

# SilentAirHP - Analyse und Entwicklung von Schallreduktionsverfahren für Luft-Wasser-Wärmepumpen

Christoph Reichl<sup>1</sup>, Johann Emhofer<sup>1</sup>, Peter Wimberger<sup>1,2</sup>, Norbert Schmiedbauer<sup>1,2</sup>, Felix Linhardt<sup>1,2</sup>  
 Elisabeth Wasinger<sup>1</sup>, Christian Köfinger<sup>1</sup>, Thomas Fleckl<sup>1</sup>

<sup>1</sup> AIT Austrian Institute of Technology, Center for Energy, E-Mail: [christoph.reichl@ait.ac.at](mailto:christoph.reichl@ait.ac.at)

<sup>2</sup> TU Wien, Institut für Angewandte Physik

## Einleitung

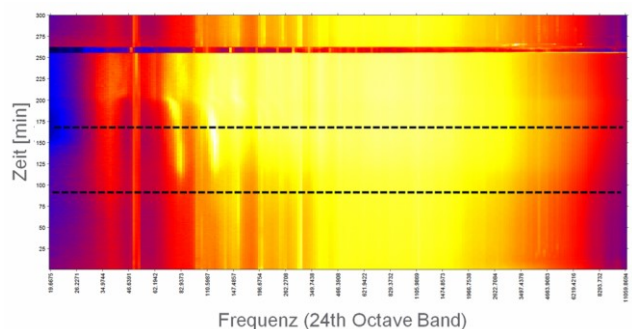
Luft-Wasser-Wärmepumpen werden immer häufiger für Heizen und Kühlen eingesetzt. Ihren Vorteilen des geringen Platzbedarfs und der niedrigen Investitionskosten steht – je nach Aufstellung und Typ der Installation – die Geräuschentwicklung der Systeme entgegen. Dabei kann es bei transienten Prozessen (zunehmende Vereisung, Enteisungsmaßnahmen) zu auffällenden Emissionen kommen. Das österreichische Forschungsprojekt SilentAirHP zielt darauf ab, fortschrittliche numerische und experimentelle Methoden zur quantitativen Bewertung schallreduzierender Maßnahmen für diese Wärmepumpen zu entwickeln. Die Analysen basieren auf orts-, frequenz-, und zeitaufgelösten 64 Kanal Schalldruckdaten mit einem zylindrischen akustischen Messgitter (acoustic dome) sowie auf Messdaten einer akustischen Kamera in Kombination mit einer Thermokamera zur temperaturabhängigen Visualisierung der Schallquellen. Dazu wird ein Wärmepumpenprototyp mit austauschbaren Komponenten und Schallreduktionsmaßnahmen aufgebaut. Neben passiven Maßnahmen kommt dabei auch Active Noise Cancelling zum Einsatz. Die Messergebnisse werden in Folge mit Schallausbreitungsmodellen verknüpft, die den Einfluss der Platzierung von Wärmepumpen in einem Siedlungsgebiet auf die Schalldrücke an sensiblen Wohnbereichen in Gebäuden unter Berücksichtigung psychoakustischer Größen analysieren. Abschließend wird der Annex 51 "Acoustic Signatures of Heat Pumps" des Heat Pump Programms der International Energie Agentur vorgestellt.

## Akustik in Wärmepumpen

Luft-Wasser-Wärmepumpen werden meist in Split-Ausführung aufgestellt. Während der Ventilator immer in der Außeneinheit positioniert ist, kann der Kompressor je nach Bauweise in der Innen- oder Außeneinheit eingebaut sein. Typische akustische Quellen stammen von Schwingungen von Komponenten, die sich auf die Außenflächen der Wärmepumpeneinheit übertragen, welche dann Schallwellen abstrahlen. Diese können durch mechanische Entkopplung und Absorption verringert werden. Der Ventilator und die dadurch getriebene Strömungen sind dipolare Schallquellen (Oberflächendruckfluktuationen an exponierten scharfen Kanten) sowie quadrupolare Quellen (turbulente Strömungsfluktuationen im Strömungsvolumen). In allen Fällen gilt, dass der Schall so nahe wie möglich an seinem Entstehungsort bekämpft werden sollte. Dies gelingt zum

Beispiel durch eine optimierte Luftführung im Bereich zwischen Wärmetauscher und Ventilator.

Zusätzlich zu den typischen Dauergeräuschen von Wärmepumpen treten noch instationäre akustische Ereignisse auf. Während der Vereisung des Wärmetauschers bei bestimmten Klimabedingungen und Betriebsmodi der Wärmepumpe kann es bei bestimmten Bauarten neben einem Anstieg des Schalldruckpegels auch zum sukzessiven Auftreten tonaler Komponenten kommen (siehe Abbildung 1).

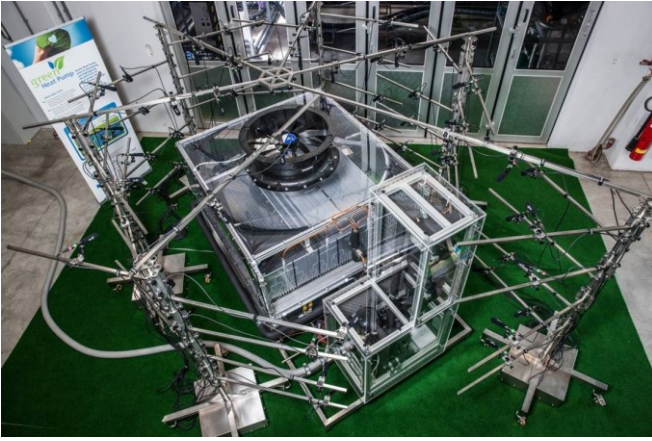


**Abbildung 1:** Veränderung des spektralen Inhalts des akustischen Spektrums während zunehmender Vereisung des Wärmetauschers. Im Zeitbereich zwischen den beiden horizontalen gestrichelten Linien steigt der Schalldruckpegel um 8 dB(A).

## Messmethoden

Im Rahmen des SilentAirHP – Projektes wird eine Versuchswärmepumpe akustisch charakterisiert. Um sowohl das stationäre Verhalten als auch transiente Vorgänge (z.B. Vereisungszyklen, siehe auch Abbildung 1) mit ihrer Richtungsabhängigkeit erfassen zu können, wird ein akustischer Dome in Form eines Zylinder (siehe Abbildung 2) um die Wärmepumpe positioniert. Die simultane Messung von 64 Mikrofonen ermöglicht dann nicht nur eine Bestimmung des Schalleistungspegels sondern auch eine Erfassung der Richtungsabhängigkeit. Beide Auswertungen erlauben eine Charakterisierung des zeitlichen Verhaltens während transients Vorgänge wie Änderungen während Vereisungszyklen, dem Hochlauf von Komponenten oder Schallereignissen, die durch Schaltvorgänge ausgelöst werden.

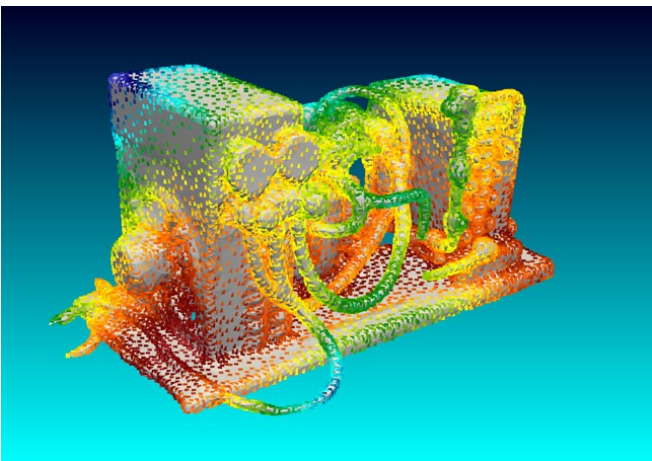
Mit Hilfe einer akustischen Kamera (ringförmige Bauart mit 64 Mikrofonen) kann auf die frequenzaufgelöste Schallquellverteilung mittels Beamforming [1], [2] rückgerechnet werden (siehe Abbildung 3).



**Abbildung 2:** Die zylinderförmige Platzierung von 64 Mikrofonen im akustischen Dome rund um Green HP ermöglicht durch die simultane Messung eine Bestimmung sowohl des Schallleistungspegels als auch der Abstrahlungscharakteristik über längere Zeiträume hinweg.

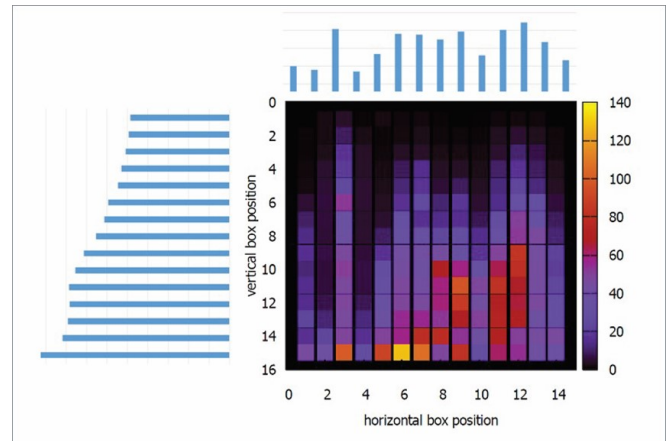
Während der zunehmenden Vereisung des Wärmeübertragers kann es auch zu einer Änderung der Eigenschaften der Strömung im Bereich des Ventilators kommen. So wurde zunächst ein gleichzeitiger Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit und des Turbulenzgrades beobachtet. Darauf folgte eine Phase steigender Turbulenz bei sich reduzierender Strömungsgeschwindigkeit, die durch die sukzessive Blockade des Wärmeübertragers hervorgerufen wurde. Nach Verringerung von Geschwindigkeit und Turbulenz in der finalen Phase der Vereisung kehrt das System während der Abtauung in den Ursprungszustand zurück.

Im Falle der GreenHP [3], die mit einem horizontalen Verdampfer ausgeführt ist, kann durch die Wägung des Wassers, das bei der Abtauung nach unten tropft, eine orts aufgelöste Bestimmung der Eismenge erfolgen (siehe Abbildung 4).



**Abbildung 3:** Visualisierung der akustischen Quellverteilung auf einer Schaltungswärmepumpe bei einer Frequenz von 1250 Hz. Die Daten stammen aus einer „Fotographie“ mit einer akustischen Kamera (64 Mikrofon-Ring).

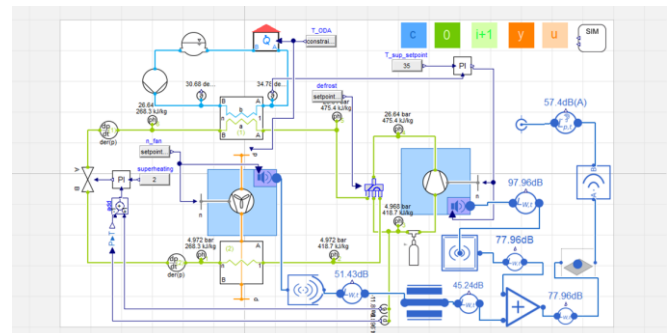
Eine horizontale Summenbildung über die verschiedenen Kältemittelstränge zeigt, das Eis sich vermehrt beim Eintritt des Kältemittels bildet. Eine Summenbildung entlang der einzelnen Kältestränge zeigt eine Asymmetrie, die ihre Ursache in einer ungleichmäßigen Beaufschlagung der einzelnen Leitungen hat, da eine gleichmäßige Strömungsverteilung über den Wärmeübertrager gemessen wurde.



**Abbildung 4:** Visualisierung der aggregierten Eismenge am Wärmetauscher mit horizontaler Montierung (Kältemittelstrom von unten nach oben) durch Wägung des Wassers nach der Abtauung. Die horizontalen Balken auf der linken Seite zeigen den typischerweise erhöhten Eisansatz bei der Kältemittelzufuhr (unten); die vertikalen Balken sind ein Indiz für eine ungleichmäßige Verteilung des Kältemittels.

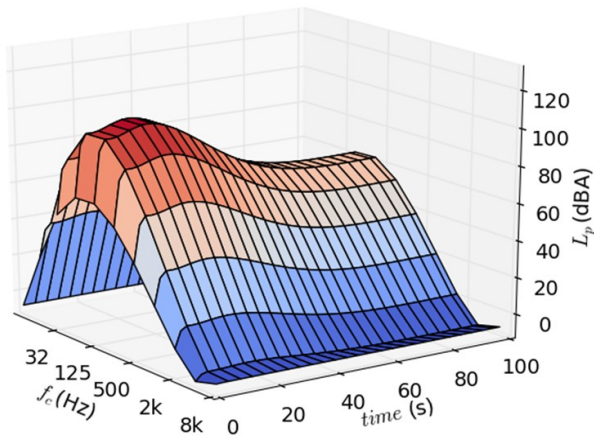
## Simulationstechniken

Eine Modelica Bibliothek zur Beschreibung der thermodynamischen Vorgänge in der Wärmepumpe wurde um akustische Parameter erweitert (siehe Abbildung 5). Damit ist das Modell in der Lage, akustische Vorhersagen zu treffen und akustische Zielgrößen in Optimierungsalgorithmen mit einzubeziehen. Die Bibliothek [4] wird im Rahmen der Modelica License 2 frei verfügbar sein.



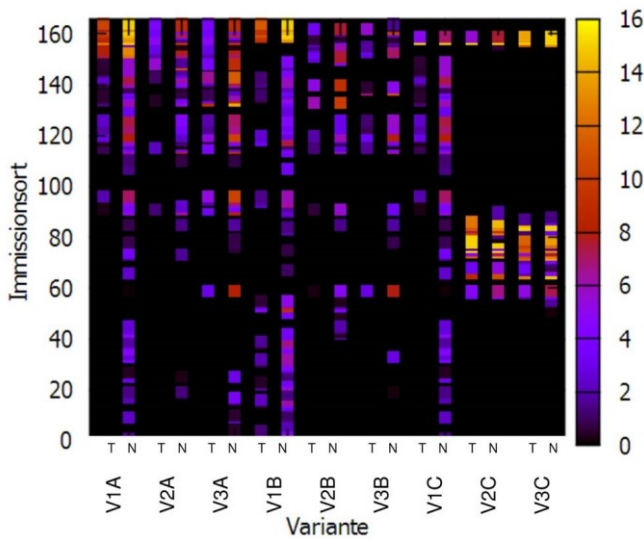
**Abbildung 5:** Um akustische Parameter erweitertes Modelica Modell einer Luft-Wasser-Wärmepumpe. Das Modell ist frei verfügbar unter Modelica License 2.

Mit Hilfe der Modelica Bibliothek kann exemplarisch der Schallleistungspegel während des Hochlaufs einer Wärmepumpe berechnet werden (siehe Abbildung 6). In der Simulation stehen neben den akustischen Daten aber auch alle thermodynamischen Prozessparameter als Funktion der Zeit zur Verfügung.



**Abbildung 6:** Schallleistungspegel während des Hochlaufs einer Wärmepumpe in einem Abstand von 10m.

Neben der Berechnung der akustischen Eigenschaften von Wärmepumpen kommt aber auch der Simulation der Schallausbreitung hin zu schützenswerten Positionen (Fenster und Türen bei Nachbargrundstücken) eine immer größere Bedeutung zu. Nach Definition der Immissionspunkte einer kleinen Wohnhaussiedlung wurden unterschiedliche Wärmepumpenanordnungsszenarien durchgerechnet. Abbildung 7 zeigt Strafpunkte aufgrund Überschreitung der zulässigen Immissionswerte für die unterschiedlichen Varianten an den einzelnen Monitorpunkten.

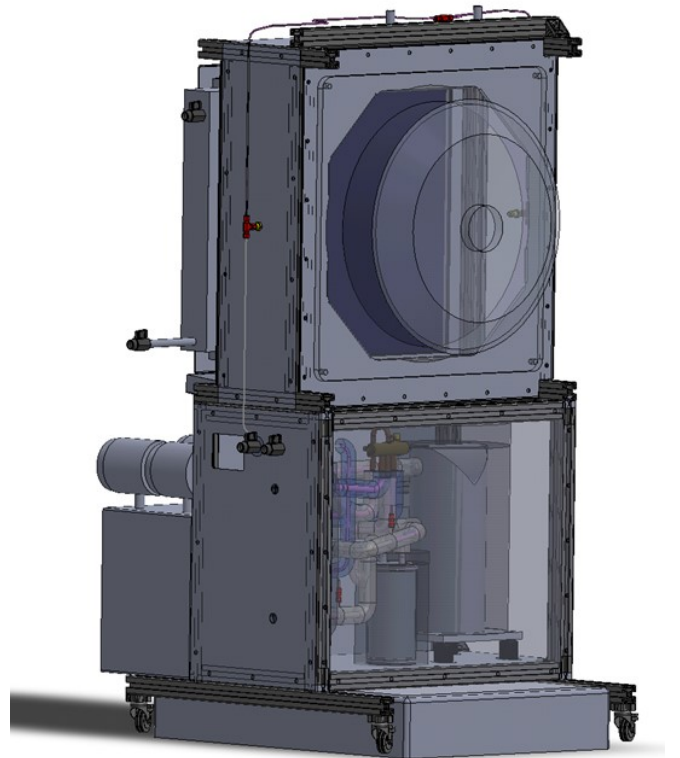


**Abbildung 7:** Strafpunkte wegen Überschreitung des erlaubten Schalldruckpegels an den unterschiedlichen Immissionsorten für verschiedene Wärmepumpenaufstellungsszenarien

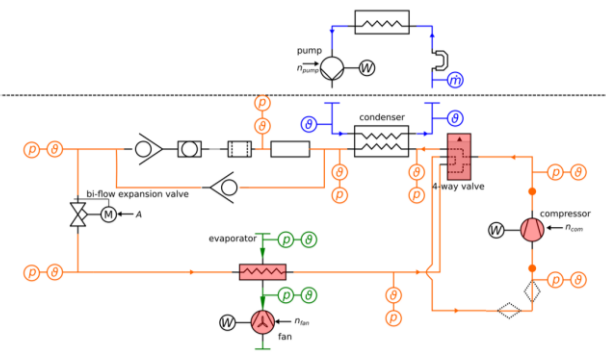
Mit Hilfe der Simulationen kann eine optimale Positionierung der Wärmepumpen sowie eine Berechnung der Wirkung von Schalldämm-Maßnahmen durchgeführt werden. Zusammenfassend zeigten die Simulationen in der Test-Wohnhausanlage, dass eine Reduktion der Schallleistung der verwendeten Wärmepumpe um einige dB ausreicht, um zusammen mit einigen Kapselungsmaßnahmen, akzeptable Komfortbedingungen zu schaffen.

### Design der SilentAirHP

Die Luftwasser-Wärmepumpe SilentAirHP (siehe Abbildung 8) wurde mittels Simulation ausgelegt (siehe Schematik in Abbildung 9). Im Design-Punkt A2W35 wurde die Leistung mit 5kW festgelegt, Ventilator und Kompressor sind drehzahleregelt und das Expansionsventil ist elektronisch kontrollierbar. Als Kältemittel kommt R410A zum Einsatz. Die Wärmepumpe ist mit einer Vielzahl von Temperatur-, Druck- und Massenstromsensoren ausgestattet. Die Wärmepumpe (Systemzeichnung siehe Abbildung 9) ist auf einer Waage positioniert. Dadurch ist es möglich, die Gewichtszunahme des Systems durch die Vereisung während des Betriebs mitaufzuzeichnen. Die wesentlichen Komponenten, wie Verdampfer, Ventilator und Kompressor können einfach ausgetauscht werden. Zusätzlich lassen sich unterschiedliche Schallreduktionsmaßnahmen umsetzen.



**Abbildung 8:** Systemzeichnung der modular aufgebauten SilentAirHP. Die wesentlichen Komponenten, wie Verdampfer, Ventilator und Kompressor können einfach ausgetauscht werden. Zusätzlich lassen sich unterschiedliche Schallreduktionsmaßnahmen umsetzen.



**Abbildung 9:** System Schematik der SilentAirHP. Die Positionen der Mess-Sensoren für Temperatur, Druck und Massenstrom sind jeweils an die Verbindungsleitungen angehängt.

## IEA HPT Annex 51 – Acoustic Signatures of Heat Pumps

Im Rahmen der Technologie Kollaborations-Plattformen der Internationalen Energie Agentur (siehe Abbildung 10) wurde im Wärmepumpen-Sektor ein Annex zum Thema „Akustische Signaturen von Wärmepumpen“ initiiert. Er hat das Ziel, die Akzeptanz von Luft-Wasser-Wärmepumpen weiter zu erhöhen und Barrieren abzubauen. Die Arbeiten starten im April 2017 als IEA HPT Annex 51, das Kickoff-Meeting findet am 20.-21.06.2017 in Wien statt [5]. Neben einem Überblick über Schall von Komponenten und Systemen liegt ein wesentlicher Fokus auf dem Einfluss des Betriebspunktes auf die akustischen Eigenschaften sowie auf der korrekten Installation und dem damit verbundenen Effekt auf die unmittelbare Umgebung.



**Abbildung 10:** Der Annex 51 “Acoustic Signatures of Heat Pumps” ist im Wärmepumpen-Sektor (HPT) der Gebäude Technologie-Kollaborations-Plattformen (TCP’s) der Internationalen Energie Agentur (IEA) angesiedelt.

## Zusammenfassung und nächste Schritte

Das Projekt „SilentAirHP“ fokussiert auf die akustischen Eigenschaften von Luft-Wasser-Wärmepumpen. Für die Charakterisierung stationärer und transienter Betriebszustände (z.B. Systemstart, Vereisung und Abtauung) kommen fortgeschrittene akustische Verfahren zum Einsatz, die auch weiter verfeinert werden. Die üblicherweise durchgeführten Systemsimulationen wurden mit akustischen Parametern ergänzt und eine Modelica Bibliothek erstellt, mit deren Hilfe eine gemeinsame Betrachtung von Energieeffizienz und akustischer Emission möglich ist. Schallausbreitungsrechnungen in Wohngebieten sind ebenfalls ein wesentlicher Aspekt einer ganzheitlichen Systembetrachtung. Damit ist eine Untersuchung unterschiedlicher Aufstellungsszenarien sowie eine Berechnung notwendiger Schallreduktionsmaßnahmen möglich. Die dafür nötigen Parameter lassen sich aus den Messungen in den Klimakammern extrahieren.

Der IEA HPT Annex 51 „Acoustic Signatures of Heat Pumps“ wurde initiiert, um die Akzeptanz der Luft-Wasser-Wärmepumpen Technologie in den nächsten Jahren noch weiter zu erhöhen.

## Danksagung

Das Projekt SilentAirHP wird im Rahmen des Energieforschungsprogramms des Klimaenergiefonds (5148527) in einer Initiative des österreichischen Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie gefördert.

## Literatur

- [1] P. Lipar, J. Prezelj, M. Cudina, Algorithm for acoustic camera with post processing analysis. In 2011 19<sup>th</sup> telecommunication forum (TELFOR) proceedings of papers. Institute of Electrical & Electronics Engineers (IEEE), November 2011
- [2] W. Nie, D. Feng, H. Xie, J. Lie, P. Xu, Improved MUSIC algorithm for high resolution angle estimation. Signal processing 122: 87-92, May 2016
- [3] Horizon 2020 EU project GreenHP: <http://www.greenhp.eu>
- [4] J. Emhofer, R. Zitzenbacher, Ch. Reichl, Sound Source Extension Library for Modelica, 12th International Modelica Conference, May 15<sup>th</sup>-17<sup>th</sup>, Prag, 2017
- [5] <http://heatpumpingtechnologies.org/annex51/>