

Aktive Störschallunterdrückung für Wärmepumpenanwendungen

Norbert Schmiedbauer^{1,2}, Johann Emhofer¹, Christian Köfinger¹, Peter Wimberger^{1,2}, Thomas Fleckl¹,
Martin Gröschl² und Christoph Reichl¹

¹ AIT Austrian Institute of Technology, Center for Energy, E-Mail: norbert.schmiedbauer.fl@ait.ac.at

² TU Wien, Institut für Angewandte Physik

Einleitung

Aktive Störschallunterdrückung (Active Noise Cancelling, ANC) wird im Rahmen des Forschungsprojektes SilentAirHP als eine Möglichkeit untersucht, die Geräusentwicklung von Luft-Wasser-Wärmepumpen-Systemen zu verringern beziehungsweise zu verändern. Diese Methode wird in Kopfhörern, aber auch in der Flugzeug- und Automobilindustrie erfolgreich eingesetzt. Aufgrund der Verfügbarkeit schneller Prozessoren ist eine Beeinflussung des Schallspektrums durch Einbau von Lautsprechern und Berechnung von Gegenschallsignalen möglich. Die Signalauslöschung ist dabei nicht perfekt und hängt zusätzlich vom Ort des Beobachters ab. Während die Methode in langen Kanälen, die eine näherungsweise eindimensionale Schallausbreitung ermöglichen, gute Schallreduktion zeigt, ist die Anwendung in größeren Volumina mit mehrdimensionaler Schallausbreitungscharakteristik schwierig [1]. Aufgrund baulicher Restriktionen sind derartige Szenarien in der Realität aber nur schwer vermeidbar. Im Rahmen der Arbeit werden unterschiedliche Optionen vorgestellt und analysiert, ANC für Wärmepumpen zu realisieren.

Prinzip

Als Grundaufbau für alle folgenden Experimente wird das Aufbauprinzip gemäß Abb. 1 verfolgt.



Abbildung 1: Prinzipaufbau der ANC Experimente zur Anwendung an Wärmepumpentechnologien: Als Störschallquelle fungiert ein Ventilator, als Aufnehmer des Referenzsignals ein Mikrofon unter einem Windschutz und als Gegenschallquelle ein Lautsprecher.

Als Quelle für den Störschall wird ein Ventilator herangezogen. Direkt danach ist ein Mikrofon positioniert, welches den Schall des Ventilators aufnimmt und zur Recheneinheit überträgt, wo das Signal phasenumgekehrt wird. Im Zuge des, im Vorfeld durchgeführten, Kalibrationsprozesses wird die Zeitdifferenz berechnet, mit der der Gegenschall zu emittieren ist. Dies ist notwendig um eine bestmögliche destruktive Interferenz der beiden Schallsignale zu erreichen um dadurch den lokal herrschenden Schalldruckpegel zu minimieren.

Messkonstruktionen

Die Messdatenerfassung erfolgt über Klasse I Messmikrofone, welche die Signale über einen Vorverstärker mittels MADI an eine Soundkarte in einen PC transferieren. Auf diese Art und Weise sind Samplingraten bis zu 192kHz möglich.



Abbildung 2: Aufbau zur Messung der Winkelabhängigkeit des Active Noise Cancelling-Effekts: Das Messobjekt wird in der Mitte eines Halbkreises aus 16 Messmikrofonen, welche paarweise mit dem Nachbarn immer den selben Winkel einschließen und äquidistant zum Zentrum aufgestellt sind, positioniert. Die Ventilatorachse befindet sich in der Mikrofonebene.

Zur Erfassung der Messgrößen, die zur Quantifizierung des ANC-Effektes beitragen, wurden zwei verschiedene Messkonstruktionen gewählt. Zunächst wurden die Experimente in der Mitte eines Halbkreises aus 16 Messmikrofonen positioniert (Siehe Abb. 2). Messungen in dieser Anordnung geben Aufschluss über die Winkelabhängigkeit der Effekte in einer Ebene, die durch aktive Störschallunterdrückung auftreten. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Schallquelle punktförmig ist und im Zentrum des Halbkreises situiert ist.

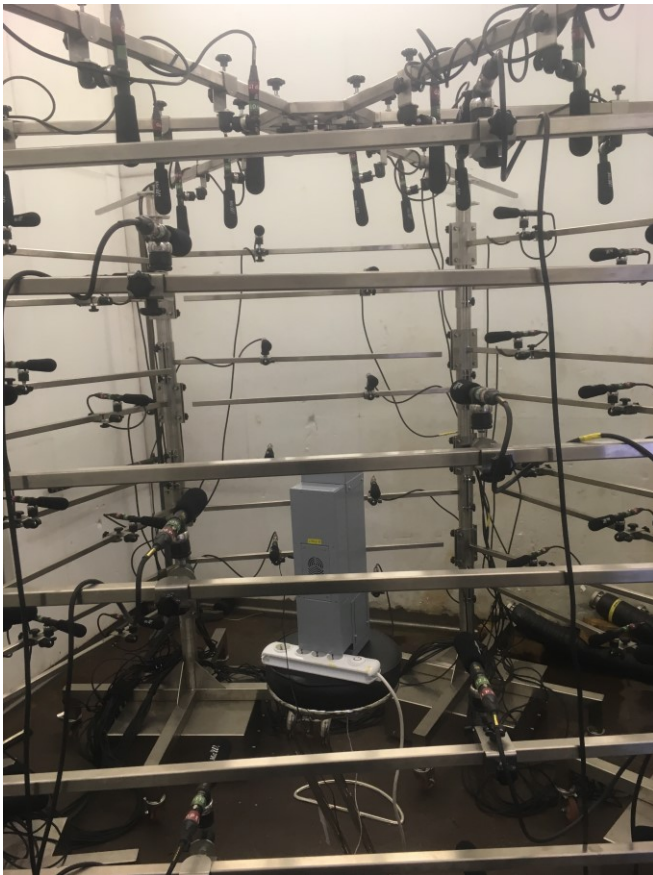


Abbildung 3: Aufbau zur Messung der Raumwinkelabhängigkeit des Active Noise Cancelling-Effektes: Hier wird das Messobjekt in der Mitte eines Domes aus 64, quasi-statistisch verteilten, Messmikrofonen positioniert.

Der zweite Messaufbau besteht aus 64 Messmikrofonen, die quasi-statistisch (da jede Position wohldefiniert und ausgemessen ist) auf einem Gestänge rund um das Messobjekt verteilt sind (Siehe Abb. 3). Mit dieser Anordnung ist es möglich, Aussagen über die Winkelabhängigkeit der herrschenden Schalldruckpegeldifferenzen zwischen ein- und ausgeschaltetem ANC in alle Raumrichtungen zu treffen.

Referenzexperiment

Als Referenzexperiment wurde ein kommerzielles Produkt verwendet, welches zur Demonstration von Active Noise Cancelling Experimenten verwendet wird. Dieses Produkt hat einen Kanaldurchmesser von 90mm und (Siehe Abb. 4a) arbeitet nicht nur in die Richtung, in die der Ventilator den Luftstrom erzeugt, sondern besitzt den Aufbau gemäß Abb. 1 auf beiden Seiten des Ventilators. Dies führt zu einer Schallreduktion sowohl an der Auslass- als auch an der Ansaugöffnung des Lüftungskanals. In Abb. 4b sind die Messergebnisse dieses Objektes – vermessen gemäß Abb. 2 – dargestellt. Diese zeigen, dass Reduktionen des A-bewerteten Schalldruckpegels von bis zu 10dB möglich sind.

Adaptierung des Referenzexperimentes

Um aus dem oben genannten Experiment ein wärmepumpenähnliches Experiment zu generieren, wurde eine Seite des beidseitig geöffneten Kanals zum Teil

verschlossen (Siehe Abb. 5a), was einen Druckverlust hervorrufen – also einen Wärmetauscher simulieren – soll.

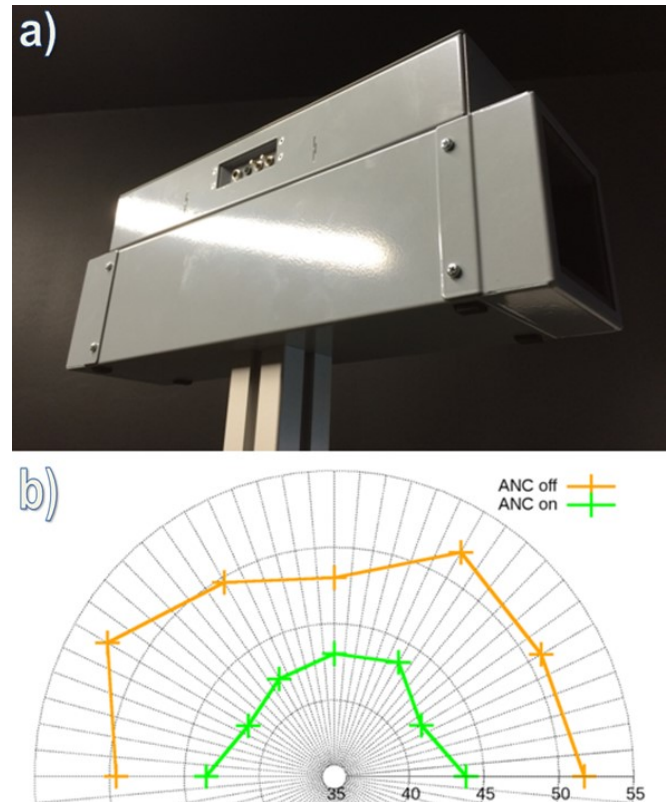


Abbildung 4: a) Demonstrationsaufbau zur Veranschaulichung und Zielsetzung für die ANC Experimente für Wärmepumpenanwendungen; b) Messergebnisse des Referenzexperimentes zum Vergleich der Schalldrücke mit ANC und ohne ANC: Radial ist der A-bewertete Schalldruckpegel in dB aufgetragen, im Azimut die Mikrofonposition.

Darüber hinaus wurde die Seite mit der Ansaugöffnung nicht mehr mittels ANC behandelt, da sich diese Seite in den meisten Fällen einer Wand zugewandt befindet. Eine Messung wurde nach der Kalibration dieser Anordnung durchgeführt und brachte vielversprechende Ergebnisse. Die Messung des Objektes gemäß Abb.2 zeigt auf, dass durch das Zuschalten von ANC der A-bewertete Schalldruckpegel um bis zu 8dB verringert wird (Siehe Abb. 5b). Dies funktioniert jedoch nur im Halbraum vor der Auslassöffnung des Kanals. Sobald man sich senkrecht zur Ventilatorachse befindet und weiter in Richtung Ansaugöffnung bewegt, weist Active Noise Cancelling keinen Effekt mehr auf.

Die Messung im Dome (Siehe Abb. 5c) zeigt unter anderem auch auf, dass die Charakteristik der Funktion von ANC im Halbraum vor der Auslassöffnung vorhanden ist. Das Objekt wurde gemäß Abb. 3 gemessen. Es steht aufrecht auf der verschlossenen Seite mit der Auslassöffnung nach oben. Bei genauerer Betrachtung von Abb. 5c. ist zu erkennen, dass im Bereich oberhalb des Kanals der Effekt deutlich auftritt. Dies sieht man anhand der Reduktion des A-bewerteten Schalldruckpegels um bis zu 8dB bei den zwölf Mikrofonen direkt über der Anordnung. Jedoch verliert sich der Effekt auf der Höhe der Schallquelle und gleicht sich den Pegeln der Messung ohne ANC an.

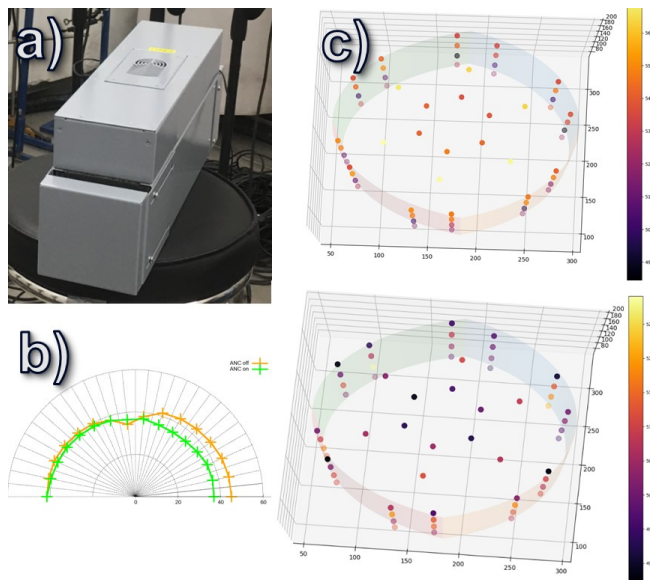


Abbildung 5: a) adaptierter Demonstrationsaufbau: Eine Seite der beiden offenen Seiten wurde teilweise verschlossen um einen Wärmetauscher zu imitieren; b) Messergebnisse zum Vergleich der Schalldrücke mit ANC und ohne ANC: Radial ist der A-bewertete Schalldruckpegel in dB aufgetragen, im Azimut die Mikrofonposition; c) Messergebnisse der Messung im Dome: Kartesische Koordinaten geben die Mikrofonpositionen an und die Farbskala die A-bewerteten Schalldruckpegel in dB mit ANC (oben) und ohne ANC (unten).

Vergrößerung der Störschallquelle

Nach den positiven Ergebnissen des adaptierten Referenzexperimentes wurde als nächster Schritt die Vergrößerung des Ventilators gewählt, um in die Nähe der Dimensionen gebräuchlicher Luft-Wasser-Wärmepumpen zu gelangen. Dafür wurde ein Ventilator gewählt, welcher einen Durchmesser von 300mm hat und an ein Rohr angekoppelt ist. Die Länge des Rohres ist dabei proportional zum vorangehenden Experiment. Zunächst wurde als Gegenschallquelle lediglich ein Lautsprecher verwendet. Nachdem die Messergebnisse dieser Anordnung nicht zufriedenstellend waren (Reduktion des A-bewerteten Schalldruckpegels bis maximal 1dB) wurden zur Homogenisierung des Gegenschallfeldes zuerst zwei Lautsprecher eingesetzt und in weiterer Folge acht Lautsprecher verwendet (Siehe Abb. 6) [2]. Die Pegelreduktion änderte sich jedoch dadurch nicht.



Abbildung 6: Aufbau des ANC-Experimentes in einem Rohr mit 300mm Durchmesser in den Varianten mit zwei (links) beziehungsweise acht (rechts) Gegenschallquellen.

Zerlegung des Störschalls

Aufgrund von Symmetrieüberlegungen (5-flügeliger Ventilator) und den Ergebnissen von Active Noise Cancelling Experimenten bei Rohrdurchmessern im Bereich von 10cm, wurde ein neuer Aufbau konstruiert. Dieser spaltet den Rohrdurchmesser von 300mm auf fünf Rohre mit einem Durchmesser von jeweils 100mm (Siehe Abb. 7, links). Ziel dieser Anordnung war es, dass in allen Kanälen äquivalente Schallfelder herrschen, welche durch Aufnahme eines einzigen Referenzsignals mit je einem Lautsprecher pro Kanal ausgelöscht werden können.



Abbildung 7: Aufbau zur Aufteilung des Störschalls auf fünf Rohre (links) und eingebauter Luftstromlinearisierer (rechts).

Bei einem Versuch der Kalibrierung eines einzelnen Kanals dieser Anordnung zeigten das Referenzmikrofon und das – nur zur Kalibrierung notwendige – Fehlermikrofon eine Signalkorrelation von weniger als 1% auf. Dies bedeutet, dass zumindest eines der beiden Mikrofone, trotz Windschutz, von der Luftströmung beeinflusst wird. Aufgrund dieser Störung war es nicht möglich die Kalibrierung abzuschließen, weshalb ein Objekt eingebaut wurde, welches die Turbulenz aus dem Luftstrom entfernen sollte (Siehe Abb. 7, rechts). Beim der erneuten Kalibrierung des ANC-Tools mit dem strömungsoptimierten Aufbau wurde eine Korrelation von mehr als 80% festgestellt, was einem sehr zufriedenstellenden Ergebnis entspricht. Dies zog jedoch einen Druckverlust des Ventilators nach sich, welcher für Wärmepumpenanwendungen nicht vertretbar ist.

Optimierung der Anordnung

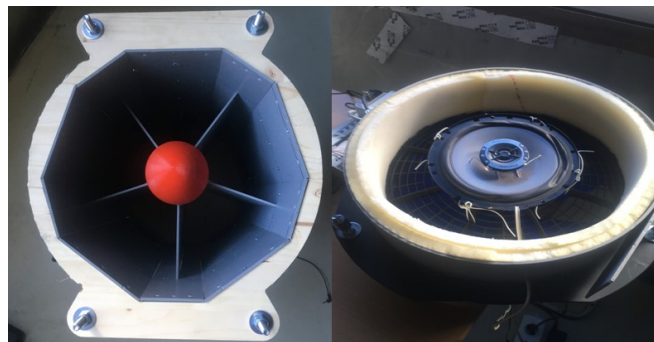


Abbildung 8: Optimierter Aufbau zur Minimierung des Druckverlustes und des Luftströmungsturbulenzgrades (links) und Position des Lautsprechers, der das Geräusch des Ventilators wiedergibt, um Problem der Turbulenzen im Luftstrom zu umgehen (rechts).

Zur Optimierung wurde ein neuer Aufbau kreiert, welcher aufgrund des Querschnittsverlustes ohne Dämpfermaterial in den einzelnen Kanälen und mit minimalen Wandstärken ausgeführt wurde (Siehe Abb. 8, links). Darüber hinaus wurden alle Oberflächen glatt gestaltet und ein stromlinienförmiges Element am Punkt der Aufspaltung in die einzelnen Kanäle angebracht, um alle Möglichkeiten der Entstehung von Luftturbulenzen nach dem Ventilator zu unterbinden. Durch Tests dieser Anordnung zeigte sich, dass nach wie vor Luftturbulenzen herrschen, welche vom Ventilator direkt erzeugt werden, was den Einsatz von Active Noise Control unmöglich macht.

Deshalb wurde zunächst folgende These getestet: Es ist möglich, durch Aufteilung des Schalls, mittels Messung eines Referenzsignals in nur einem Kanal, die Schallfelder in allen Kanälen gleich bekämpfen zu können. Dafür wurde eine Anordnung kreiert, die Anstelle des Ventilators einen Lautsprecher hat, der das Signal des Ventilators wiedergibt (Ventilatorsimulator). Hierbei hat jeder Kanal einen eigenen Lautsprecher zur Erzeugung des Gegenschalls. (Siehe Abb. 8, rechts). Aufgrund dieser Adaptierung lässt sich dieser Aufbau ohne entstehende Luftverwirbelungen untersuchen.

Messergebnisse Ventilatorsimulator

Zur Untersuchung des ANC-Effektes wurde jeder der fünf Kanäle einmal mit ein- und einmal mit ausgeschaltetem ANC gemessen.

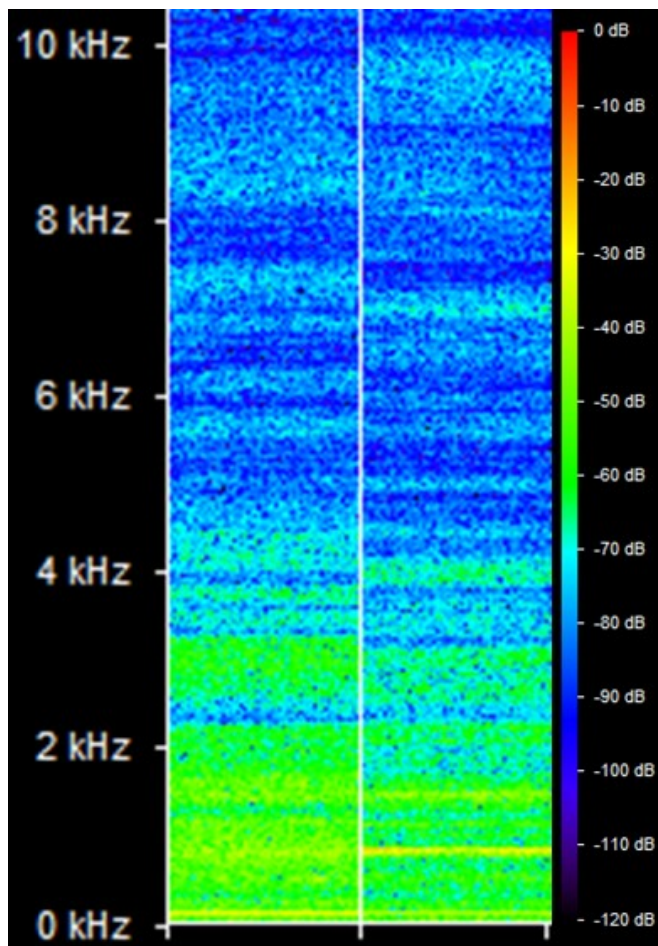


Abbildung 9: Frequenzspektrum von einem der fünf Kanäle ohne ANC (links) und mit ANC (rechts) [3]

Die Messungen wurden mit einem einzelnen Messmikrofon durchgeführt, welches direkt am Ausgang des gemessenen Kanals positioniert ist.

In Abbildung 9 ist das Messergebnis eines einzelnen Kanals dargestellt, wobei die aktive Störschallunterdrückung links ein- und rechts ausgeschaltet ist. Man sieht, dass es für Frequenzen von 0 Hz bis 4 kHz überwiegend zu einer Reduktion des Schalldruckpegels kommt, jedoch finden sich darin auch schmale Frequenzbänder (bei zirka 1 kHz und bei zirka 1,5 kHz), wo es zu einer Erhöhung des Schalldruckpegels kommt.

Zusammenfassung

Dieses Experiment zeigt, dass es möglich ist, eine Schallquelle in mehrere separate Kanäle aufzuteilen, und jedes dieser Schallfelder durch die Messung eines Referenzsignals in nur einem Kanal mittels Active Noise Cancelling zu behandeln. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass jeder Kanal einen separaten Lautsprecher benötigt.

Weiters zeigt sich, dass sehr viele Parameter auf die Qualität der aktiven Störschallunterdrückung haben:

- Größe und Geometrie der Schallquelle
- Schalldruckpegel der Quelle
- Oberflächenbeschaffenheit der Kanäle
- Luftgeschwindigkeit und –turbulenzgrad

Als nächste Schritte für dieses Projekt wird geplant, Mikrofone zu verwenden, welche unempfindlicher gegenüber Luftströmungen und –turbulenzen sind und die Geometrien der Experimente weiter gemäß der oben genannten Punkte zu optimieren. Als letzter Schritt ist vorgesehen, ein neues ANC-Modul auf Basis der gewonnen Erkenntnisse speziell auf die Anwendung in größeren Maßstäben zu entwickeln.

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] M. Möser, Technische Akustik. 8. Aufl.. Berlin Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2009
- [2] M.J. Crocker, Handbook of Noise and Vibration Control. New York: John Wiley & Sons, 2007
- [3] F.J. Harris, On the use of windows for harmonic analysis with the discrete fourier transform. Proceedings of the IEEE, 66(1):51-83, 1978