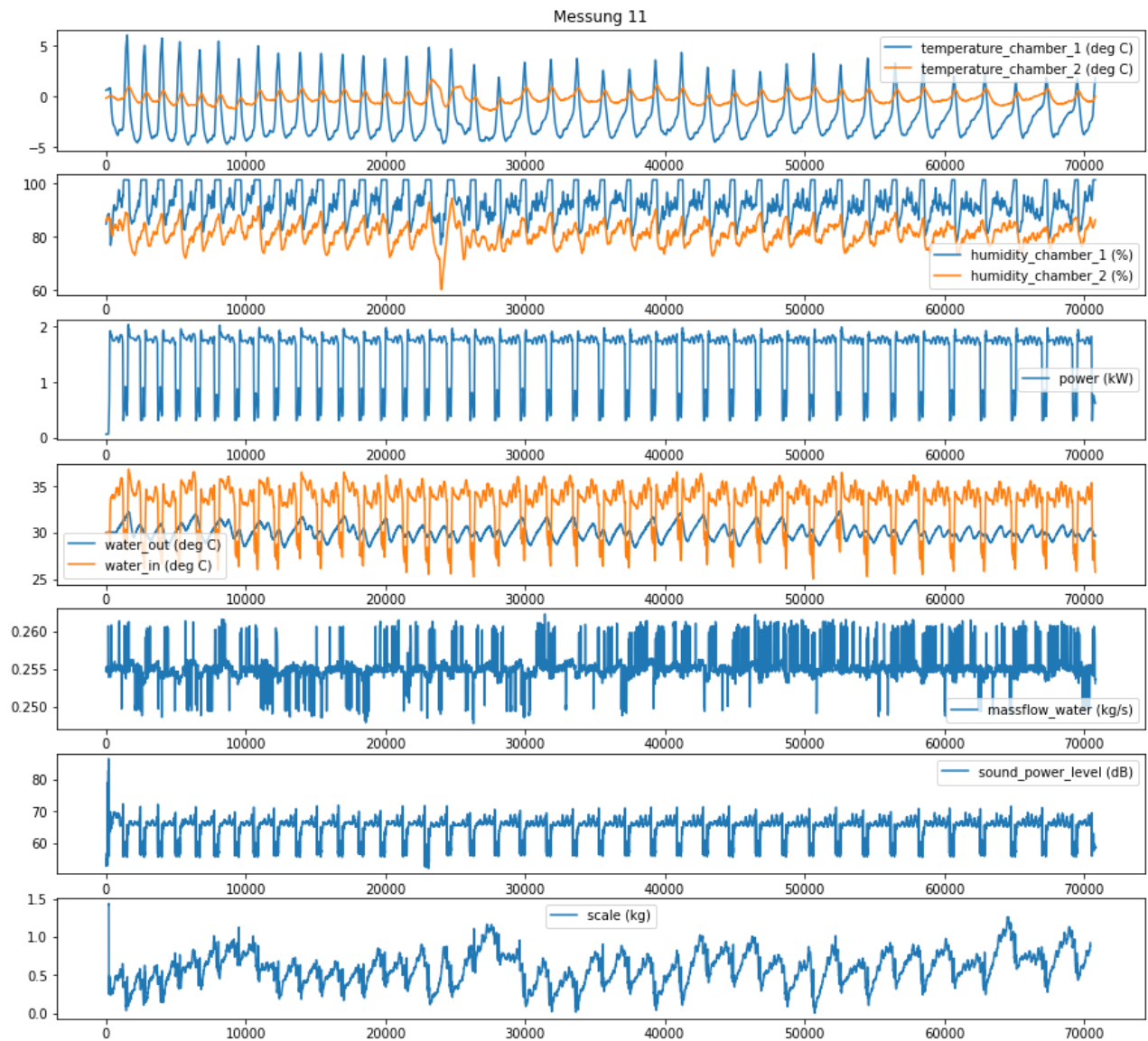


Abbildung 7.1-23: Zeitverlauf wesentlicher Klimakammerdaten, des Gewichts und des A-gewichteten Schalleistungspegels für Messung Mar19-11

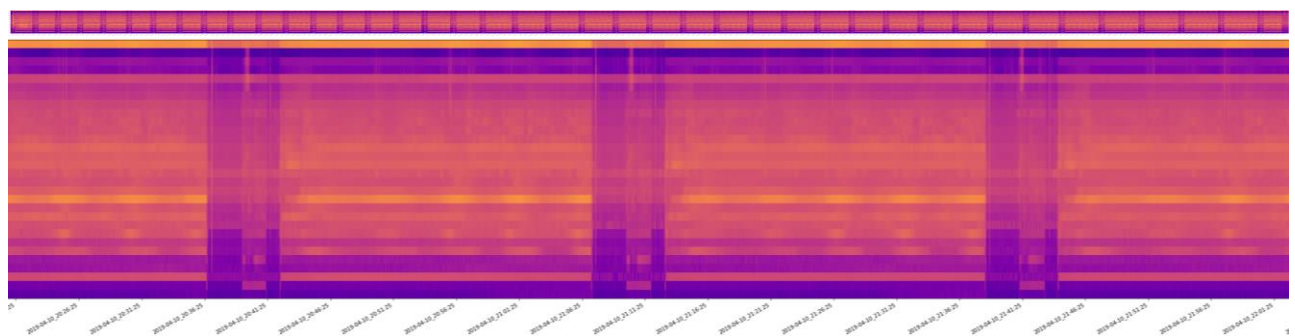


Abbildung 7.1-24: Zeitverlauf des Frequenzinhalts des A-gewichteten Schalleistungspegels (Wasserfalldiagramme) – jeweils Gesamt- und Detailzeitraum

7.2 Bericht zu den Wahrnehmungstests im Projekt SilentAirHP Österreichische Akademie der Wissenschaften, Institut für Schallforschung, Christian Kaseß, 22.03.2019

7.2.1 Aufgabenstellung

Der A-gewichtete Pegel ist die wichtigste Größe zur Quantifizierung von Umgebungslärm. Ein Großteil der Richtlinien und Grenzwerte beziehen sich auf diese, dem Hören nachempfundene, Frequenzgewichtung. Für die Wahrnehmung von Umgebungslärm, wozu auch die Schallimmissionen die durch Wärmepumpen verursacht werden zählen, ist bekannt, dass nicht nur der energetisch summierte Schallpegel sondern andere, stärker an der Funktion des Hörens, orientierte Größen teils bessere Übereinstimmung mit experimentellen Daten haben (siehe z.B. [1] und [2]). Hierzu zählt vor allem die Lautheit, also die Lautstärkewahrnehmung, aber auch die psychoakustische Rauigkeit durch schnelle Amplitudenmodulationen oder die Schärfe durch hochfrequente Komponenten.

Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, Geräusche von Wärmepumpen in verschiedenen Richtungen und unter Anwendung verschiedener, potentiell lärmindernder, Maßnahmen psychoakustisch zu evaluieren.

Untersucht wurden stationäre Geräusche 4 unterschiedlicher Wärmepumpenvarianten⁷:

- Originalzustand
- Wärmepumpe mit Diffusor
- Wärmepumpe mit Umlenkung
- Wärmepumpe mit Umlenkung und Kulissenschalldämpfer

Es wurden Emissionsmessungen in 4 Mikrofonpositionen in 127 cm Höhe über dem Boden ausgewählt (inklusive Mikrofonposition im Akustik-Dom):

- 0°: Lüfterachse Lufteinlass (B5)
- 180°: Lüfterachse Luftauslass (E5)
- 90°, 270°: Normal auf die Lüfterachse (C6, F6)

7.2.2 Methoden

Probanden

Für die Wahrnehmungstests standen in Summe 20 normalhörende Probanden zur Verfügung, wobei 10 weiblich und 10 männlich waren. Das durchschnittliche Alter betrug $28,6 \pm 6,6$ Jahre. Falls noch keine Daten vorhanden waren, wurde die Hörschwelle mittels eines Hörtests im Frequenzbereich zwischen 125 und 8000 Hz ermittelt. Alle Probanden hatten Schwellen unter 20 dB mit einer Ausnahme, welche einseitig bei 8000 Hz eine etwas erhöhte Schwelle von 30 dB hatte. Da in diesem Versuch auf beiden Ohren das gleiche

⁷ Im Angebot wurde von 5 Wärmepumpenvarianten ausgegangen. Da verschiedene Richtungen ebenfalls untersucht wurden ergeben sich nun 16 Varianten insgesamt

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

Geräusch präsentiert wurde, wurde diese Versuchsperson trotzdem in die Studie aufgenommen.

Auswahl der Geräusche

Um vergleichbare Betriebszustände über die verschiedenen Maßnahmen zu garantieren wurden Geräusche 60 Sekunden nach Beendigung eines Enteisungszyklus verwendet. Die Dauer wurde, wie im Angebot dargelegt, mit 5 Sekunden gewählt. Dies ist in diesem Bereich eine übliche Signallänge und stellt einen Kompromiss dar. Einerseits soll die Testperson einen Eindruck des Signals bekommen, andererseits soll der gesamte Test nicht zu lange dauern, um die Konzentration nicht zu verlieren.

Lästigkeitsbewertung

Auf Basis der zur Verfügung gestellten Daten wurde eine freie Größenschätzung durchgeführt, welche bereits bei ähnlichen Fragestellungen verwendet wurde [1] [2] [3].

Diese unterscheidet sich von anderen Größenschätzungen dadurch, dass keine Referenzskala vorgegeben ist (z.B. von gar nicht bis sehr lästig). Dadurch lässt sich keine absolute Lästigkeit ableiten, sondern nur die Änderung der Lästigkeit als Funktion experimenteller Parameter. Dies ist im vorliegenden Projekt keine wesentliche Einschränkung, da das Hauptinteresse der Studie der Veränderung der Empfindung bei Veränderung der akustischen Parameter gilt. Weiters ist die Angabe von absoluten Lästigkeiten im Labor an sich schwierig, da diese unter anderem sehr stark kontextabhängig ist [4].

Bei der freien Größenschätzung können die Probanden zwar den Zahlenbereich frei wählen, eine wichtige Vorgabe ist aber, dass eine doppelt empfundene Lästigkeit als doppelt so hoher Zahlenwert abgebildet werden soll und dass Zahlen kleiner gleich 0 nicht zulässig sind. Es ist daher immer möglich, eine größere Lästigkeit anzugeben, falls ein Stimulus lästiger ist als alle bisher gehörten.

Im Testdesign wurden die verschiedenen gemessenen Bedingungen verwendet. Weiters wurden 8 Samples mit rosa Rauschen bei verschiedenen Pegeln im Bereich der A-Pegel der Wärmepumpensignale hinzugefügt. Dies dient dazu, die Ergebnisse mit späteren Studien besser vergleichbar zu machen (siehe z.B. [5])⁸.

Es wurden 3 Durchläufe durchgeführt, wobei in jedem Durchlauf jeder Stimulus dreimal enthalten war. Dadurch wurde jede Bedingung zehnmal getestet. Die Darbietung der Geräusche in jedem Durchgang erfolgte in zufälliger Reihenfolge. Zwischen den Durchläufen mussten die Probanden mindestens 5 Minuten Pause machen.

Datenaufbereitung und Auswertung

Psychoakustische und akustische Parameter

Die akustischen Parameter (dies inkludiert auch psychoakustisch motivierte Parameter) für die 5 Sekunden langen Geräusche wurden mittels der Matlab-Toolbox psysound3 [6] berechnet. Diese umfassten die Lauheit nach Glassberg und Moore [7], die Rauigkeit [8],

⁸ Das rosa Rauschen ersetzen die im Angebot erwähnten Geräusche anderer Lärmquellen, da eine Auswahl solcher Geräusche sehr willkürlich wäre und zu großen Schwankungen unterliegen würde.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

die Tonhaltigkeit [9], die Schärfe und die Lautheitschwankung [10]. Weiters wurden A, B, und C-frequenzbewertete Pegel (Zeitbewertung fast) berechnet. Von diesen wurden sowohl der Median als auch die 5%-Perzentile (der Wert der in 5% der Zeit überschritten wird) berechnet, z.B. S50 und S5 für mediane und die 5% Schärfe. Aus der Lautheit wurde auch noch der Lautstärkepegel in Phon berechnet.

Lästigkeit

Bei diesem Test kann es vorkommen, dass Probanden sich vertippen. Wenn solche Fehler gemeldet wurden (insgesamt 4 über 3 Probanden verteilt), und diese eindeutig nachvollziehbar waren (alle 4 Fälle), wurde eine Korrektur der Daten vorgenommen und protokolliert.

Die Urteile wurden zur Basis 2 logarithmiert, d.h. eine Steigerung der log-Lästigkeit um 1 bedeutet eine Verdoppelung. Eine Ausreißerdetektion (Mittelwert ± 3 -facher Standardabweichung) pro Bedingung und Proband ergab keine weiteren Ausreißer.

Konsistenz der Probandenurteile

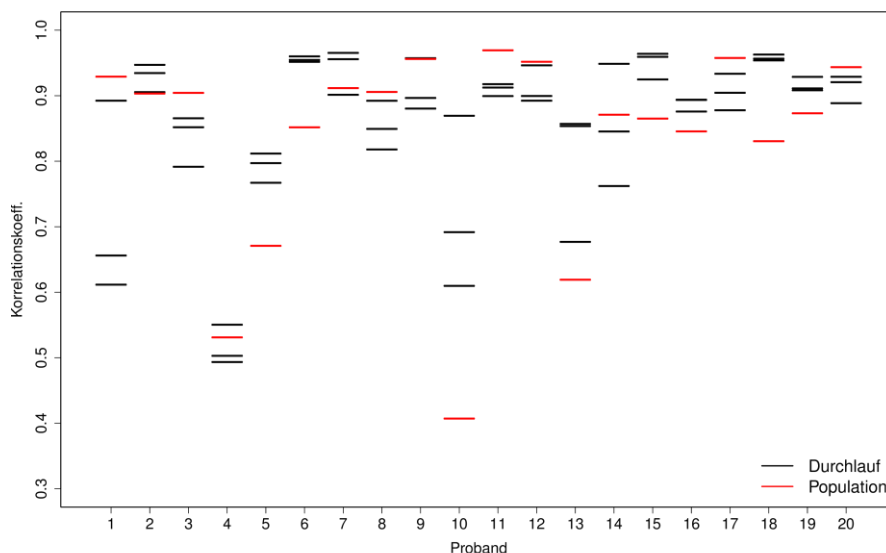


Abbildung 7.2-1: Korrelation aller Bewertungen inklusive des rosa Rauschens pro Proband zwischen den Durchgängen (schwarz) und im Vergleich zum über die Gruppe gemittelten Urteil.

Abbildung 7.2-1 zeigt die Korrelationen über die drei Durchgänge (alle 3 möglichen Kombinationen) pro Proband, wobei hier die drei Darbietungen pro Bedingung und Durchgang gemittelt wurden. Insgesamt sind die Urteile über die Wiederholungen sehr konsistent, mit Ausnahme einer Versuchsperson (VP 4). Wenn die mittleren Urteile pro Proband mit dem mittleren Gesamturteil korreliert werden, ergeben sich zwei nennenswerte Punkte. Die Versuchsperson mit relativ inkonsistenten Urteilen zeigt eine niedrige Korrelation mit dem Gesamturteil. Zweitens scheinen sich 3 Probanden ein etwas anderes Urteil zu bilden als der Rest (VPs 5, 10 und 13). Dies äußert sich darin, dass vor allem bei letzteren beiden (VPs 10 und 13) die Lästigkeitswerte der Wärmepumpe bei gleichem A-Pegel deutlich unterhalb des rosa Rauschens liegen wogegen der Rest der Probanden dies eher umgekehrt bewertet.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

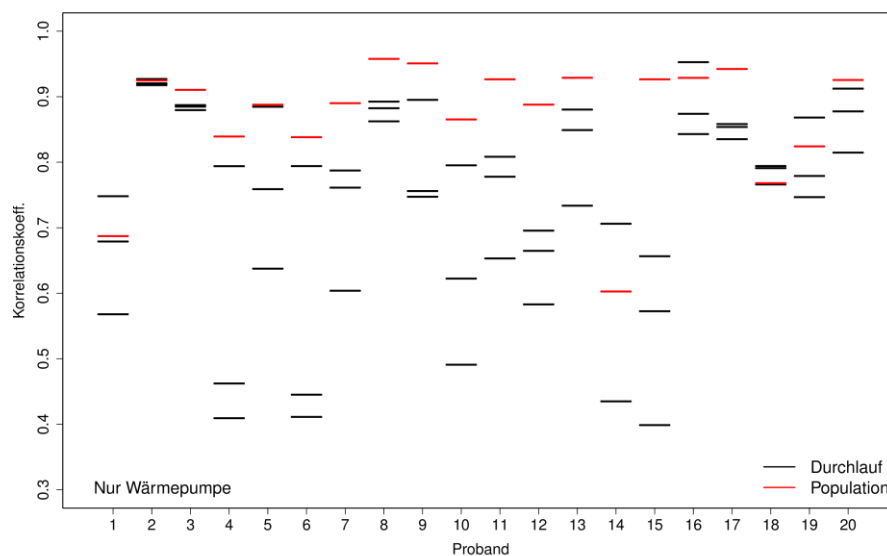


Abbildung 7.2-2: Korrelation der Bewertungen der Wärmepumpengeräusche pro Proband zwischen den Durchgängen (schwarz) und im Vergleich zum über die Gruppe gemittelten Urteil.

Werden nur die Korrelationen der Wärmepumpengeräusche betrachtet (Abbildung 7.2-2), ergibt sich eine erhöhte Streuung der Korrelation, was aufgrund des reduzierten Pegelumfangs und der sehr unterschiedlichen Geräuschcharakteristika zu erwarten ist. In Bezug auf das Populationsmittel ergibt sich ebenfalls ein verändertes Bild. Die Konsistenz zum mittleren Urteil ist sehr hoch. Interessanterweise fallen hier die VPs 5, 10 und 13 nicht auf und auch VP 4 zeigt eine größere Übereinstimmung. VP 1 aber vor allem 14 zeigen hier eine etwas verringerte Konsistenz. Grundsätzlich beurteilen aber die Probanden die Unterschiede bei den Wärmepumpengeräuschen in einer ähnlichen Art und Weise.

Für die weitere Analyse wurde der Mittelwert über alle Urteile pro Proband berechnet und der Mittelwert über alle mittleren Urteile pro Proband abgezogen um die Daten zu normalisieren (z.B. [2] [1]). Für den Gruppenmittelwert wurden diese probandenspezifischen Urteile pro Bedingung über die Probanden gemittelt.

Statistische Auswertung

Alle statistischen Auswertungen erfolgten mit der Software R [11]. Auf Basis der mittleren Urteile für die Wärmepumpengeräusche pro Proband wurden mittels einer Repeated-Measures-Analysis-of Variance (ANOVA für abhängige Daten) der Einfluss von Maßnahme und Messposition untersucht. Dafür wurden das R-Paket ez [12] verwendet. Auf Basis der Ergebnisse der ANOVA wurden Post-hoc-Tests mittels gepaarter t-tests durchgeführt [13] [14].

Um den Zusammenhang verschiedener akustischer Merkmale der Geräusche mit dem Lästigkeitsurteil zu untersuchen wurde ein stufenweises Verfahren verwendet bei dem sukzessive erklärende Variable hinzugefügt aber auch wieder entfernt werden können (stepAIC im Paket MASS [15]). Als Qualitätsmaß für das Modell wurde das Bayes Information Criterion (BIC [16]) verwendet, welches sowohl Modellfehler als auch Komplexität des Modells in Betracht zieht.

7.2.3 Ergebnisse

Akustische und Psychoakustische Größen

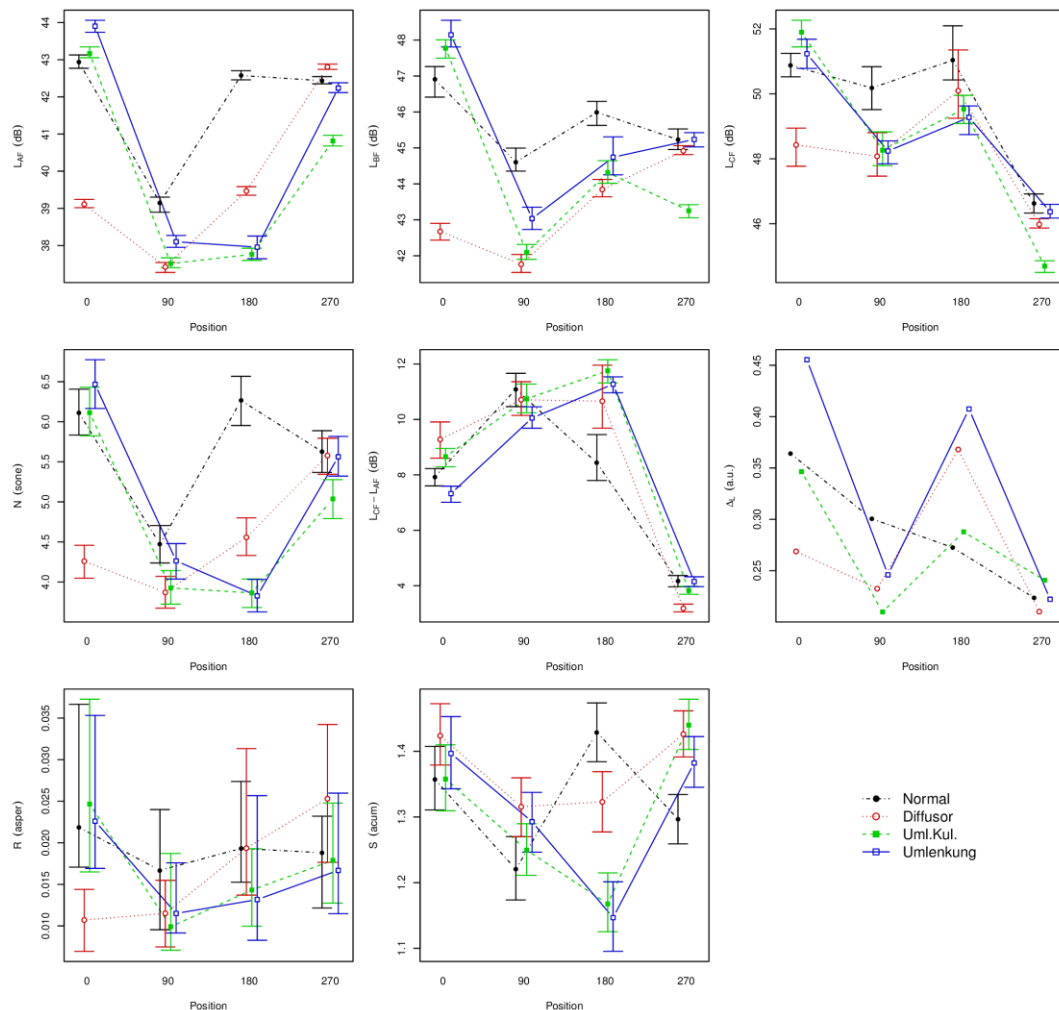


Abbildung 7.2-3: Verschiedene akustische Größen in Abhängigkeit der Richtung für die vier Bedingungen. Die Fehlerbalken zeigen die 25% und 75% Perzentile

Betrachtet man den Schalldruckpegel oder auch die Lautheit N (Abbildung 7.2-3), sieht man, dass in Richtung des Lüftungsauslasses (180°) die größten Pegel/Lautheiten nur im Originalzustand auftreten wogegen beim Einlass einzig der Diffusor einen Unterschied verursacht. An den Seiten ist der Unterschied deutlich geringer wobei bei 90° deutlich geringere Werte auftreten als bei 270°. Der Unterschied zwischen C-gewichtetem und A-gewichtetem Pegel wird oftmals als Maß für die tieffrequenten Anteile verwendet. Hier zeigt sich bei 270° ein deutlich geringerer Unterschied was auf geringere tieffrequente Geräuschanteile schließen lässt.

Beim Auslass zeigt sich auch ein größerer Unterschied in der Schärfe S wobei der Normalzustand und auch der Diffusor höhere Werte zeigen. Bei der Rauigkeit R sind die Unterschiede im Vergleich zur Streuung relativ gering abgesehen von der geringeren Rauigkeit des Diffusors in Einlassrichtung. Abbildung 7.2-4 zeigt die gleichen Daten aber als Funktion der Maßnahme. Hier sieht man deutlich, dass die seitlichen Positionen eher weniger von der jeweiligen Maßnahme beeinflusst werden.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

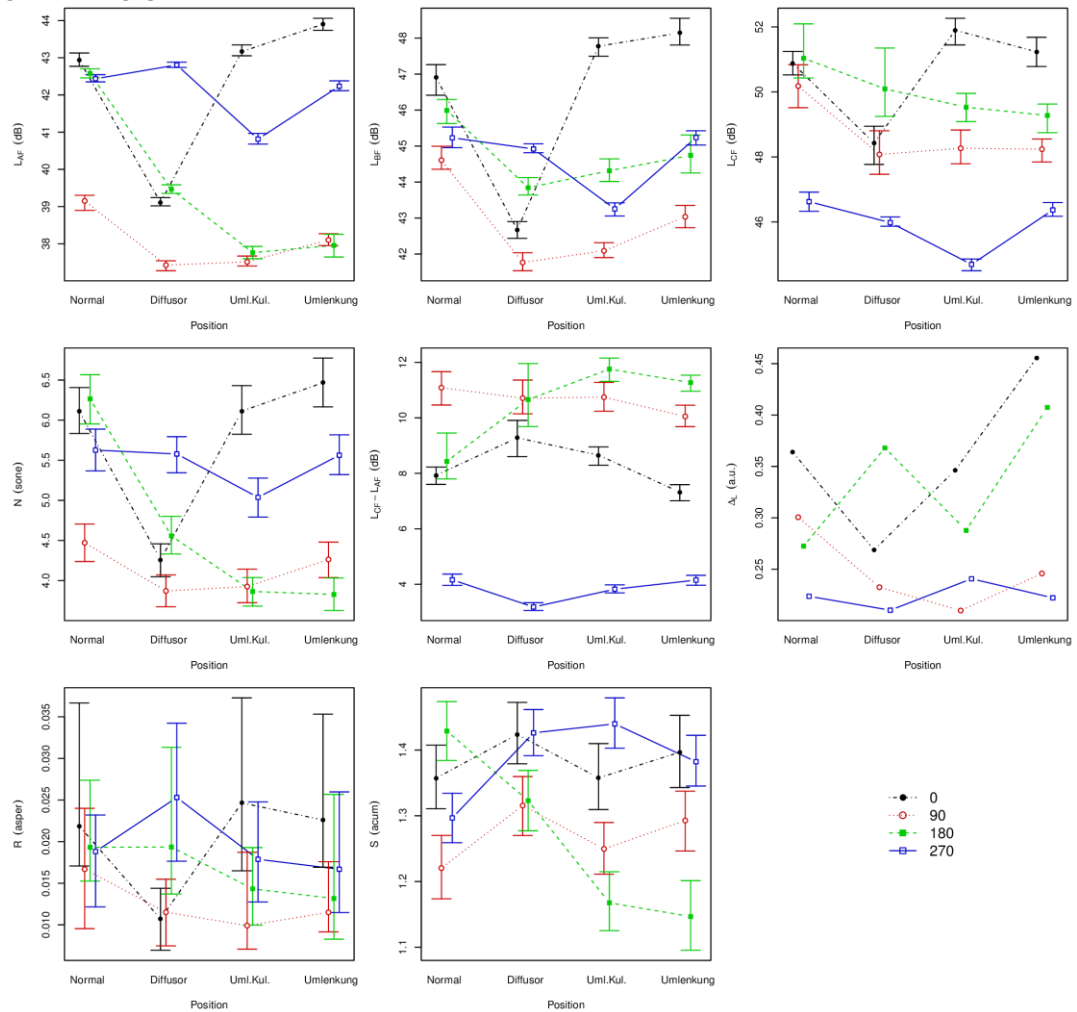


Abbildung 7.2-4: Verschiedene akustische Größen in Abhängigkeit der Bedingungen für die vier Richtungen

Lästigkeit als Funktion der Position und des Zustandes

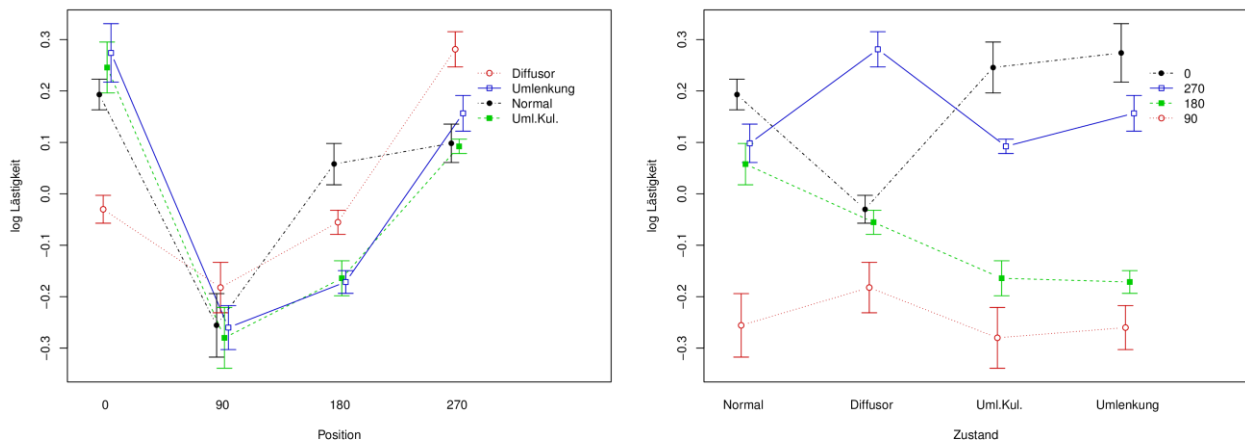


Abbildung 7-2.5: Lästigkeitsurteile als Funktion der Position und des Wärmepumpenzustandes

Abbildung 7-2.5 zeigt die Lästigkeitsurteile in Abhängigkeit des Zustandes und der Position⁹. Die ANOVA zeigte einen signifikanten Haupteffekt der Position ($p < 0.0001$) und ebenso eine signifikante Interaktion zwischen Position und Zustand ($p < 0.0001$). Mauchly's Test zeigte für beide Effekte eine Verletzung der Sphärizitätsannahme. Nach der Korrektur nach Greenhouse-Geisser [17] waren beide Effekte noch immer signifikant mit $p < 0.0001$. Der Zustand alleine zeigte keine signifikanten Veränderungen der Lästigkeit.

Aufgrund der signifikanten Interaktion wird zuerst diese genauer untersucht bevor der Haupteffekt der Position betrachtet wird. Die paarweisen Interaktionen sind in Abbildung 7.2-6 und Abbildung 7.2-7 dargestellt und werden nun systematisch analysiert.

⁹ Bei den Ergebnissen ist wichtig anzumerken, dass bei drei Zuständen durch ein Problem in der Verarbeitung am Ende des Geräusches ein wahrnehmbarer Klick präsent war (180° Normalzustand und deutlich geringer bei 180° Umlenkung und 0° Normalzustand). Eine mögliche Beeinflussung des Lästigkeitsurteils kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, scheint aber unwahrscheinlich. Die drei Bedingungen zeigen weder eine erhöhte Varianz über die Probanden noch eine Auffälligkeit in Bezug auf Lautheit oder Pegel.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

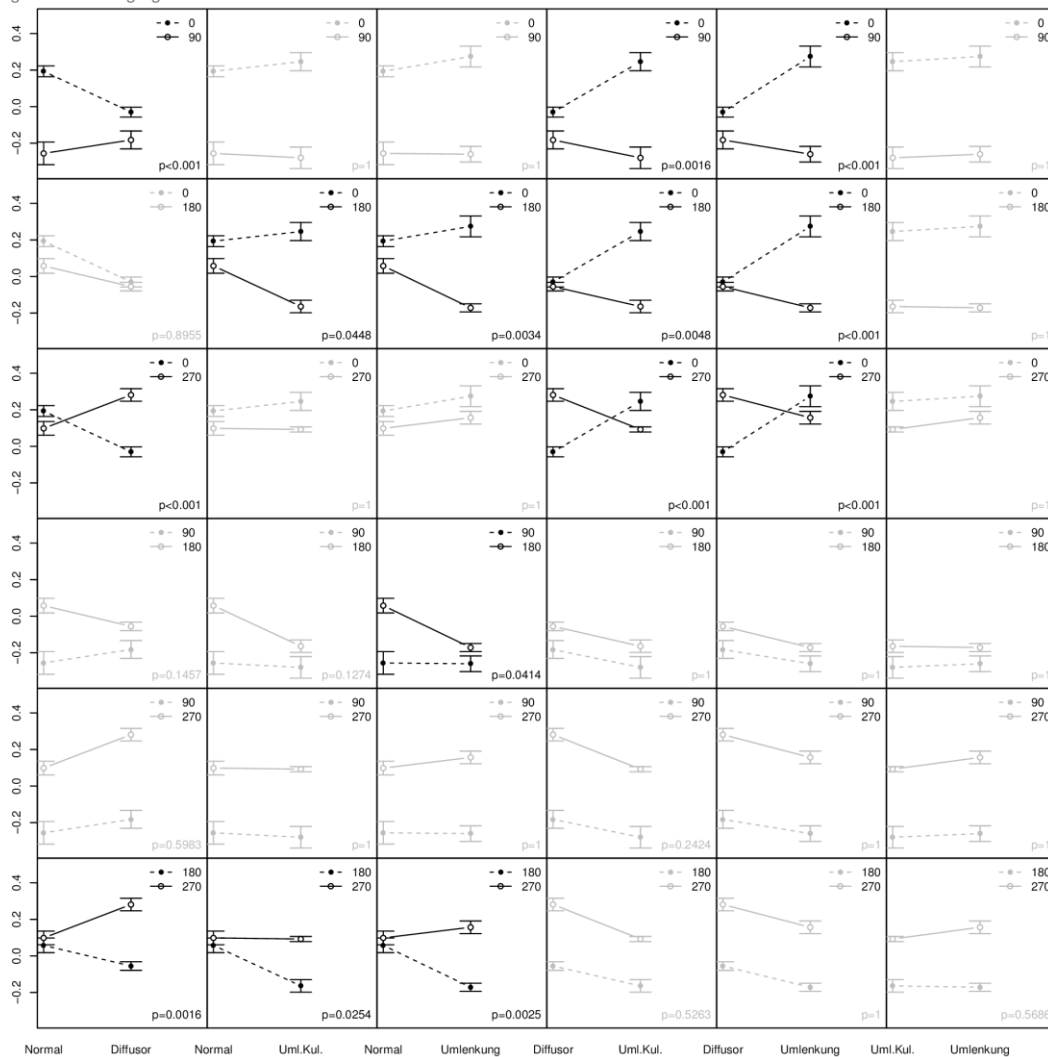


Abbildung 7.2-6: Paarweise Interaktionen zwischen den Faktorstufen der Position und des Zustandes. Grau bedeutet, dass der Effekt nicht signifikant ist

Interaktion Normal vs. Diffusor

Hier entstanden Interaktionseffekt dadurch, dass die Lästigkeit entlang der Lüfterachse (0° und 180°) durch den Diffusor gesenkt wird, wogegen an den Seiten dieser Effekt tendenziell gegenläufig ist.

Interaktion Normal vs. Umlenkung+Kulissenschalldämpfer

Hier sind alle (schwach) signifikanten Interaktionen durch die abweichende Veränderung bei 180° zu begründen, wo die Lästigkeit durch die Maßnahme abnimmt. Für die reine Umlenkung ist der Effekt vergleichbar.

Interaktion Diffusor vs. Umlenkung

Die wahrgenommene Lästigkeit ist beim Diffusor bei 0° geringer, ansonsten tendenziell höher. Durch diesen Unterschied bei 0° sind die Interaktionen signifikant. Der Kulissenschalldämpfer erzeugt hier keine zusätzlichen signifikanten Effekte.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

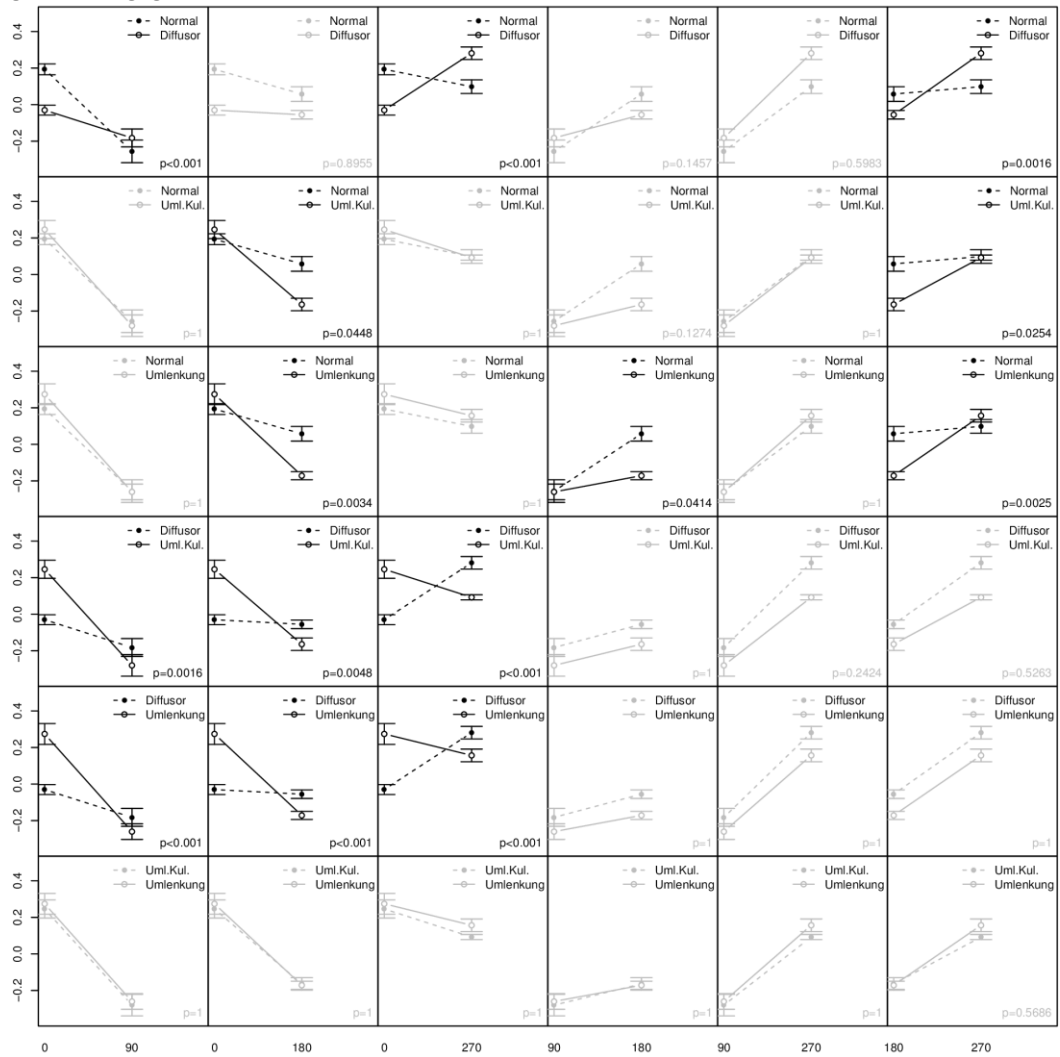


Abbildung 7.2-7: Paarweise Interaktionen zwischen den Faktorstufen der Position und des Zustandes. Grau bedeutet, dass der Effekt nicht signifikant ist

Haupteffekt Position

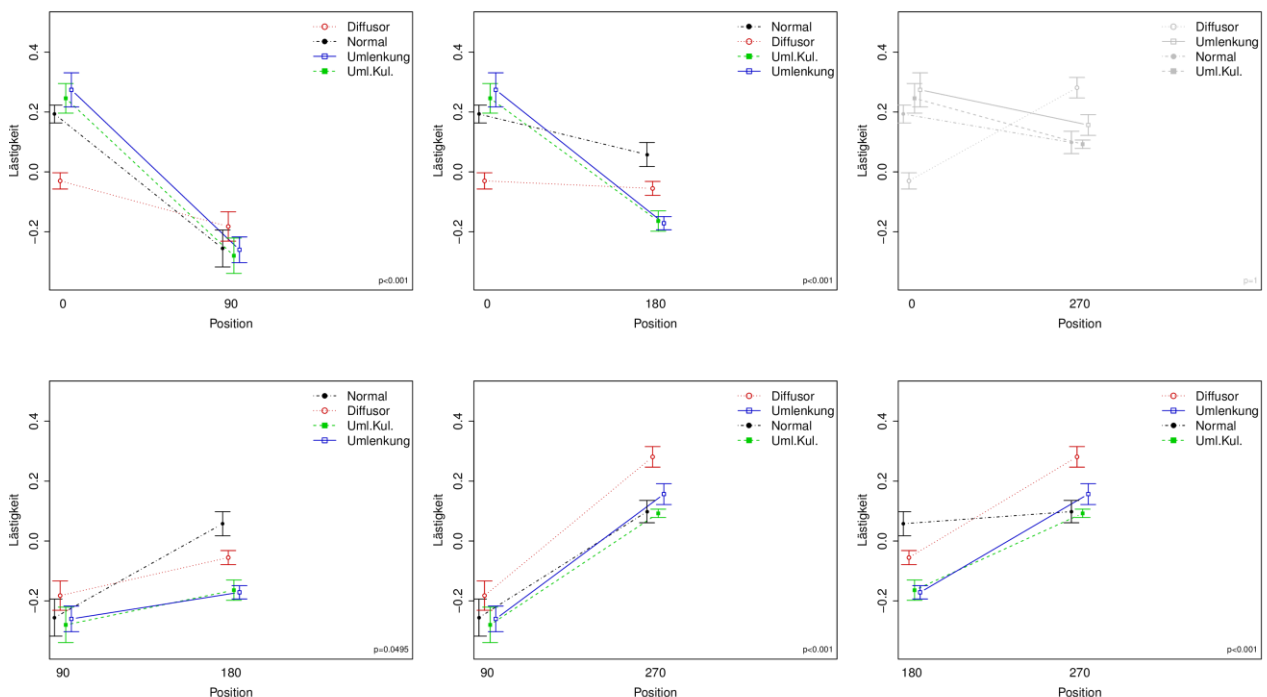


Abbildung 7.2-8: Interaktionsgrafiken für die paarweisen Haupteffektkontraste des Faktors Position und dem Faktor Zustand. Grau bedeutet, dass der Haupteffekt-Kontrast für die Position nicht signifikant ist

Ein post-hoc Test (Abbildung 7.2-8) zeigt, dass alle möglichen Unterschiede zwischen den Richtungen signifikant sind mit der Ausnahme des Unterschiedes zwischen 0° und 270° wobei der Unterschied zwischen 90° und 180° gerade noch signifikant ist. Aufgrund der signifikanten Interaktion zwischen Position und Maßnahme ist bei der Interpretation allerdings Vorsicht geboten.

Die Position bei 90° wird als signifikant weniger lästig wahrgenommen als die Position bei 0°. Hier zeigt sich, dass alle Interaktionen rein quantitativ sind, d.h. in jeder Kombination ist die mittlere Lästigkeit bei 90° geringer.

Der Vergleich 180° vs. 0° ist ähnlich, allerdings ist der Unterschied zwischen diesen beiden Richtungen beim Diffusor vergleichsweise gering. Dadurch ist auch der Unterschied zwischen 90 und 180° bei allen Maßnahmen qualitativ gleich. Dies gilt auch für den Unterschied 90 und 270° wogegen 180° vs. 270° nicht ganz eindeutig ist, da hier wiederum beim Diffusor die beiden Richtungen sehr ähnlich beurteilt wurden.

Lästigkeit vs. akustische Merkmale

Bei der statistischen Analyse zeigten sich Unterschiede in der Wahrnehmung der einzelnen Bedingungen. Die Frage ist, welche akustischen Merkmale hierfür ausschlaggebend sind. Hierzu wurde eine schrittweise Modellselektion anhand der mittleren Lästigkeitsurteile der Wärmepumpendaten (ohne Rosa Rauschen) durchgeführt.

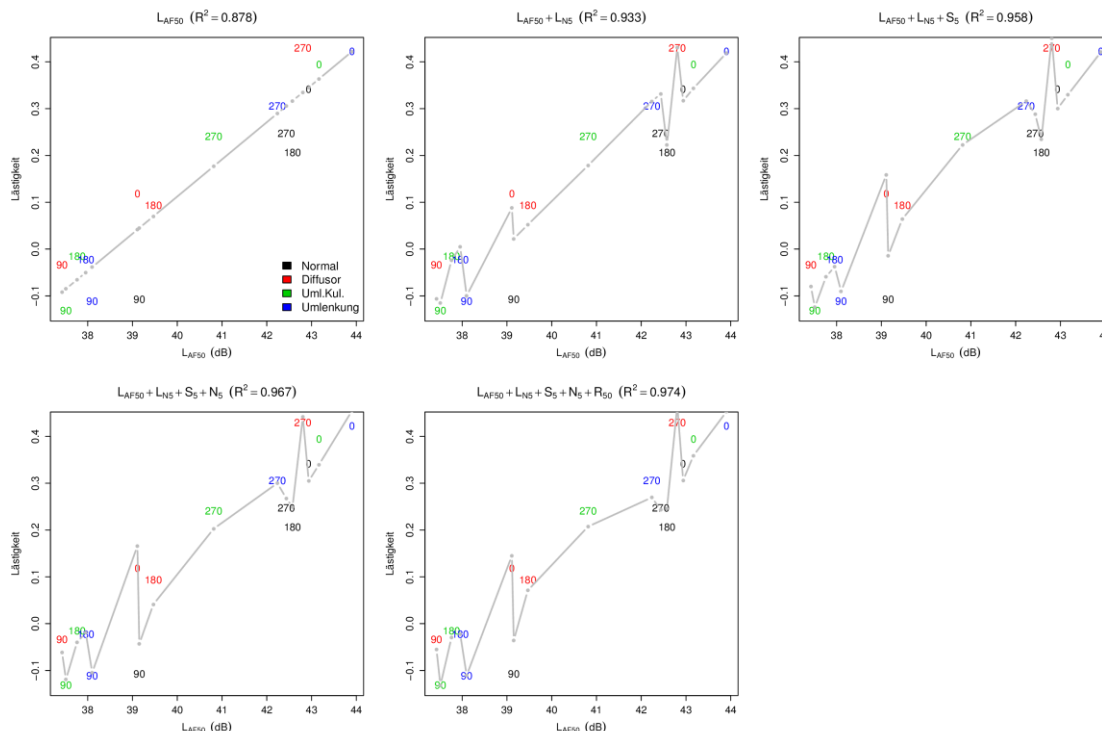


Abbildung 7.2-9: Lästigkeit als Funktion des LAF50 und die stufenweise Modellselektion inklusive Modellfit (graue Linie)

Das beste Modell enthielt 5 akustische Variablen und ergab sich wie folgt:

$$\text{Logarithmische Lästigkeit} = \text{const} + 0,1640 \cdot L_{AF50} - 0,2270 \cdot L_{N5} + 0,6436 \cdot S_5 + 0,3287 \cdot N_5 + 7,3415 \cdot R_5$$

Hierzu zeigt Abbildung 7.2-9 den Zusammenhang zwischen den Lästigkeitsurteilen für die Wärmepumpen und dem LAF50. Die Linie zeigt die Vorhersage auf Basis der Vorhersage des im Titel angezeigten linearen Modells. Weiters ist auch der Anteil der erklärten Varianz angegeben (R^2). Hier sieht man, dass der LAF50 die Urteile tendenziell erklärt und wie die sukzessiv hinzugefügten Parameter die bestehenden Abweichungen immer besser erfassen wobei der Zuwachs der erklärten Varianz durch die beiden letzten Parameter weniger als 2% beträgt (95,8% auf 97,4%).

Nimmt man nur jeweils die verschiedenen Lautheitsmaße (N_5 , N_{50} , L_{N5} , L_{N50}) so erklären diese im Bereich zwischen 75% und 78% und damit deutlich weniger als der LAF50 (ca. 87%). Um abzuklären, ob die Probanden plausible Bewertungen liefern, wurde im Weiteren das rosa Rauschen untersucht. Hier sollte die Lautheit aufgrund der reinen Skalierung der unterschiedlichen Stimuli einen Großteil der Lästigkeit erklären. Eine Korrelationsanalyse

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

zeigt, dass der Lautstärkepegel (L_{N5} und L_{N50}) ca. 99,5% der Varianz erklären wobei ein Anstieg von ca. 12 Phon einer Verdoppelung der Lästigkeit entspricht. D.h. eine Verdoppelung der Lautheit (10 Phon Anstieg für Lautheiten > 1 Sone) verursacht etwas weniger als eine Verdoppelung der Lästigkeit. Beim L_{AF50} (99,4%) sind es etwa 10 dB für eine Verdoppelung. Im Vergleich dazu ist der Anstieg bei den Wärmepumpendaten ca. 16 Phon oder 12,5 dB (vgl. zu 14 dB für Zugvorbeifahrten [2])

7.2.4 Zusammenfassung

Aus den Untersuchungen haben sich folgende Hauptpunkte ergeben:

1. Der Effekt der verschiedenen Maßnahmen auf die verschiedenen akustischen und psychoakustischen Maße ist sehr stark richtungsabhängig. Unterschiede sind besonders bei den Pegeln, der Lautheit und der Schärfe zu beobachten
2. Diese Abhängigkeit zwischen Maßnahme und Richtung setzt sich auch bei der Wahrnehmung fort was sich durch eine signifikante statistische Interaktion zwischen Position und Zustand zeigt.
3. Es ergab sich auch ein signifikanter Gesamteffekt der Messposition für die Lästigkeitsurteile. Aufgrund der signifikanten Interaktion mit dem Faktor Maßnahme müssen diese Effekte allerdings mit Vorsicht interpretiert werden.
4. Die Unterschiede in den Lästigkeitsurteilen lassen sich sehr gut durch A-Pegel und Lautstärkepegel erklären. Die zusätzliche Verwendung der psychoakustischen Schärfe und auch Rauigkeit tragen zur besseren Erklärung bei.

Abschließend ist wichtig zu erwähnen, dass es sich bei den akustischen Daten um Emissionsmessungen handelte. Vor allem die Richtungsabhängigkeit kann sich durch Entfernung und auch durch Art der Aufstellung der Wärmepumpe verändern. Um die Richtungsabhängigkeit auch in größeren Entfernungen genauer zu untersuchen, wären Messungen in entsprechenden Situationen und weitere Wahrnehmungstests notwendig.

7.2.5 Literaturverzeichnis

- [1] M. Nilsson, M. Andehn und P. Lesna, „Evaluating roadside noise barriers using an annoyance-reduction criterion,“ *J. Acoust. Soc. Am*, Bd. 124, Nr. 6, pp. 3561-3567, 2008.
- [2] C. Kasess, T. Maly, P. Majdak und H. Waubke, „The relation between psychoacoustical factors and annoyance under different noise reduction conditions for railway noise,“ *J. Acoust. Soc. Am*, Bd. 141, pp. 3151-3163, 2017.
- [3] C. Kasess, T. Maly, W. Kluger-Eigl, E. Demmelmayr, H. Waubke, N. Ostermann und R. Blab, „Abschlussbericht Projekt "Lärmarme Rumpelstreifen",“ 2017.
- [4] S. Fldell, „Noise-Induced Annoyance,“ in *Handbook of Noise and Vibration Control*, Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, 2007, pp. 316-319.
- [5] G. Di, K. Lu und X. Shi, „An optimization study on listening experiments to improve the comparability of annoyance ratings of noise samples from different experimental sample sets,“ *Int J Environ Res Public Health*, Bd. 15, Nr. 3, 2018.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

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

- [6] D. Cabrera, S. Ferguson, F. Rizwi und E. Schubert, „PsySound3: software for acoustical and psychoacoustical analysis of sound recordings,“ in *Proceedings of the 13th International Conference on Auditory Display*, Montreal, Canada, 2007.
- [7] B. Glasberg und B. Moore, „Derivation of Auditory Filter Shapes from Notched Noise Data,“ *Hearing Research*, Bd. 47, pp. 103-137, 1990.
- [8] P. Daniel und R. Weber, „Psychoacoustical roughness: implementation of an optimized model,“ *Acustica*, Bd. 83, pp. 113-123, 1997.
- [9] E. Terhardt, G. Stoll and M. Seewan, "Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals," *J. Acoust. Soc. Am*, vol. 71, pp. 679-688, 1982.
- [10] J. Chalupper und H. Fastl, „Dynamic Loudness Model (DLM) for Normal and Hearing-Impaired Listeners,“ *Acta Acustica United with Acustica*, Bd. 88, pp. 378-386, 2002.
- [11] R Core Team, „R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing,“ 2018.
- [12] M. Lawrence, „Easy Analysis and Visualization of Factorial Experiments. R package version 4.4-0.,“ 2016.
- [13] H. Keselman, „Testing treatment effects in repeated measures designs: An update for psychophysiological researchers,“ *Psychophys.*, Bd. 35, p. 470–478, 1998.
- [14] H. Keselman, J. Keselman und J. Shaffer, „Multiple pair-wise comparisons of repeated measures means under violation of multi-sample sphericity,“ *Psychol. Bull.*, Bd. 110, p. 162–170.
- [15] W. Venables und B. Ripley, *Modern Applied Statistics with S*. Fourth Edition, New York: Springer, 2002.
- [16] G. Schwarz, „Estimating the dimension of a model,“ *Annals of Statistics*, Bd. 6, Nr. 2, p. 461–464, 1978.
- [17] S. Greenhouse und S. Geisser, „On methods in the analysis of profile data,“ *Psychometrika*, Bd. 24, pp. 95-112, 1959.

8 Kontaktdaten

DI Dr. Christoph Reichl

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Giefinggasse 4

1210 Wien

Tel.: +43 50550 6605

Fax: +43 50550 6679

E-Mail: Christoph.Reichl@ait.ac.at

www.ait.ac.at

<https://www.ait.ac.at/themen/sustainable-thermal-energy-systems/projects/silentairhp/>