

# effsys EXPAND

Resurseffektiva kyl- och värmepumpssystem  
samt kyl- och värmelager

## **Metodutveckling – utvärdering av buller från värmepumpar**

Ola Gustafsson, Henrik Hellgren

Juli 2018

**RISE Research Institutes of Sweden**

## Förord

Detta projekt har genomförts på RISE Research Institutes of Sweden och är finansierat av Energimyndigheten genom forskningsprogrammet Effsys EXPAND. Deltagande företag, Thermia Värmepumpar (tidigare Danfoss AB), NIBE AB, Enertech, Bosch Termoteknik samt Villaägarnas Riksförbund har medfinansierat projektet. De deltagande företagen har bidragit både med kunskap, arbete som material till projektet. Vi vill tacka samtliga som deltagit och bidragit till resultaten i projektet, med finansiering såväl som med arbete, kunskap och material.

## Sammanfattning

Idag utvärderas värmepumpsbuller som en ljudeffektnivå mätt i en driftspunkt, men befintliga metoder ger en dålig bild av det faktiska bullret från värmepumpen. Utifrån energimärkningen inom EU kan konsumenten få en uppskattning av den årliga energibesparingen baserat på SCOP-värdet. Konsumenten bör dock även ha möjligheten att göra ett bra val för att minimera risken att påverka omgivningen pga störande buller. Projektets mål är att ta fram underlag och föreslå en förbättrad utvärderingsmetod och nyckeltal för att redovisa buller från värmepumpar. Detta skulle ge konsumenten en bättre vägledning, men skulle också gagna tillverkarna i deras produktutveckling. Industriaktörerna lyfter fram att en förbättrad metod på sikt leder utvecklingen mot tystare och mindre störande produkter. I ett längre perspektiv kan underlaget leda till ett energimärkningssystem som på ett så rättvist sätt som möjligt speglar den faktiska användningen av värmepumpen.

Värmepumpar av typerna luft/vatten, vätska/vatten och frånluft/vatten, totalt 17 st, har undersökts genom fält- och labbtester. Mätningarna har resulterat i en relativt tydlig bild över hur ljudet från olika typer av värmepumpar varierar över tid och vid olika lastfall. Denna information har sedan använts för att beräkna och föreslå en alternativ utvärderingsmetod samt ett nytt nyckeltal för att redovisa buller från värmepumpar.

Vi föreslår att bullermätningar av värmepumpar ska genomföras vid ett lastfall motsvarande 2°C utetemperatur enligt Europastandarden EN14825 (alternativt 7°C för luft/vattenvärmepumpar) denna driftspunkt bäst motsvarar det säsongsviktade bullret. Vi rekommenderar också att en maximal nivå ska mätas för att visa på hur bullernivån varierar samt för att kunna jämföra on/off och inverterstyrda värmepumpar på ett bättre sätt än med befintliga metoder.

## Summary

Today heat pump noise is evaluated as a sound power level measured in one operating point. Existing methods unfortunately give a poor image of the actual noise. From the energy label within the European Union, consumers can get an estimate of the annual energy savings based on a SCOP value. However; consumers should also be given the possibility to make an informed choice regarding the sound level, to minimize the risk of affecting the neighborhood by disturbing noise. The present project aims to develop and propose an improved method of evaluation and new indicators for declaration of noise from heat pumps. This would give consumers better guidance and also support the manufacturers in their product development. Industry participants emphasize that an improved approach has the potential to lead the trend towards quieter and less disturbing products. In a longer perspective, the improvements may lead to an energy labeling scheme that better reflect the actual use of the heat pump.

In this project 17 heat pumps of the types air/water, brine/water and exhaust air/water have been evaluated through field and laboratory measurements. The measurements have provided information of how the noise from heat pumps varies over time and at different operating conditions. This information has been used to suggest an alternative method for evaluation and as well as a proposal of a new indicator for heat pump noise.

We suggest that noise measurements should be performed at the operating condition representing an outdoor temperature of 2°C according to the European standard EN14825 (alternatively 7°C for air/water heat pumps). This operating condition is the one that best coincide with the season averaged noise. We also recommend that the maximal noise of the heat pump should be measured to show how the noise can vary and to be able to compare the noise from an on/off heat pump and an inverter controlled heat pump in a better way than with the current method.

# Innehåll

1	Bakgrund .....	5
2	Projektdeltagare.....	7
3	Mål.....	8
3.1	Avgränsningar .....	8
4	Genomförande.....	10
4.1	Datainsamling .....	10
4.2	Lyssningsförsök .....	11
4.3	Analys och metodutveckling.....	12
5	Resultat och diskussion .....	13
5.1	Generell information om ljudnivå från värmepumpar.....	13
5.2	Ljudnivå hos befintliga installationer.....	14
5.3	Ljudnivå hos värmepumpar på marknaden .....	17
5.4	Ljud vid tappvarmvattenproduktion .....	25
5.5	Säsongsviktade ljudtal .....	27
6	Föreslagen mät- och utvärderingsmetodik av värmepumpsbuller .....	31
7	Slutsatser.....	33
8	Förslag på fortsatt arbete.....	34
	Referenser .....	35
	Projektets vetenskapliga publikationer .....	36
	Projektets populärvetenskapliga publikationer och presentationer.....	36

Appendix 1: Multidimensional scaling of experiences from geothermal heat pumps

Appendix 2: IMPROVED MEASUREMENT METHOD FOR HEAT PUMP NOISE

# 1 Bakgrund

Buller från värmepumpar beskrivs av användare och tillverkare som ett stort och aktuellt problem. Bullernivån från värmepumpar är kravsatt på den europeiska marknaden genom de europeiska förordningarna 813/2013 för rumsuppvärmare och 206/2012 för luftkonditioneringsapparater och det finns ytterligare kravnivåer på olika nationella marknader. Dock finns endast ett fåtal studier gjorda på buller och värmepumpar, och dessa har ofta inriktat sig på de olika komponenternas påverkan på ljudnivån och missar därför systemeffekter samt den effekt som ljudet faktiskt har på människor (Fagot-Revurat and Fournier 2003) (Tian, Ouyang et al. 2009) (Crocker, Arenas et al. 2004).

Idag utvärderas värmepumpsbuller som en ljudeffektnivå mätt i en driftspunkt, men befintliga metoder ger en dålig bild av det faktiska bullret från värmepumpen. De naturliga variationerna i drifttillstånd hos värmepumpen resulterar i en varierad ljudnivå som inte tas hänsyn till med dagens metoder (Bessac 2004). Projektgruppens tidigare forskning visar att drift i delast för inverterstyrda värmepumpar kan påverka den A-vägda ljudeffektnivån med upp till 10 dB (Gustafsson, Johansson et al. 2011) (Johansson, Gustafsson et al. 2013). Dock behövs mer underlag för att bekräfta denna bild. Utformningen av de nuvarande reglerna ger stora frihetsgrader för värmepumpstillverkarna när det gäller att definiera driftpunkten för ljudmätningen (gäller för inverterstyrda värmepumpar). Därför testas värmepumpen vid en lägre kapacitet, vilket resulterar i en lägre ljudnivå på märketiketten och på så vis kan konsumenten få en vilseledande uppskattning av det faktiska bullret eller i alla fall den maximala bullernivån. I andra sammanhang, exempelvis trafikbuller, tar man hänsyn till bullers inverkan sett över dygnet vilket också borde passa för värmepumpar (European Commission 2002). Dessutom kan den A-vägda ljudnivån vara otillräcklig för att bedöma människans upplevelse och störning av buller (Holm Pedersen 2001).

Buller definieras som oönskat ljud, vilket betyder att människor lägger en värdering i det ljud vi utsätts för. Ljud från olika ljudkällor med samma ljudnivå upplever olika pga skillnad i ljudkaraktär, men upplevelsen är även beroende av tidigare erfarenheter och situationen där vi utsätts för bullret. Ljudets karaktär är en viktig faktor för att förstå dess inverkan på människans upplevelse. I och med att en värmepump har en varierande ljudnivå beroende av drifttillstånd är det även viktigt att undersöka människors upplevelse av skillnaderna i ljudkaraktär vid olika drifttillstånd. Beroende av ljudets karaktär kan produkter med samma A-vägda ljudeffektnivå uppfattas som väldigt olika (Blauert and Jekosch 1997). För att förbättra utvärderingsmetoden kan andra akustiska mått bättre förklara upplevelsen av ljudet, t.ex. tonalitet, grad av skarphet eller

impulsivitet. Genom att låta en panel utvärdera och göra skattningar av upplevelsen hos olika akustiska karaktärer i ljudet, kan man klarlägga vilka parametrar i värmepumpsbuller som upplevs mest störande. Metodiken med lyssningsförsök är väl vedertagen bl.a. inom fordonsbranschen för att sätta användaren i fokus (Jennings, Dunne et al. 2010). Identifiering av vad som egentligen orsakar störningen är till stor nytta för värmepumpstillverkare, då man i ett tidigare skede av utvecklingen kan angripa ljudfrågor och minska kostnader som uppkommer i ett sent skede pga. bulleråtgärder.

Det är viktigt med forskning som kan användas som underlag till framtida lagkrav och standarder då det är dessa som helt sätter förutsättningarna för relevanta uppgifter till konsumenter. De nya nyckeltal som resulterar ur detta projekt bör därför presenteras för EU-kommissionen (KOM) och CEN (den europeiska standardiseringsorganisationen) vid revidering av energimärkningsförförordningarna, som kommer att ske fem år efter det att de träder/trädde i kraft, för att verkligen påverka marknaden mot mindre störande värmepumpar.

Delar av den föreslagna forskningsmetodiken har redan utvärderats och är därmed väl beprövad. I de två doktorandprojekt som två av projektdeltagarna har genomfört har vissa av dessa frågeställningar lyfts fram. Bland annat har luftvärmepumpars både stationära och dynamiska bullernivåer undersökts (Johansson, Gustafsson et al. 2013). Man har också studerat systemeffekter där ett exempel är hur designen hos värmeväxlaren i utedelen hos en luftvärmepump påverkar bullernivåerna hos fläkten samt utvecklat ett syntetiseringsverktyg som kan komma att användas vid utvecklingen av tystare värmepumpar (Gustafsson, Hellgren et al. 2014).

## 2 Projektdeltagare

Projektdeltagare på RISE:

- M.Sc. Ola Gustafsson (projektledare). Expert på ljud och energi inom området värmepumpar.
- M.Sc. Henrik Hellgren (fd Johansson) Expert inom akustik och speciellt inom området värmepumpar.
- Dr. Penny Bergman är expert på beteendevetenskapliga studier kopplat till ljud
- Dr. Dag Glebe är expert på människors upplevelse av ljud.
- Dr. Caroline Haglund Stignor är expert på värmepumpar och värmeväxlare samt förordningar och direktiv kopplade till värmepumpar.

Deltagande företag samt kontaktperson:

- Danfoss AB (Martin Hamberg)
- NIBE AB (David Kroon)
- Enertech (Kent Karlsson)
- Bosch Termoteknik (Emil Attlid)
- Villaägarnas Riksförbund (Terese Wallinder)



## 3 Mål

Det övergripande målet med detta projekt var att ta fram underlag för och föreslå en förbättrad utvärderingsmetod och bättre nyckeltal för att redovisa buller från värmepumpar. Detta skulle ge konsumenten en bättre vägledning, men skulle också gagna värmepumptillverkarna i deras produktutveckling. Resultaten från projektet är också tänkta att användas i framtida standardiseringsarbete.

De olika delmålen med projektet är enligt följande:

- En översikt över hur ljud ljudet från en värmepump skiljer sig vid stationära och dynamiska förlopp samt hur ljudnivån korrelerar med temperatur och lastfall.
- Identifiering av dominerande bullerkaraktär kopplat till störning.
- Förslag på en förbättrad utvärderingsmetod av värmepumpsbuller.
- Förslag på nyckeltal för förbättrad produktmärkning med avseende på ljud.

### 3.1 Avgränsningar

Detta projekt syftar inte till att identifiera metoder för att minska bullret från en värmepump utan fokuserar istället på hur man ska mäta och utvärdera bullret för att utvecklingen ska gå mot mindre störande värmepumpar.

I detta projekt har mätningar endast gjorts på värmepumpar av typerna luft/vatten, vätska/vatten och frånluft/vatten på grund av befintlig projekttid, budget och kompetens/produktutbud hos de deltagande företagen. Därmed har inga mätningar gjorts på tex luft/luft värmepumpar. Dock kan många av slutsatserna som dras för luft/vatten värmepumpar även göras för utedelen hos luft/luft värmepumpar. Ljudnivån från innedelen hos luft/luft värmepumpar är däremot inte analyserad och anges därför som ett förslag för fortsatt forskning.

Alla utom en luft/vatten värmepump som undersökts i denna studie är alla av typen monoblock där hela köldmediekretsen inklusive kompressorn är placerade i utedelen och det är endast ljudnivån från utedelen som undersökts. En av värmepumparna som undersöktes i fält (men ej i labb) var av indirekt typ där utedelen består av en fläkt och en värmeväxlare och köldmediekretsen är placerad i innedelen. De luft/vatten värmepumpar som leder in luft genom ett kanalsystem till en innedel är inte behandlade i denna studie.

Endast en värmepump av frånluft/vatten har analyserats. Resultaten för denna typ är därmed inte allmängiltiga utan visar endast på ett exempel hur ljudet för denna produkttyp är.

Mätplanen för de olika värmepumparna har inte varit identiska för labbmätningarna. Som ett exempel har endast kompressorfrekvensen och inte värmeeffekten mäts för alla värmepumpar. I vissa fall har värmeeffekten uppmätts vid ett annat tillfälle och kan därmed länkas till ljudmätningen via kompressorfrekvensen. För några av värmepumparna har inte denna data varit tillgänglig.

I projektet har endast upplevelsen av ljud vid stationär drift undersökts. Det har inte genomförts några lyssningsförsök på ljud som uppkommer p.g.a. skillnad i kapacitetsreglering (on/off, frekvensstyrning).

## 4 Genomförande

### 4.1 Datainsamling

Den inledande delen i projektet bestod i att samla in data. Dessa har bestått av kvalitativa data genom ljudinspelningar och kvantitativa data såsom ljudeffekt. Syftet var att kartlägga hur ljudet från värmepumpar är hos värmepumpar som finns på marknaden idag. Syftet var också att bygga kunskap om hur bullret varierar över tid och vid olika lastfall. 17 st värmepumpar av olika typ (luft/vatten, vätska/vatten och frånluft/vatten) har använts för mätningar i fält och i labb. Antalet värmepumpar bedöms tillräckligt för att fånga spridning inom varje produkttyp (förutom för frånluft/vatten). Mätningar har genomförts dels av projektdeltagarna från RISE samt av värmepumpstillverkarna som samfinansierar projektet.

#### 4.1.1 Fältmätningar

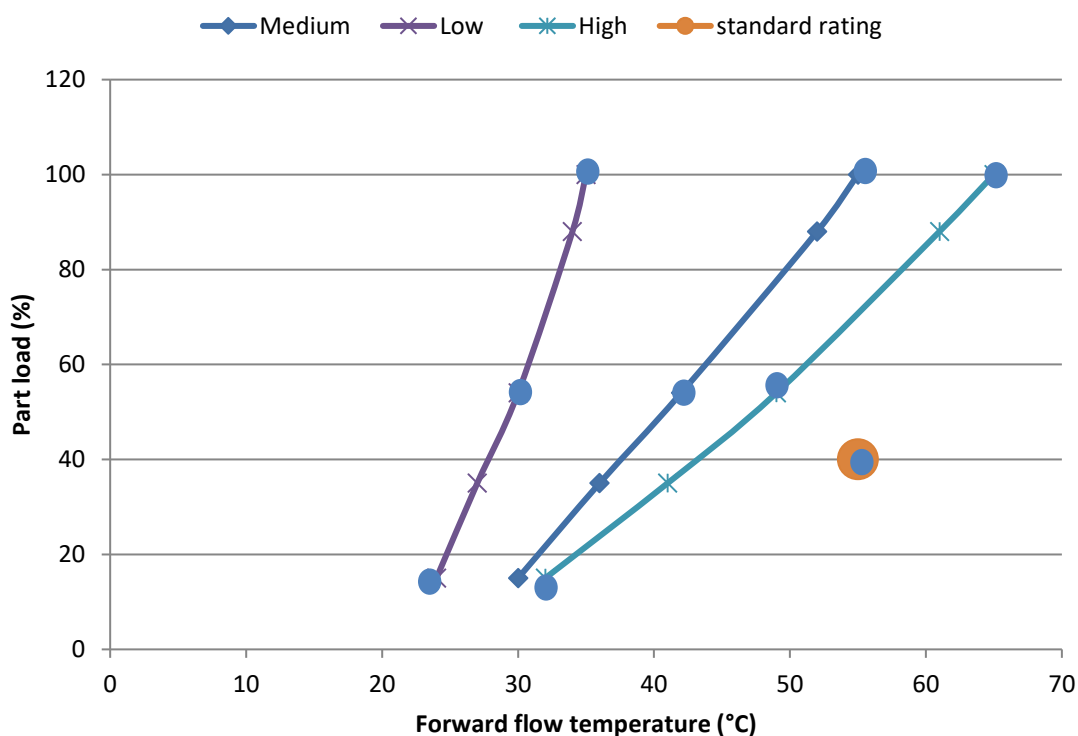
Fältmätningar genomfördes vid vinterförhållande på olika typer av värmepumpar (11 st) installerade i enfamiljshus på olika ställen i Sverige. Platserna för mätningarna tillhandahölls av de medverkande företagen. Loggning av ljudet genomfördes under 48h för att fånga upp ljudets variationer över tid. En ljudnivåmätare (Norsonic 140) placerades på 1 meters avstånd framför värmepumparna och ljudmätningar genomfördes på både luft/vatten- och vätska/vatten-varmepumpar med fast och variabel kapacitetsreglering. Data som är kopplat till värmepumparnas drift har även tillhandahållits av tillverkarna i den mån det varit möjligt. Fältmätningar på luft/vatten värmepumpar är känsliga för väderförhållanden så som vind och regn. Därför har det för vissa perioder inte varit möjligt att analysera relevant ljuddata.

En standardmätning av ljudeffekt görs vid stationära förhållanden, så det är intressant att undersöka hur ljudet förändras vid övergångar mellan olika driftcykler. För både luft/vatten- och vätska/vatten-varmepumpar kommer varmvatten produceras vid behov och för luftvarmepumpar kommer även enheten att behöva avfrosta. Vi kan även se skillnader mellan värmepumpar med fast och variabel kapacitetsstyrning. I och med att värmepumpar med fast kapacitetsreglering endast körs på en styrfrekvens är ljudnivån lättare att prediktera. Samtidigt kommer denna typ av värmepump att slå på och av med tätare mellanrum.

#### 4.1.2 Labbmätningar

Mätningar genomfördes i labb med syfte att bestämma ljudeffekten vid olika driftförhållande enligt standarderna SS-EN12102 och ISO3747. Mätosäkerheten för

denna metod är 1,5 dB. Mätningarna genomfördes på samma modeller som de värmepumpar som mättes på i fält samt för ytterligare ett antal modeller (totalt 17 st). Ett flertal driftfall valdes från EN14825, metoden för beräkning av SCOP (Seasonal COP) för att utvärdera ljudet vid olika relevanta driftfall, se figur nedan. På detta vis kunde ljudet mätas upp för fall med hög och låg kompressorfrekvens och med olika temperaturer, i de kombinationer man förväntas se i verkliga installationer. Driftpunkten enligt nuvarande metod EN14511 (standard rating condition) mättes även upp. Data från de olika värmepumparna lades samman för att visa en sammanvägd bild över hur ljudet beror av värmeeffekt, kondensering-/förångningstemperatur och kompressorfrekvens. En14825 användes också för att beräkna ett säsongsviktat värde på ljudeffektnivån på samma sätt som SCOP beräknas.



**Testpunkter i EN14825 för beräkning av SCOP. Visas för olika temperaturapplikationer. Även driftpunkt - standard rating condition i EN14511 som används för ljudmätning idag visas. De blå markeringarna visar de driftfall vid vilka ljudmätningar genomfördes för flera av värmepumparna.**

## 4.2 Lyssningsförsök

I den andra delen var fokus på att undersöka användarens upplevelse av värmepumpens ljud. Att subjektivt utvärdera ljuden från värmepumparna genom lyssningsförsök, kan ses som ett komplement till den vanliga objektiva ljudmätningen. Här ges lyssnaren möjlighet att bedöma ljuden utifrån upplevelsen. Lyssningsförsök kan utföras på många olika sätt

enligt etablerade metoder, men utfallet av försöken är väldigt beroende av den ljudkälla som undersöks. Det som eftersöktes var korrelationen mellan ljudkaraktären och den faktiska störningen. Försöken genomfördes i det multisensoriska-labbet vid RISE ljud och vibrationer. Liknande metodik har använts i Henrik Hellgrens doktorandprojekt vilket medfört värdefulla erfarenheter vid vidare undersökningar. Utvärderingspanelen bestod av personer från RISE och de deltagande företagen.

I detta projekt genomfördes en parvis jämförelse av bergvärmepump-ljud, där även olikhetsskattning av ljuden gjordes. Ljudfiler valdes ut från inspelningar som gjordes vid fältmätningarna. En parvis jämförelse är ett relativt enkelt sätt att kvantifiera preferensen mellan ljuden och olikhetsskattningen är ett kraftfullt verktyg för att erhålla en perceptuell karta och visuellt visa samband mellan de undersökta ljuden. Dock så växer tidsåtgången för försöket snabbt ju fler ljud man önskar undersöka, då man vill jämföra alla kombinationer av par. Än en gång får man se detta som ett komplement till den objektiva utvärderingen. För att kunna förklara sambanden mellan ljuden används den objektiva karaktäriseringen.

Ljudfilerna som användes vid försöket var 3 sekunder långa, vilka personerna spelade upp och jämförde mot varandra i par. Personerna jämförde alla kombinationer av par och två frågor ställdes för varje par. Den första frågan var "Vilket ljud är mest störande?" och den andra frågan "Hur lika/olika är ljuden?". Totalt var det 10 inspelningar från 3 st bergvärmepumpar. Vid uppspelning normaliserades ljudnivån vid lyssningspositionen till samma A-vägda ljudtrycksnivå, för att kunna undersöka påverkan av andra akustiska mått. Generellt dominerar ljudnivån upplevelsen och det är därför viktigt att normalisera mot ett "nivå-mått", för att kunna identifiera de parametrar som förklarar ljudkaraktären bättre. Den A-vägda nivån används för normaliseringen p.g.a. att lagkrav hänvisar till denna.

### 4.3 Analys och metodutveckling

Sista delen av projektet bestod i att analysera och bearbeta alla de resultat som kom ur de två föregående delarna. Ett mål med projektet var att ta fram ett förslag för en förbättrad utvärderingsmetod och nyckeltal för värmepumpsbuller. Första steget var därmed att identifiera och fastställa hur långt man kan komma med befintliga mätmetoder kombinerat med ett nytt sätt att analysera mätdata. Nästa fråga var om mätmetodiken bör förändras för att kunna bidra med tillräckliga data för ett förbättrat störningsmått.

## 5 Resultat och diskussion

### 5.1 Generell information om ljudnivå från värmepumpar

I en luft/vatten värmepump är fläkten och kompressorn de överlägset största källorna till ljud. En vätska/vatten värmepump har ingen fläkt och därmed är det kompressorn som är den dominerande källan till ljud. Typen av värmepump påverkar också var eventuell bullerstörning uppkommer, om det är inomhus eller utomhus. I en luft/vatten värmepump är den absolut vanligaste konfigurationen att både fläkt och kompressor sitter i en uteenhet. I en vätska/vatten samt frånluft/vatten värmepump sitter kompressor (och fläkt för den sistnämnda typen) i en inneenhet.

Traditionellt har luft/vatten och vätska/vatten värmepumpar varit styrda med on/off drift för att reglera värmekapaciteten. Sedan ett antal år finns det kapacitetsreglerade kompressorer med så kallad inverterstyrning i värmepumparna och dessa produkter blir mer och mer vanliga på marknaden. I en inverterstyrd värmepump kan kompressorns varvtal justeras för att åstadkomma olika värmekapacitet. Då ljudet från en värmepump till stor del bestäms av kompressorns varvtal varierar ljudnivån hos en inverter betydligt jämfört med en on/off värmepump. I befintlig europeisk standard för att bestämma ljudeffektnivå hos en värmepump (SS-EN12102) beskrivs driftsfall både som en temperatur och en värmekapacitet vilken motsvarar ett av driftsfallen (C) inom den europeiska standarden för bestämning av säsongsprestanda (EN 14825). Detta är vid 7°C och 35% kapacitet vilket får konsekvensen att inverterstyrda värmepumpar som har möjlighet att justera sin värmekapacitet testas vid en låg kompressorfrekvens tillskillnad från en on/off värmepump där varvtalet är konstant. Den inverterstyrda värmepumpens ljudnivå blir därmed betydligt lägre jämfört med en motsvarande on/off värmepump. I riktiga installationer (inte i labb) går inverterstyrda värmepumpar kontinuerligt med en låg ljudnivå jämfört med en on/off värmepump som cyklar mellan att gå vid en högre ljudnivå och inte gå alls. Dock är det inte givet att en inverterstyrda värmepumpar alltid har en lägre ljudnivå än en on/off värmepump då kompressorn tillåts gå vid ett högre varvtal för att åstadkomma en högre värmeeffekt, tex vid låga utomhustemperaturer.

En luft/vatten värmepump har förutom kompressorn även en fläkt som ljudkälla. Rent karaktärsmissigt skiljer sig de två ljudkällorna på så sätt att fläkten har en mer bredbandig ljudkaraktär jämfört med kompressorns mer tonala karaktär. Fläkten kan då maskera kompressorns ljud, så att det blir mindre dominant. Hur förhållandet mellan kompressor- och fläkt-ljud påverkar ljudnivå kommer även bero av värmepumpens styrstrategi av hastigheterna på de båda komponenterna. Det förekommer variationer hos de undersökta värmepumparna för både kompressor och fläkt. I vissa fall begränsas varvtal på kompressor och fläkt vilket gör att variationerna i ljud för de olika driftsfallen blir olika. För luft/vatten värmepumpar kan fläkten styras oberoende av kompressorns varvtal vilket ytterligare ökar variationerna mellan olika värmepumpar. Påverkan av temperaturfall, vilket både påverkar ljudet från kompressorn på grund av ett annat tryckfall i systemet, samt ett annat varvtal hos fläkten kan därmed bli större för en luft/vatten värmepump än

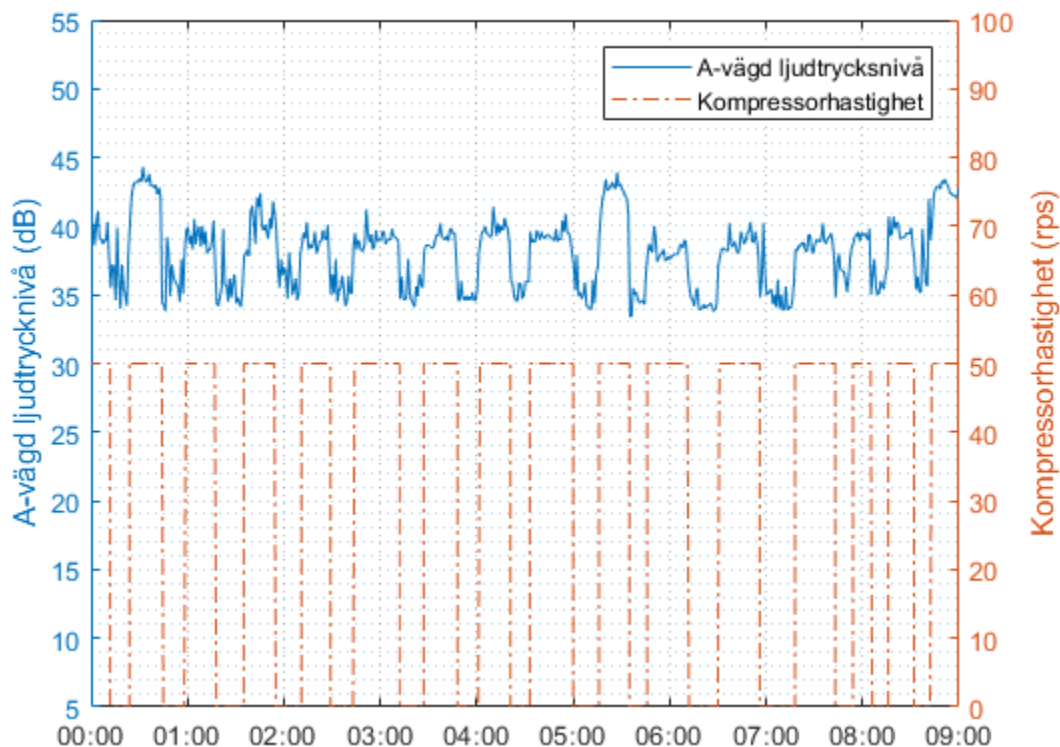
en vätska/vatten värmepump. Det skulle dock behövas mer data än det som erhållits inom detta projekt för att säkerställa detta samband.

## 5.2 Ljudnivå hos befintliga installationer

I detta stycke presenteras mätresultat som är erhållna genom mätningar i fält på befintliga värmepumps-installationer. Mätningar genomfördes på samma värmepumpar som senare användes vid mätningar i laboriemiljö.

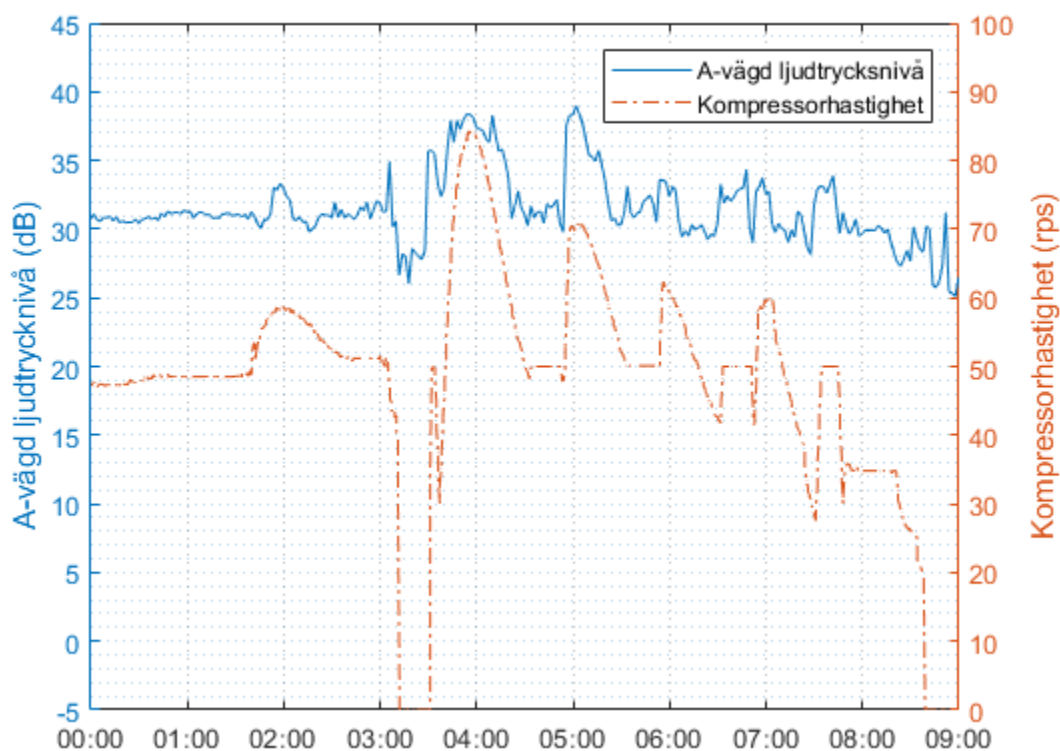
### 5.2.1 Vätska/vatten värmepumpar

Skillnader mellan en on/off- och inverterstyrd värmepump är tydliga då man tittar på ljudnivån över en längre tidsperiod. För en on/off-styrd värmepump kommer driftcykelns längd anpassas för att möta värmebehovet. I Figur 1 kan vi se att ljudnivån är relativt konstant mellan cyklerna, förutom de tillfällen när värmepumpen arbetar mot en högre kondenseringstemperatur. I detta fallet är ökningen i ljudnivå ca 3 dB, vilket vi kan se efter 30min, 5h och 30min och även vid ca 9h. Även om kompressorhastigheten är den samma sker en förändring i kompressorns ljudkaraktär vid dessa tillfällen vilket påverkar ljudnivån.



Figur 1. Den A-vägd ljudnivån och kompressorhastigheten för on/off-styrd vätska/vatten värmepump under en 9 timmars period.

En inverterstyrd värmepump varierar mer i frekvens under drift för att anpassa sig till huset värmebehov. I Figur 2 kan vi se ett exempel där värmepumpen till en början körs på en relativt stabil frekvens, för att sedan stängas av efter ca 3h när inget värmebehov finns. När sedan värmepumpen arbetar mot en högre kondenserings-temperatur ser vi en större variation i kompressorhastigheten, vilket ger ett stort utslag på den A-vägda ljudnivån. Här det istället förändringen i hastigheten som påverkar den A-vägda ljudnivån mest. I detta fallet är skillnaden mellan den högsta och lägsta nivån 8-9 dB, därför kan det vara relevant att redovisa en max-ljudnivå som visar hur denna avviker från den "genomsnittliga" provpunkten.



**Figur 2. Den A-vägda ljudnivån och kompressorhastigheten för inverterstyrd vätska/vatten värmepump under en 9 timmars period.**

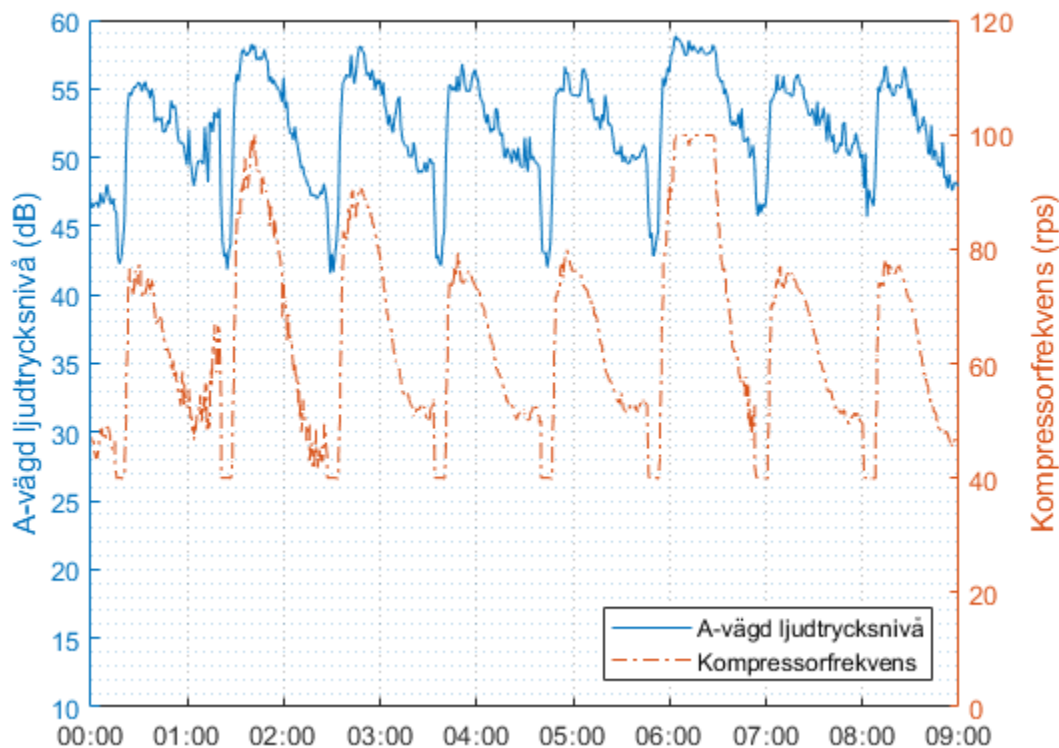
Skillnaderna mellan on/off- och inverterstyrda vätska/vatten värmepumpar är tydliga både vad det gäller driftscyklernas längd och kompressorhastighetens inverkan på variationer i ljudnivån. Ljudnivån är lättare att prediktera för en on/off, men slår av och på oftare under en längre tidsperiod. Hur detta intermittenta beteendet påverkar upplevelsen av ljudet är svårt att kvantifiera genom lyssningsförsök. Däremot är möjligheterna bättre för att undersöka skillnaderna i ljudkaraktär som uppstår vid olika kompressorhastigheter. En rapport från det lyssningsförsök som genomfördes inom projektet finns bifogat i appendix 1. Resultaten från försöket visar att just kompressorhastigheten har en framträdande påverkan på upplevelsen. Personerna som deltog i försöket föredrog ett ljud med snabbare kompressorhastighet, då ljuden spelas upp med samma A-vägda ljudnivå. Fast det vi ser i graferna från mätningarna är att en snabbare hastighet innebär en högre A-vägda ljudnivå. Hur vi ska värdera dessa två faktorer mot varandra kräver fortsatta studier



av ljudupplevelsen. Det resultatet även visar är att personerna föredrog ljud med mindre skarpheit (sharpness), vilket relaterar till dominans av högfrekvent energi i ljudet. Detta kan påverkas av luddämpande åtgärder runt kompressorn, där högre frekvenser generellt är lättare att dämpa än de lägre frekvenserna. Utifrån resultaten från försöken är det svårt att dra några generella slutsatser, kring hurvida den A-vägda ljudnivån kan kompletteras med andra ljud-mått som bättre kopplar till upplevelsen av värmepumpsljudet.

### 5.2.2 Luft/vatten värmepumpar

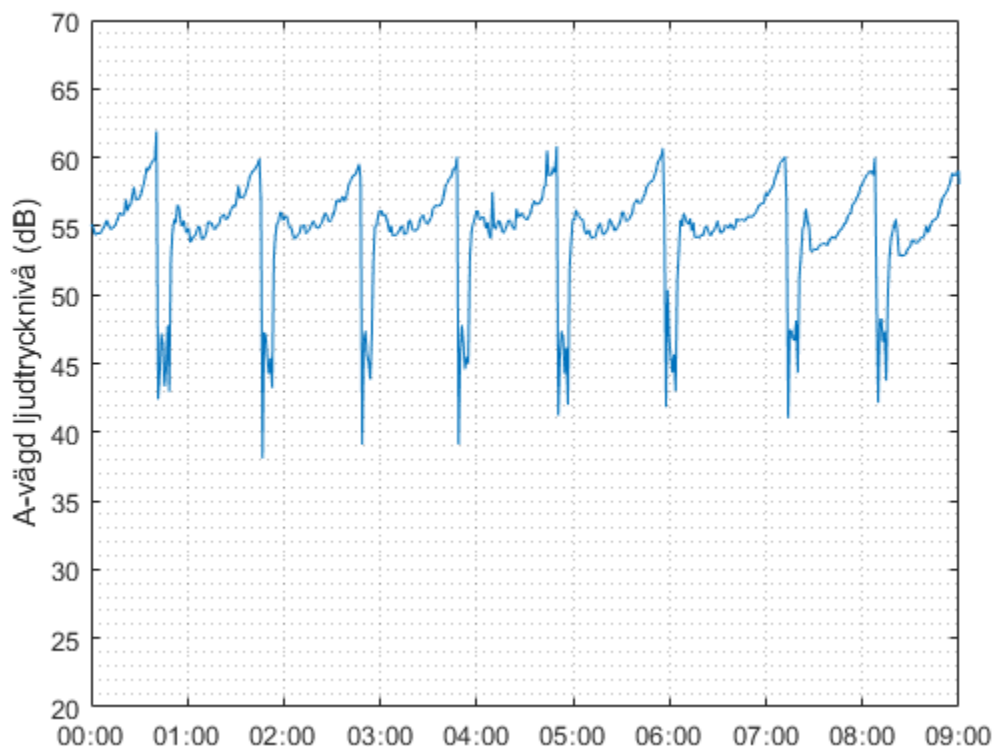
Ljudnivån från en luft/vatten värmepump är generellt högre än en vätska/vatten värmepump pga fläktens inverkan. Men i Figur 3 är det även här tydligt att kompressorn har en stor påverkan på den A-vägda ljudnivån. Som tidigare nämndes påverkar styrstrategin för kompressor och fläkt ljudnivån. Vid de tillfällen värmepumpen går till hastighet på 40 rps avfrostas värmepumpen. Det är tydligt att ljudnivån lägre under avfrostningsperioden, då enbart kompressorn körs och fläkten är avstängd.



Figur 3. Den A-vägda ljudnivån och kompressorhastigheten för on/off-styrd luft/vatten värmepump under en 9 timmars period.

I Figur 4 ser vi ljudnivån för en luft/luft värmepump, vilken visar ett annorlunda förlopp över en uppvärmningscykel. Här finns inte data om kompressor- och fläkt-hastighet att tillgå, så det svårare att härleda förändringen i ljudnivån under en cykel. Däremot kan

påfrysning av is på förångaren påverka hur fläkten belastas, då luftflödet förhindras vid påfrysningen.



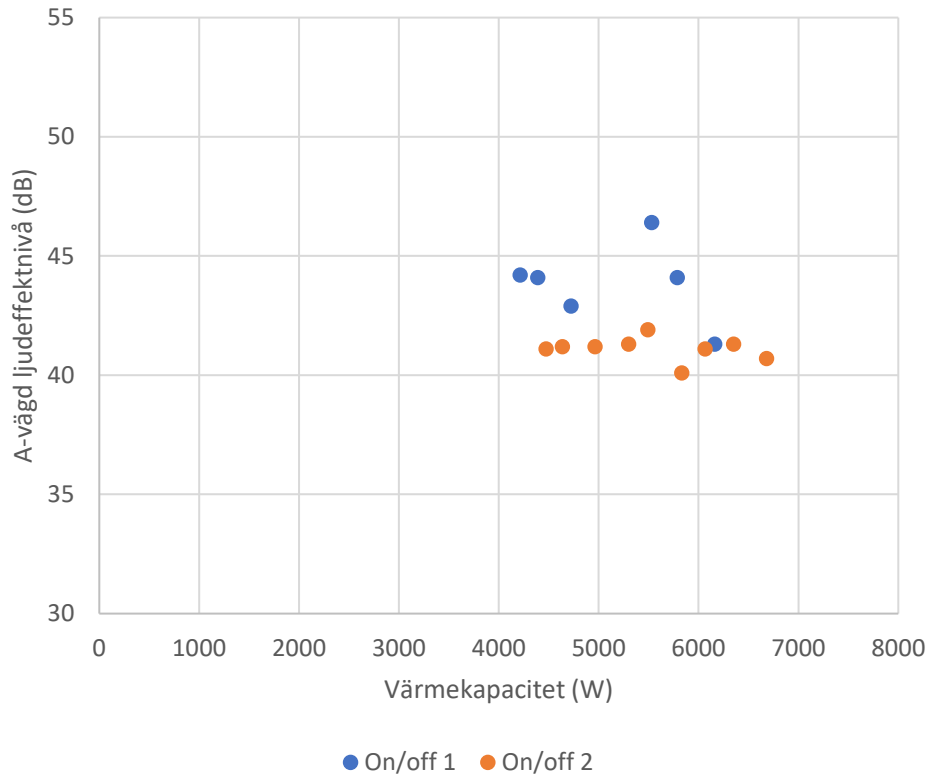
Figur 4. Den A-vägd ljudnivån och kompressorhastigheten för en inverterstyrd luft/luft värmepump under en 9 timmars period.

### 5.3 Ljudnivå hos värmepumpar på marknaden

I detta stycke presenteras mätresultat som är erhållna genom mätningar i laboriemiljö enligt EN12102 och ISO EN 3747.

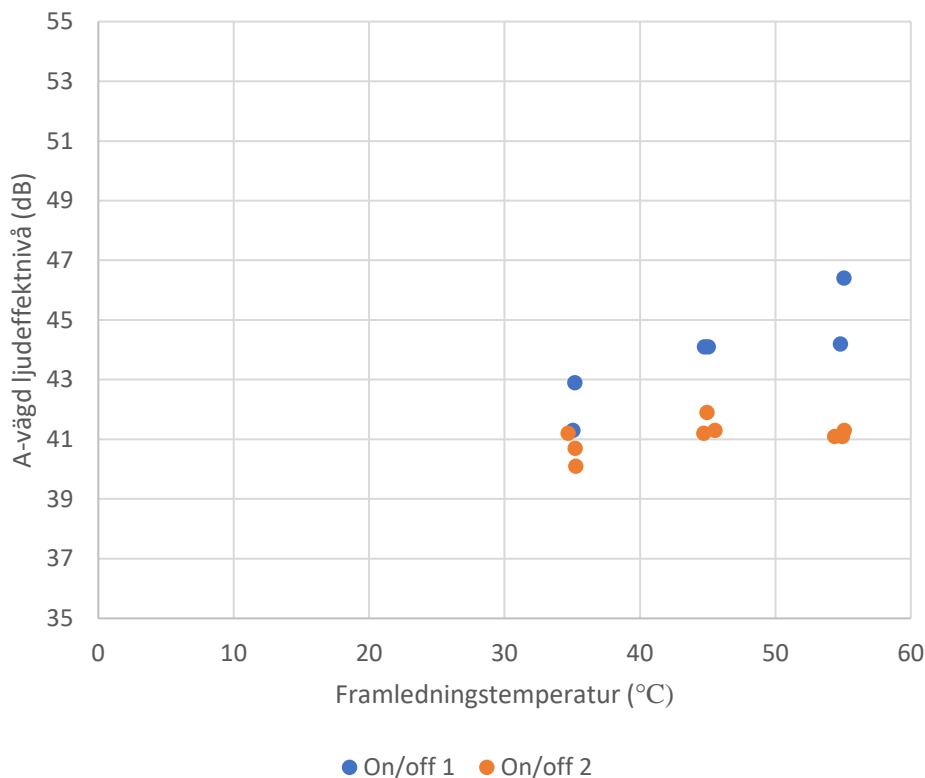
#### 5.3.1 Vätska/vatten värmepumpar

Inom projektet har ljudnivån från 7 olika vätska/vatten värmepumpar undersökts genom laboriemätningar. Två av dessa är av on/off typ och fem är inverterstyrda. I Figur 5 visas ljudeffektnivån hos de två värmepumparna med on/off styrning som funktion av deras värmekapacitet vid olika driftsfall. Då kompressorerna hos dessa värmepumpar endast går vid en hastighet varierar endast ljudnivån beroende på förångnings och kondenseringstemperatur som i detta fall har varierats mellan  $-5^{\circ}\text{C}$  till  $5^{\circ}\text{C}$  och  $35^{\circ}$  till  $55^{\circ}\text{C}$  (temperatur på vätska in till förångare och ut från kondensator). Resultaten visar inget samband mellan ljudeffektnivå och värmekapacitet.



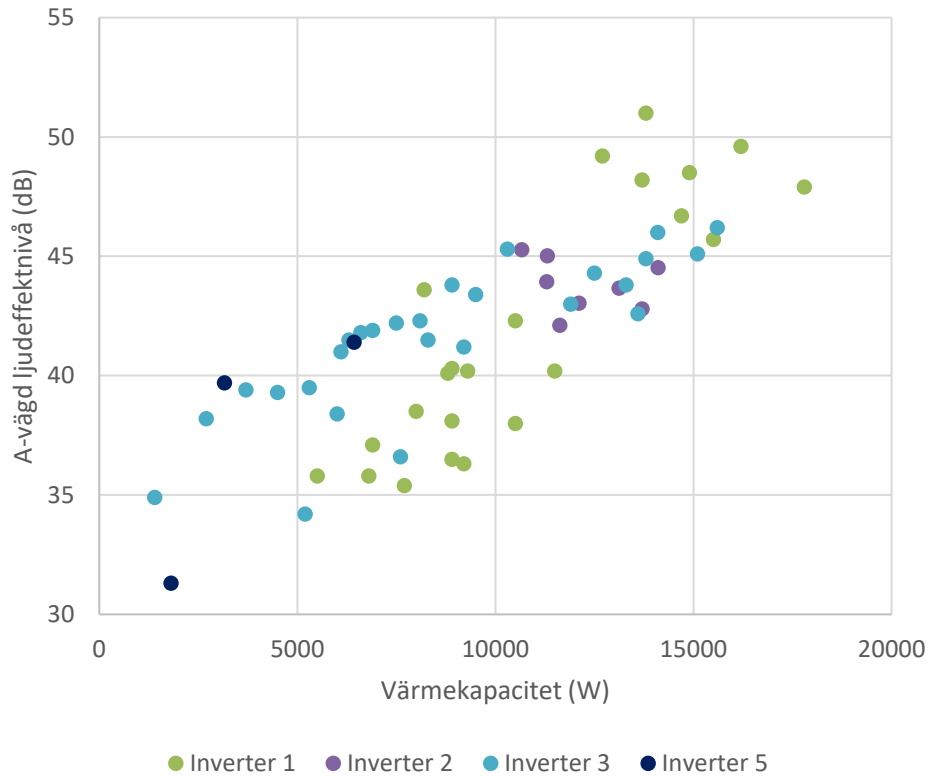
**Figur 5. A-vägd ljudeffektnivå för vätska/vatten värmepumpar med on/off styrning som funktion av värmekapacitet.**

Figur 6 visar att ljudnivån ökar med ökad temperatur ut ur förångaren för on/off värmepump 1. Den medelvärderade ökningen är i storleksordningen 2-3 dBA för en ökning av temperatur från 35 till 55°C. On/off 2 visar inget samband mellan ljud och kondenseringstemperatur.



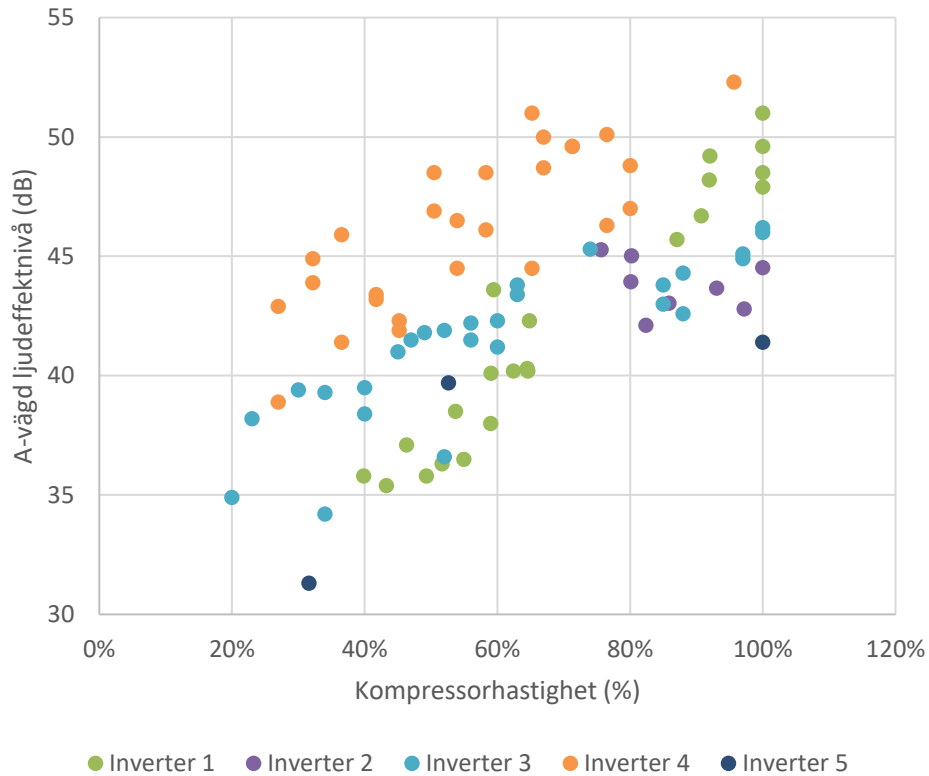
**Figur 6. A-vägd ljudeffektnivå för vätska/vatten värmepumpar med on/off styrning som funktion av temperatur på vatten ut ur kondensator.**

Ljudnivån hos inverterstyrda värmepumpar varierar desto mer beroende på körfall. I Figur 7 ser man data från fyra värmepumpar som funktion av deras värmekapacitet vid olika kompressorhastigheter och driftfall. Som man kan se har inte de fyra värmepumparna samma kapacitet där den minsta spänner från ca 2kW till 7kW och den största från ca 5kW till 18kW. Mätningarna är gjorda vid driftfallen 0/35 och 0/55 och visas här tillsammans. Inverter 1 och 3 har snarlika linjära lutning mellan ljudeffekt och värmekapacitet. Det förekommer vissa skillnader i ljudnivå för en specifik värmekapacitet och värmepump. Detta kan förklaras med de olika kondenseringstemperaturerna samt mätosäkerhet i mätmetoden. Dock är det tydligt att ljudet från en värmepump är kraftigt beroende av värmekapaciteten, både den maximala som värmepumpen kan avge men också den värmekapacitet som den avger vid ett specifikt driftfall (kopplat till dellast). Inverter 2 är inte testat med samma spann på värmeeffekt och visar på heller inte samma samband. Skillnaden i ljudeffekt varierar mellan 10 och 15 dBA (med undantag för inverter 2) för lägsta respektive högsta värmeeffekt för de olika värmepumparna.



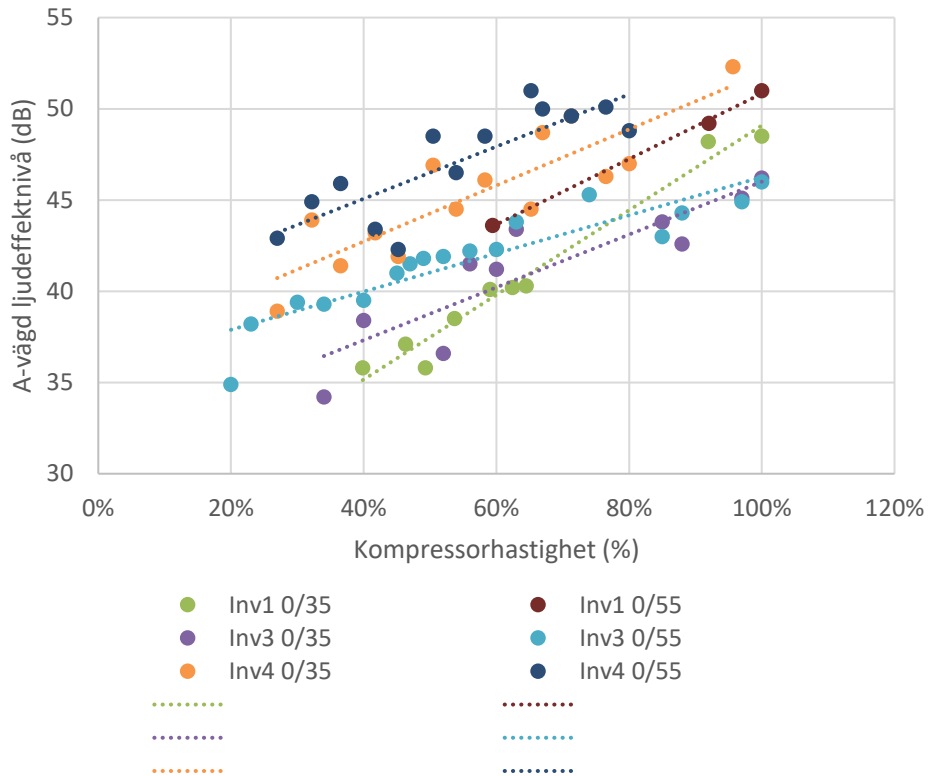
**Figur 7. A-vägd ljudeffektnivå för vätska/vatten värmepumpar med inverterstyrning som funktion av värmekapacitet.**

I Figur 8 visas i princip samma datamängd som i Figur 7 med skillnaden att istället för värmekapacitet på x-axeln istället visar kompressorfrekvens uttryckt som en procentsats av maxvarvtal. Generellt kan sägas att kompressorfrekvens och värmekapacitet hänger ihop med ett så gott som linjärt samband för respektive värmepump, men kapaciteten är som tidigare nämnts olika för de olika värmepumparna. Data för inverter 4 är också tillagt i Figur 8. Inverter 1 och 3 samlar mätpunkterna nära en rät linje vilket tyder på att sambandet mellan kompressorfrekvens och ljudnivå är mycket stark. För inverter 4 syns något större variationer ljudnivån för respektive kompressorfrekvens.



**Figur 8. A-vägd ljudeffektnivå för vätska/vatten värmepumpar med inverterstyrning som funktion av kompressorfrekvens i procent.**

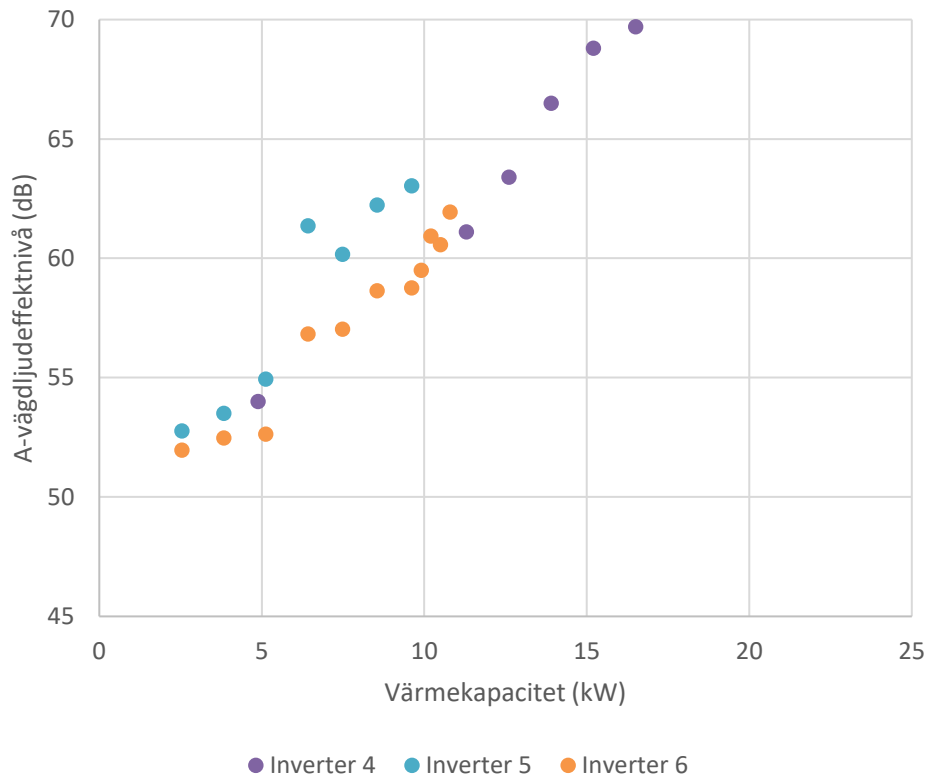
I Figur 9 är datamängderna för de olika värmepumparna uppdelade beroende på kondenseringstemperatur. Varje värmepump representeras därmed av två trendlinjer för de olika driftfallen 0/35 och 0/55. Detta tydliggör att kodenseringstemperaturen påverkar ljudnivån med ca 2dB, vilket ska jämföras med att kompressorfrekvensen påverkar ljudet med 10 dB i snitt för de tre värmepumparna (kompressorfrekvens på 20% jmf 100%).



**Figur 9. Ljudeffekt beroende av kondenseringstemperatur. A-vägd ljudeffektnivå för vätska/vatten värmepumpar med inverterstyrning som funktion av kompressorfrekvens. Data uppdelat i 0/35 och 0/55 för 3 olika värmepumpar.**

### 5.3.2 Luft/vatten värmepumpar

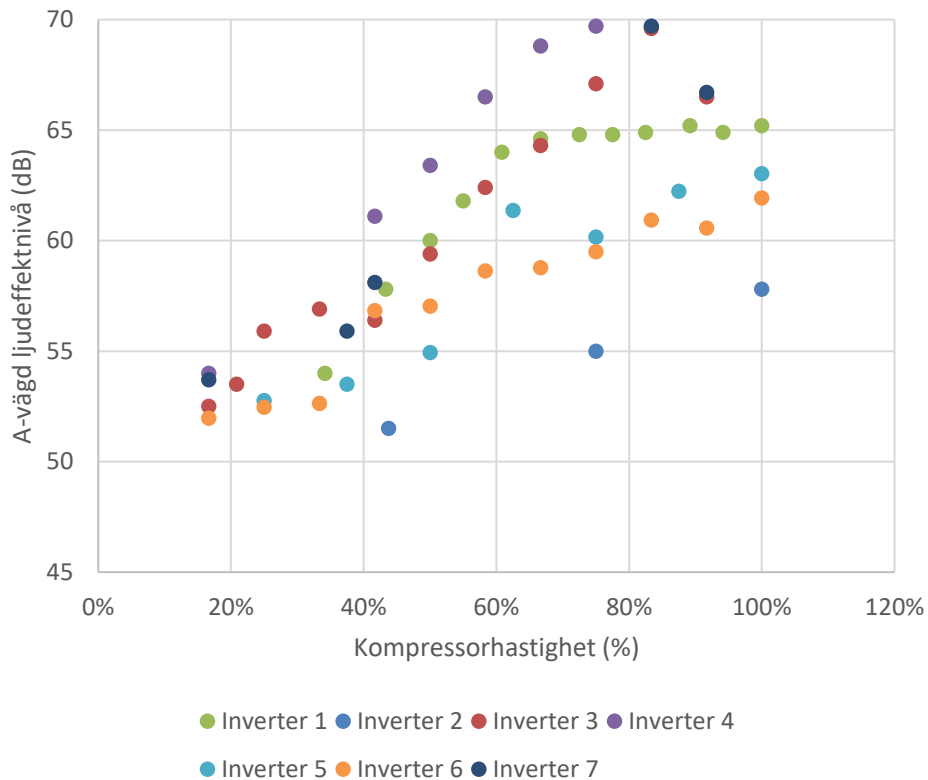
De luft/vatten värmepumpar som undersökts via labbmätningar inom detta projekt (endast inverterstyrda värmepumpar) har generellt en betydligt högre ljudnivå än de vätska/vattenvärmepump som studerats. Skillnaden är 10-15dB vilket syns i Figur 9 och Figur 11. Detta beror en stor del på att de har två stora ljudkällor, både kompressor och fläkt. I Figur 10 visas ljudeffektnivån som en funktion av värmekapaciteten vid driftpunkten 7/35. Det är tydligt att det finns ett klart samband mellan ljud och kapacitet, precis som för vätska/vattenvärmepumpar.



**Figur 10. A-vägd ljud effekt nivå för luft/vatten värmepumpar med inverterstyrning som funktion av värme kapacitet.**

Figur 11 presenterar ljud effekten hos luft/vattenvärmepumpar som funktion av kompressorfrekvens. Mätningarna är gjorda vid driftpunkten 7/35 förutom för inverter 1 som mäts vid 10/40 och inverter 7 som mäts vid 7/55. Återigen visas det tydliga sambandet mellan ljud nivå och kompressorns hastighet. Skillnaden i ljud nivå för ett lägsta varvtal och ljud nivå vid högsta varvtal ligger i snitt på över 12dB. För inverter 1 kan man uttyda att kontrollstrategin på fläkten spelar roll för den totala ljud effekt nivå vid de olika driftfallen. Dess fläkt når maximalt varvtal då kompressorn nått 60 % av maxhastighet. Som synes ökar inte ljud nivå lika tydligt vid de högre kompressorfrekvenserna.

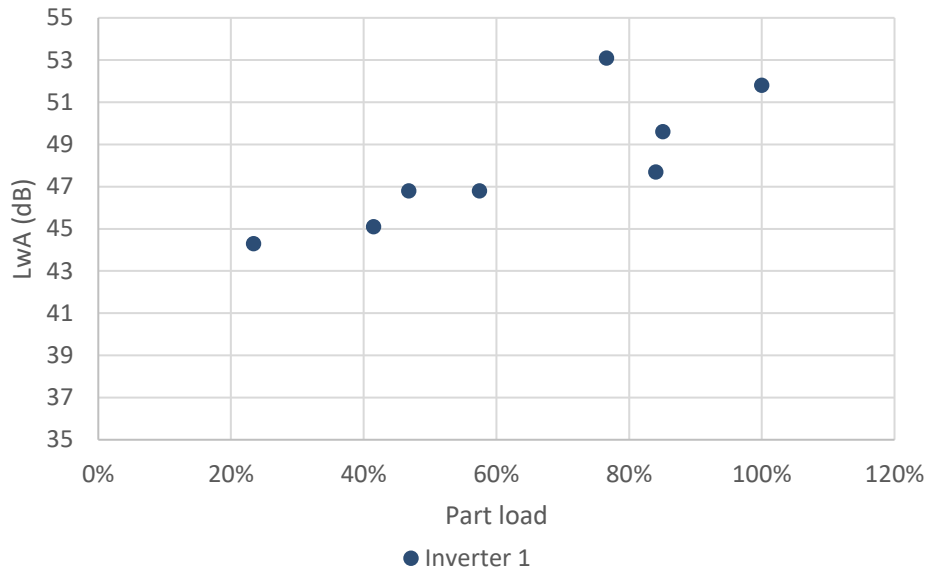




**Figur 11. A-vägd ljudeffektnivå för luft/vatten värmepumpar med inverterstyrning som funktion av kompressorfrekvens.**

### 5.3.3 Frånluft/vatten värmepumpar

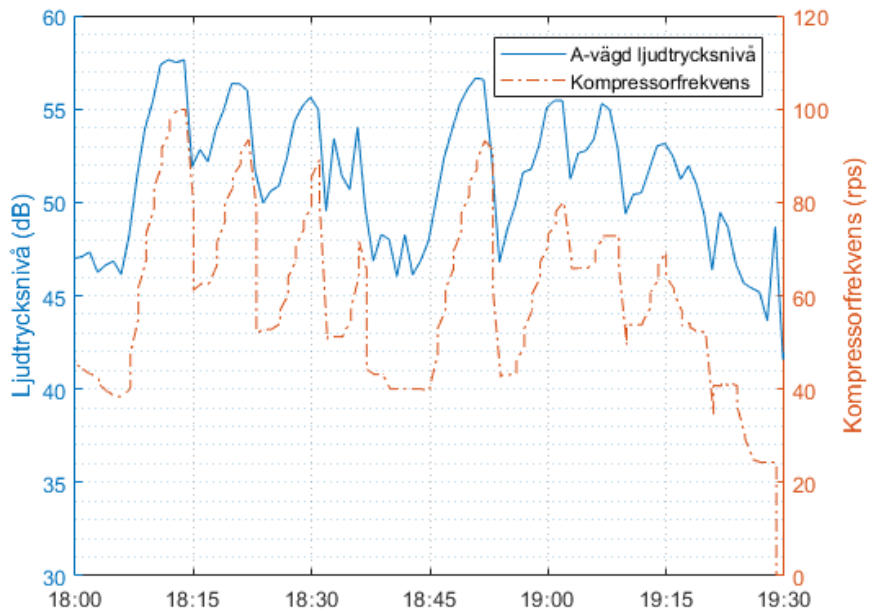
Frånluft/vatten värmepumpar har både en kompressor och fläkt som genererar ljud, men skillnaden från en luft/vatten värmepump är generellt att fläkten är mindre och sitter i en kanal. Detta gör att ljudet från fläkten påverkar mindre i relation till kompressorn. Men eftersom fläkten sitter inomhus och fläktljudet kan transporteras i ventilationssystemet blir ändå fläktljudet en viktig parameter för upplevd störning. Endast en värmepump av typen frånluft/vatten undersöktes i detta projekt och ger därmed ingen generell bild över ljudet från denna typ av värmepump. För denna modell kan vi dock se att ljudet varierar starkt med kompressorfrekvens, precis som för luft/vatten och vätska/vatten värmepumpar, vilket visas i Figur 12. Skillnaden i ljudnivå är 8-9dB från den lägsta kompressorfrekvensen till de högsta.



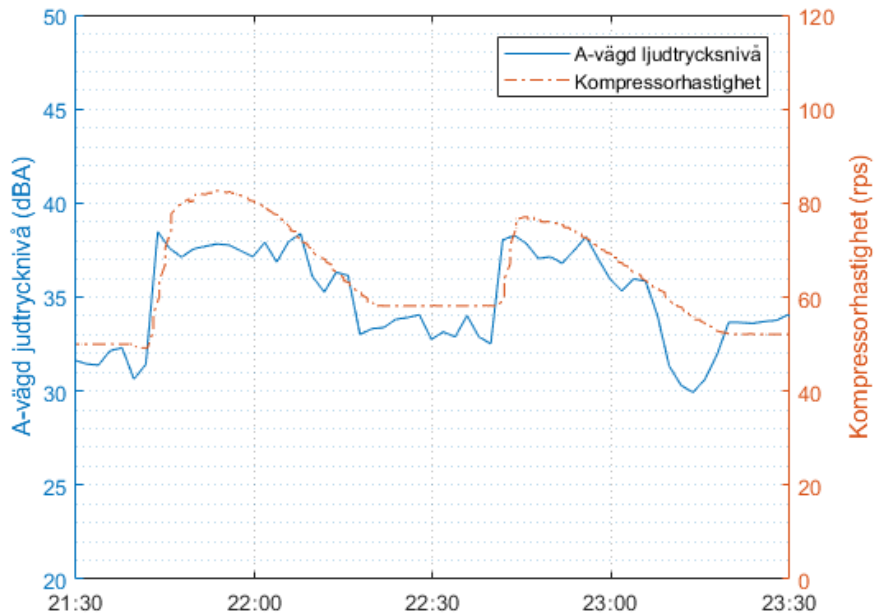
**Figur 12. A-vägd ljudeffektnivå från en frånluft/vatten värmepump med inverterstyrning som funktion av kompressorfrekvens.**

## 5.4 Ljud vid tappvarmvattenproduktion

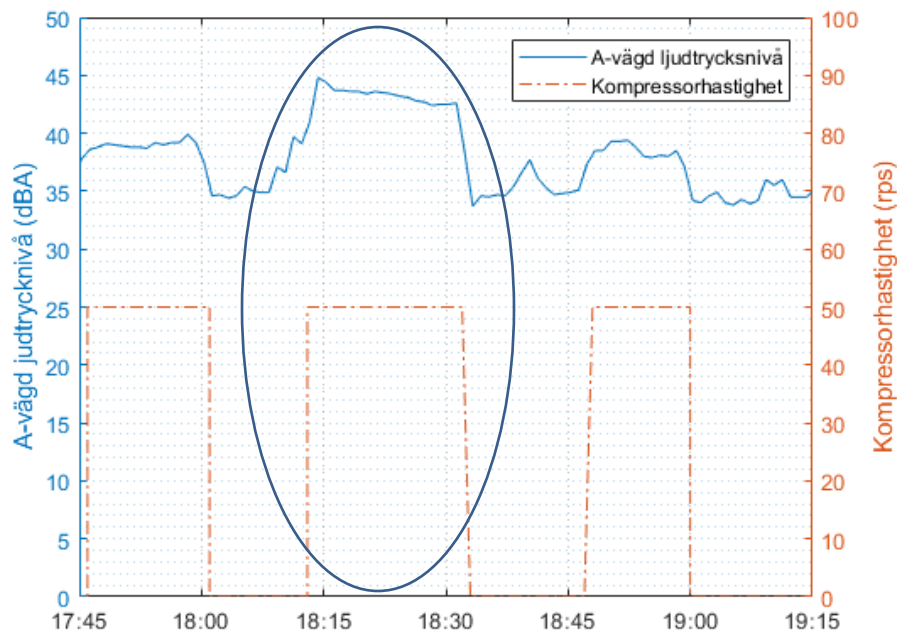
Produktion av tappvarmvatten är en cykel som startas vid behov och beteendet är även beroende av storleken på tanken i värmepumpen. Då behovet kan uppstå plötsligt behöver värmepumpen hastigt varva upp frekvensen för att kunna producera det varmvatten som behövs. Två exempel för inverterstyrd luft/vatten och vätska/vatten värmepump visas i Figur 13 och Figur 14. Vid dessa tidpunkter går värmepumparna nära max, vilket även ger en tydlig inverkan på den A-vägda ljudnivån för båda värmepumparna. Dock är inverkan lite större på luft/vatten värmepumpen pga av det tillkommande ljudet från fläkten. I Figur 15 ser vi att även för en on/off-styrd påverkas ljudet av att tappvarmvatten produceras. Skillnaden är ca 4 dBA mellan en vanlig uppvärmnings- och tappvarmvattencykel, fast att kompressorn arbetar på samma frekvens.



Figur 13. Exempel på förändringen i A-vägd ljudtrycksnivå och kompressorhastighet vid tappvarmvatten-produktion från en inverterstyrd luft/vatten värmepump.



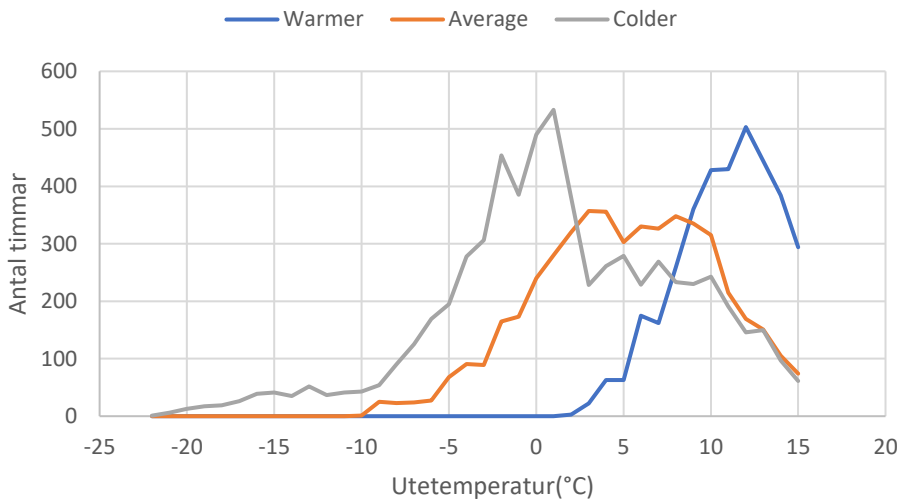
Figur 14. Exempel på förändringen i A-vägd ljudtrycksnivå och kompressorhastighet vid tappvarmvatten-produktion från en inverterstyrd vätska/vatten värmepump.



**Figur 15. Exempel på förändringen i A-vägd ljudtrycksnivå och kompressorhastighet vid tappvarmvatten-produktion från en on/off-styrd vätska/vatten värmepump.**

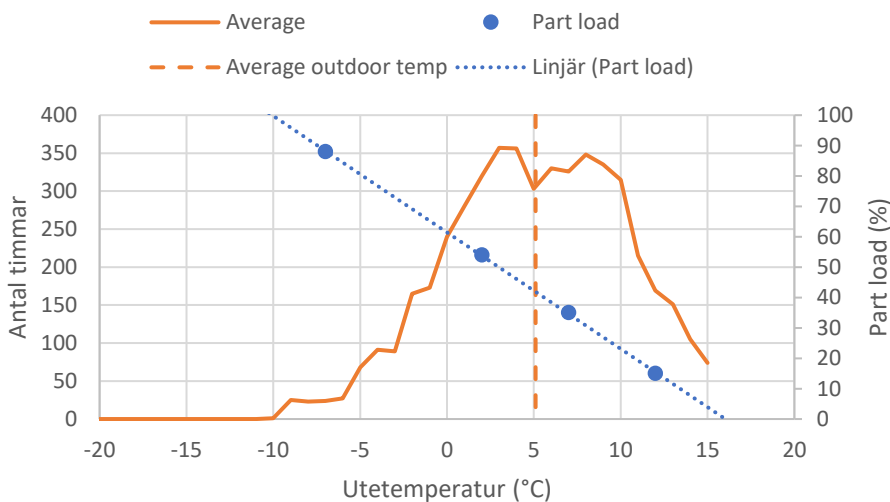
## 5.5 Säsongsviktade ljudtal

Standarden för beräkning av säsongspredanda av värmepumpar, EN14825, beskriver tre olika klimat som används vid beräkningarna, kallt, medel och varmt klimat vilket ska motsvara ett nordiskt, ett mellaneuropeiskt och ett sydeuropeiskt klimat. De tre olika klimatet visas i Figur 16 som ett antal timmar för respektive utomhustemperatur, så kallade bin-kurvor. Förordningarna för Ecodesign och Energimärkning använder endast medelklimatet för kravsättning samt prestandamärkning. De andra klimatet kan dock användas som kompletterande information för produkter som säljs på olika marknader.



**Figur 16. De klimat som beskrivs i standarden EN14825. Y-axeln anger det antal timmar som varje utomhustemperatur förekommer.**

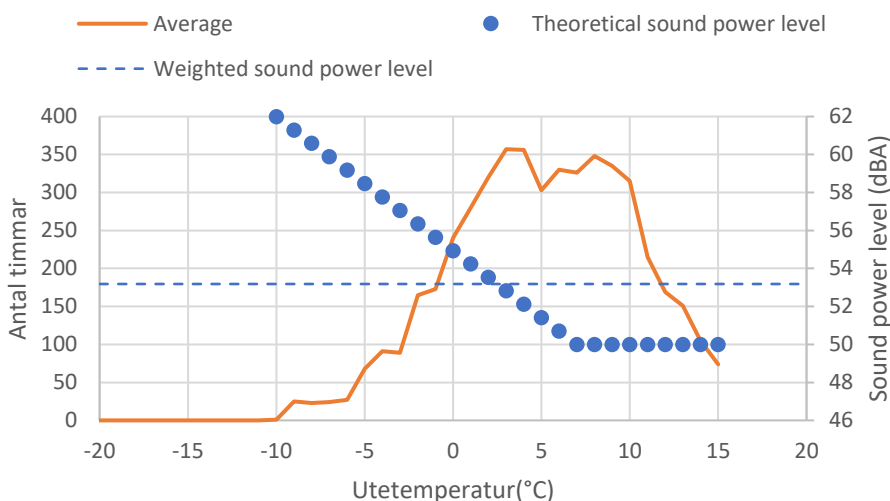
Standarden EN14825 beskriver också vilka provpunkter som ska användas för att erhålla data för beräkning av säsongsprestanda, så kallat SCOP. Dessa provpunkter är utspridda över värmepumpens normala användningsområde med en hög dellast vid låga utomhustemperaturer och tvärs om. I Figur 17 visas provpunkterna tillsammans bin-kurvan för medelklimatet.



**Figur 17. Provpunkter för bestämning av SCOP enligt 14825 och bin-kurva för medelklimat. Också medeltemperaturen (under uppvärminssäsong) på 5,1°C för medelklimatet visas.**

Labororiemätningarna resulterade i en relativt tydlig bild över hur ljudet från en värmepump (både för luft/vatten och vätska/vatten) varierar med temperatur och last, enligt avsnitt 5.3. Detta nyttjades för att beräkna ett teoretiskt säsongsviktat ljudtal. Resultaten från mätningarna visade också att en inverterstyrd värmepump ofta når sin

lågsta dellast vid ca 30% och att den därmed börjar cykla vid lägre dellaster, med nära intill konstant ljudnivå. Denna antagna lägsta dellasten (30%) gavs ett basvärde på ljudnivå (50dBA). Det antogs också att värmepumpen precis täcker den högsta värmelasten som uppkommer vid den lägsta möjliga utomhustemperaturen (-10°C i medelklimatet). Framledningstemperaturens påverkan på ljudnivån vägdes in och ljudnivån antogs därmed variera linjärt från sitt lägsta möjliga värde vid 30% last och litet temperaturlyft till sitt högsta möjliga värde vid 100% last och högt temperaturlyft (62dBA) vilket presenteras i figur 17.



**Figur 18. Ljudnivå vid olika lastfall (prickad linje) tillsammans med bin-kurva för medelklimat. Streckad linje visar beräknat säsongsviktat ljudtal på 53dBA.**

För att räkna ut ett säsongsviktat ljudtal omvandlades ljudnivån först till energinivåer för att sedan multipliceras med det antal timmar som motsvarande lastfall förekommer enligt EN14825. Energin från alla lastfall summerades och delades med totalt antal timmar under uppvärmningssäsongen för att slutligen räknas om till en medelvärderad ljudeffektnivå. Endast medelklimatet användes för denna beräkning. Som figur 17 visar blir det säsongsviktade ljudtalet 53dBA. Kurvorna skär varandra vid en utomhustemperatur på 2,5°C vilket innebär att ett ljudtest vid förhållanden (last och temperatur) som motsvarar 2,5°C bäst skulle motsvara det säsongsviktade ljudtalet. Detta ska jämföras med att ljudtester idag görs vid lastfallet som motsvarar en utomhustemperatur på 7°C vilket resulterar i en 3dBA lägre ljudnivå än det säsongsviktade ljudtalet.

En alternativ metod för att räkna ut ett säsongsviktat ljudtal användes för ett antal enskilda värmepumpar som det fanns tillräckligt med mätdata för. För dessa värmepumpar fanns mätdata motsvarande de olika testpunkterna i EN14825 samt vid standard rating condition. Därmed kunde beräkningsmetoden som beskrivs i EN14825 för SCOP användas rakt av, med skillnaden att det angavs en ljudeffektnivå för varje testpunkt

istället för en värmekapacitet och ett COP. Dessutom kunde detta medeltal jämföras med ljudeffekten som mäts enligt standard idag. För dessa värmepumpar beräknades ett säsongsviktat ljudtal för både medel- och kallt klimat. Resultaten visas i tabell 1 och man kan se att de ljudnivåerna för det säsongsviktade ljudtalet för medelklimat generellt är 3-5 dBA högre än det värde som erhålls vid mätning vid standard rating condition. För en värmepump som antas användas i ett kallt klimat kommer det säsongsviktade ljudtalet vara ytterligare 2-3 dBA högre än för medelklimat. Skillnaderna mellan standard rating och det framräknade ljudtalet är lika stora för vätska/vatten och för luft/vatten värmepumpar. Med andra ord är skillnaden mellan den uppmätta ljudeffektnivån enligt befintlig standard markant jämfört med ett säsongsviktade ljudtalet vilket är ett mer relevant värde på det ljud som upplevs över tid.

**Tabell 1. Säsongsviktade ljudtal för 5 olika värmepumpar baserat på mätdata. Jämförelse mot mätresultat enligt befintlig standard.**

Värmepumpstyp /modell	Ljudeffektnivå vid standard rating (dB(A))	Beräknat säsongsviktat ljudtal - Medelklimat	Beräknat säsongsviktat ljudtal - Kallt klimat
VVVP / inverter 1	36	40	42
VVVP / inverter 3	34	39	42
VVVP / inverter 4	39	44	46
LVVP / inverter 4	57	62	65
LVVP / inverter 5	53	56	58

## 6 Föreslagen mät- och utvärderingsmetodik av värmepumpsbuller

Den mät- och utvärderingsmetodik som föreslås i detta avsnitt tar hänsyn till att konsumenter ska få relevant information om bullret från en värmepump men också att kostnaden för metodiken måste hållas nere. Baserat på resultat som framkommit i denna studie föreslår vi att det är rimligt att ändra befintlig mätmetod för värmepumpsbuller till att mäta en ljudeffektnivå som bättre motsvarar det säsongsmedelvärderade ljudtalet. Dessutom föreslår vi mätning av den maximala ljudeffektnivån som en värmepump kan ge. En ytterligare förbättring mot nuvarande metod är att komplettera den A-vägda ljudnivån med deklaration av den C-vägda ljudnivån.

### 6.1.1 Utvärdering av ljud vid B punkten enligt EN14825

Vi anser inte att det är rimligt eller praktiskt möjligt att för varje värmepump mäta ljudnivån vid flera driftspunkter som man gör för SCOP i EN14825. Vi föreslår istället att man genomför mätningen vid ett driftfall som bäst motsvarar medelvärdet över uppvärmningssäsongen. För bäst överensstämmelse med det säsongsviktade ljudtalet ska man mäta i testpunkt B som motsvarar 2 grader i EN14825.

För luft/vatten värmepumpar finns dock en risk att förångaren fryser på vid denna driftspunkt vilket påverkar driften över tid. Det kan därmed vara svårt att uppnå "steady state" vilket är fördelaktigt för att genomföra en ljudmätning med repeterbara resultat. För luft/vatten värmepumpar skulle man därför kunna acceptera att genomföra mätningen vid 7 grader (testpunkt C) fast vid lastfallet som beskrivs för 2 grader utan att påverka resultatet nämnvärt. Detta då temperaturens påverkan på ljudet är så lågt.

För en luft/vatten värmepump har styrstrategin av fläkten en stor påverkan av hur ljudet ser ut för olika driftsfall. Det är därför svårare jämfört med vätska/vatten att få en rättvis bild av ett säsongsviktat ljud som endast är baserat på en driftspunkt. Vi anser dock att metodiken ändå bör användas för luft/vattenvärmepumpar då det är en förbättring mot befintlig metod, dock kan det vara av intresse att inkludera flera mätpunkter. Detta gäller även för indirekta luft/vattenvärmepumpar där kompressorn är placerad i inledningen. För dessa värmepumpar är ljudet från utedelen generellt något lägre jämfört en direktexpanderande värmepump och karaktären är också en annan då bullret endast består av fläktljud. För dessa värmepumpar har fläktens styrstrategi en helt betydande påverkan för hur ljudet ser ut för olika driftsfall.

### 6.1.2 Maximal ljudeffektnivå

Föreslagen ändring av driftspunkt för utvärdering av ljudeffektnivån är en förbättring mot befintlig metod. Dock ger den ingen information om hur ljudet kan variera för olika typer av drift. Vi föreslår därför att också den maximala ljudeffektnivån ska utvärderas. På detta vis ges konsumenter en chans att utvärdera hur ljudet kan vara som värst. En annan



fördel är att maxvärdet kan vara ett mer rättvist mått när man jämför on/off och inverterstyrda värmepumpar då on/off värmepumpar i princip alltid arbetar med sin högsta ljudeffektnivå.

För vätska/vatten värmepumpar bör mätningen ske vid temperaturfallet 0/55 och 100% kompressorfrekvens. För luft/vatten värmepumpar bör man istället tillåta mätning vid punkt C enligt EN14825 av samma anledning som beskrivs ovan men med 100% kompressorfrekvens.

### 6.1.3 Dynamiskt ljud

Även om ljud av dynamisk karaktär (vid ändringar i driftsfall, avfrostning mm) påverkar hur störande en värmepump anses, ser vi inte att det är praktiskt möjligt att i dagsläget införa ljudmätning av värmepumpar i transient drift. Dels är det svårt att uppnå rätt driftsfall och dels är det svårt att sammanväga störningen från de transienta ljuden med störningen som kommer från den stationära driften. Därför väljer vi att rekommendera ljudprov endast vid stationära driftsfall.

### 6.1.4 A-vägd och C-vägd ljudeffektnivå

Den A-vägda ljudnivån är ett vanligt använt mått för ljudkrav inom många områden. Samtidigt kan den vara otillräcklig för att förklara uppkomsten av störning av ljud från vissa ljudkällor. Det vi kan se hos vätska/vatten värmepumpar är att skillnaden mellan C- och A-vägd ljudnivå kan variera stort beroende av kompressorhastighet. Det finns generella riktlinjer på att om skillnaden är större än ca 15 dB, så domineras ljudet av lågfrekvent ljud-energi. Ljudkaraktären från en vätska/vatten värmepump kan uppfattas som mer tonal jämfört med luft/vatten och ljudet har mer energi i lägre frekvenser än i högre frekvenser. Lyssningsförsöket visade att personerna föredrog en snabbare kompressorhastighet, vilket även kan tolkas som att man föredrar mindre lågfrekvent ljud. Ett enkelt sätt att komplettera är att även redovisa den C-vägda ljudnivån, då det kan ge en indikation på hur lågfrekvent ljudkaraktären är.

## 7 Slutsatser

- Hos de vätska/vattenvärmepumpar som undersökts i detta projekt påverkar kompressorfrekvensen (20% jmf 100%) ljudeffektnivån med 10 dB.
- Hos vätska/vattenvärmepumpar ändras ljudnivån med ca 2dB om temperaturlyftet i systemet ändras 20K d.v.s. en betydligt mindre påverkan än kompressorfrekvensen.
- Hos de luft/vattenvärmepumpar som undersökts i detta projekt påverkar kompressorfrekvensen (20% jmf 100%) ljudeffektnivån med 12 dB.
- Förångnings- och kondenseringstemperatur påverkar sannolikt ljudeffektnivån mer än 2dB då både tryckfallet i kompressor och fläkthastighet varierar.
- Ett säsongsviktat ljudtal är ett mer relevant värde på det ljud som upplevs över tid från en värmepump jämfört med en mätning i en driftspunkt
- Skillnaden mellan den uppmätta ljudeffektnivån enligt befintlig standard är markant jämfört med ett säsongsviktat ljudtal. Skillnaden är 3-5 dBA högre för medelklimat och ytterligare 2-3 dBA högre för kallt klimat.
- För att hålla nere kostnader för ljudprov av värmepumpar bör antalet provpunkter minimeras. Men för att konsumenter ska få relevant information föreslår vi att:
  - o Ljudprov ska genomföras vid testpunkt B enligt EN14825 vilket motsvarar en utomhustemperatur på 2°C då detta motsvarar det säsongsviktade ljudtalet relativt väl.
  - o För luft/vatten värmepumpar bör ljudprov genomföras vid testpunkt C enligt EN14825 men vid samma lastfall (kompressorfrekvens) som vid testpunkt B. Detta skulle undvika problem med ev. påfrysning för luft/vattenvärmepumpar.
  - o Ljudprov av maximal ljudnivå ska genomföras för att visa på hur ljudnivån kan variera. För vätska/vattenvärmepumpar bör detta göras vid 0/55 och 100% kompressorfrekvens. För att underlätta test av maxnivån för luft/vattenvärmepumpar föreslås att test görs vid testpunkt B enligt En14825 men med maximal kompressorfrekvens.
  - o Utvärdering av den C-vägda ljudnivån som komplement till den A-vägda ljudnivån kan vara fördelaktigt då den ger en indikation på hur lågfrekvent ljudet är.
- Upplevelsen av ljudet från de vätska/vattenvärmepumpar som undersökts i detta projekt påverkas främst av kompressorhastigheten, där en snabbare kompressorhastighet föredras.

## 8 Förslag på fortsatt arbete

Mätningar på luft/luft värmepumpar samt på fler frånluft/vatten värmepumpar för att täcka in en större mängd av de värmepumpar som säljs på den svenska marknaden.

Genomföra mer lyssningsförsök än vad som gjordes inom ramen för detta projekt för att få en klarare bild av vilka ljud som uppfattas som mest störande, vilket skulle förbättra möjligheterna för att ta fram ett deklarerat mått som bättre kopplar till den upplevda störningen. Detta för att klargöra vilka parametrar hos ljudet från värmepumpar som upplevs mest störande, samt ge en indikation på hur de akustiska karaktärerna bör viktas i ett sammanvägt nyckeltal.

Det är även intressant att genomföra lyssningsförsök för att identifiera störning som uppkommer p.g.a. dynamiska förlopp, t.ex. skillnad i kapacitetsreglering (on/off, frekvensstyrning). För att undersöka om det finns möjligheter att även detta kan viktas in i nyckeltalet.

# Referenser

Altinsoy, E. (2013). "Investigations on the development of a european sound label for household appliances - psycho- acoustical aspects and challenges." Larmbekämpfung **8**(5): 192-199.

Bessac, F. (2004). How to Estimate the Sound Level of Inverter-type Air-Conditioning Units. Inter Noise 2004. Prague, Czech Republic.

Blauert, J. and U. Jekosch (1997). "Sound-Quality Evaluation - A Multi-Layered Problem." Acustica **83**(5): 747-753.

Crocker, M. J., J. P. Arenas and R. E. Dyamannavar (2004). "Identification of noise sources on a residential split-system air-conditioner using sound intensity measurements." Applied Acoustics **65**(5): 545-558.

Energimyndigheten. (2014). "Ekodesign och energimärkning - Luftkonditionering och luftluftvärmepumpar (Del av Lot 10)." Retrieved 01-09, 2015, from <http://www.energimyndigheten.se/Foretag/Ekodesign/Produktgrupper1/Luftkonditionerin g/>.

Energimyndigheten. (2014). "Ekodesign och energimärkning - Pannor (gas/olja/el) och värmepumpar (för vattenburna centralvärmesystem) (Lot 1)." Retrieved 01-09, 2015, from <http://www.energimyndigheten.se/Foretag/Ekodesign/Produktgrupper1/Pannor/>.

European Commission (2002). Assessment and management of environmental noise (2002/49/EC). Official Journal of the European Communities.

Fagot-Revurat, E. and F. Fournier (2003). Identification of main noise sources in a heat pump. Euronoise 2003. Naples: 8.

Gustafsson, O., H. Hellgren, C. Haglund Stignor, M. Axell, K. Larsson and C. Teuillieres (2014). "Flat tube heat exchangers - Direct and indirect noise levels in heat pump applications." Applied Thermal Engineering **66**(1-2): 104-112.

Gustafsson, O., H. Johansson, P. Fahlén, M. Axell and K. Larsson (2011). Noise Level in relation to Energy Performance of Air-to-air Heat Pumps. 10th IEA Heat Pump Conference 2011. Tokyo. Japan.

Holm Pedersen, T. (2001). Measurements and Judgements of Sound in relation to Human Sound Perception, Delta. **AV 1461/01**.

Jennings, P. A., G. Dunne, R. Williams and S. D. Giudice (2010). "Tools and techniques for understanding the fundamentals of automotive sound quality." Institution of Mechanical Engineers. Proceedings. Part D: Journal of Automobile Engineering **Vol.224**(No.10): 1263-1278.

Johansson, H., O. Gustafsson, K. Larsson, M. Axell and C. Teuillieres (2013). Outdoor Units Of Air-Source Heat Pumps – A Noise Investigation. Clima 2013. Prague.

Tian, J., H. Ouyang and Y. Wu (2009). "Experimental and numerical study on aerodynamic noise of outdoor unit of room air conditioner with different grilles." International Journal of Refrigeration **32**(5): 1112-1122.

## Projektets vetenskapliga publikationer

Henrik Hellgren, Ola Gustafsson, Penny Bergman, Improved measurement method for heat pumps noise, Conference article 12th IEA Heat Pump Conference 2017 Rotterdam (Appendix 2)

Slutgiltiga resultat som presenteras i denna rapport kommer att presenteras som en vetenskaplig publikation, sannolikt i samband med Clima2019 i Bukarest.

## Projektets populärvetenskapliga publikationer och presentationer

Ola Gustafsson, Metodutveckling – Utvärdering av buller från värmepumpar, Kyla+ Januari 2016

Ola Gustafsson, Metodutveckling - Utvärdering av buller från värmepumpar. Presentation under Kyl & Värmepumpsdagen i Göteborg, Oktober 2016

Ola Gustafsson, Metodutveckling – Utvärdering av buller från värmepumpar, Presentation under Effsys forskardagar i Tranås, Maj 2016

Ola Gustafsson, Metodutveckling – Utvärdering av buller från värmepumpar, Presentation under Effsys forskardagar i Tranås, April 2018



## Multidimensional scaling of experiences from geothermal heat pumps

### Introduction

About 15% of geothermal heat pump users report that noise from the heat pump is a problem (Caird et al, 2012). To minimize the level of annoyance related to the noise experience it is important to understand which acoustic parameters influence the annoyance levels. Further, it is important that the methods to report noise levels correspond to the actual annoyance. Reported listening test is the first step in a bigger project where the goal is to determine how air- and geothermal heating pumps are perceived in terms of annoyance in order to enable a better methodology to report noise levels. To determine the most salient parameters influencing perception of geothermal heat pumps and the corresponding level of annoyance a dissimilarity rating was conducted along with a preference mapping.

Dissimilarity ratings are powerful tools to obtain a multidimensional scaling of the stimuli, free of the restrictions imposed by predetermined scales or response criteria. It builds on the limited ability of the listener to only focus on a set of varying parameters (Miller and Carterette, 1975). To determine the prevalent or dominant perceptual features in different geothermal heat pumps the dissimilarity rating conducted included three different models and 10 different recordings of varying situations (3+3+4 of the three models). The corresponding multidimensional map was compared with specific psychoacoustic parameters as well as rated level of annoyance.

Few studies have been conducted on the perception and experience from geothermal heat pumps. A study by Persson Waye and Rylander (2001) compared heat pumps and ventilation systems dominated by lower frequencies (<200Hz) and heat pumps and ventilation systems dominated by mid frequencies. The results showed that people exposed to low frequency noise from heat pumps were more annoyed and had a higher level of disturbed concentration than those exposed to the noise of mid-frequency character. Wang and Novak (2010) analyzed several different heating, ventilation and air-conditioning systems, they determined that high sound levels (>50 dBA), excessive low frequency rumble and larger timescale fluctuations (e.g., a heat pump cycling on and off every 30 seconds) were the dominating characteristics influencing levels of annoyance.

### RISE Research Institutes of Sweden AB

Annoyance to mechanical systems related to heating appear to often be related to the dominance of low frequency content. Broner and Leventhall (1983) proposed using the difference between A-weighted SPL and C-weighted SPL that values greater than 20 dB would signify a low frequency noise problem. Holmberg et al (1997) suggested that the problem would occur already at 15 dB. In the present listening test three stimuli had a greater difference than 15 dB (a1, b1, and c2) whereof one had a greater difference than 20 dB (c2).

Time-varying fluctuations in a signal is proposed to be quantified as the difference between two statistical sound level measures, either L10-L90 or L1-L99, i.e. a measure of the sound level exceeded e.g., 10% of the time in L10 (Blazier and Ebbing, 1992). In the present experiment the stimuli used were only 3 seconds to comply with the experimental method thus it had little time to vary at a significant level.

**Method**

In the listening test 14 people participated, 4 women and 10 men (M= 40 years old, s.d. = 9 years). 1 participant did not comply with the instructions and was removed from further analysis. 1 participant reported hearing problems, but that did not affect the results.

*Stimuli*

Three different geothermal heat pumps were used in the experiment. Each heat pump was represented by three or four different recordings. In total 10 stimuli were utilized. All stimuli were 3 seconds long and presented at 42 dB(A). The sound pressure level choice was made as the current labelling is done using dB(A) levels instead of loudness measures.

Table 1. Psychoacoustical properties and settings for the different heat pumps.

Model	Loudness	dB(C)	Roughness	Sharpness	Compressor speed	Rated preference
a1	3.78	60.21	0.066	1.85	45	3.9
a2	3.63	55.78	0.125	1.51	50	2.8
a3	4.44	48.49	0.056	1.71	57	6.3
b1	3.65	61.85	0.018	1.25	41	4.9
b2	3.77	53.73	0.071	1.47	52	5.4
b3	4.14	50.71	0.030	1.33	110	7.0
c1	3.85	57.38	0.096	1.17	58	3.6
c2	3.92	63.49	0.062	0.88	69	6.5
c3	3.78	56.75	0.080	0.88	83	4.8



c4	3.73	48.87	0.094	1.19	100	6.3
----	------	-------	-------	------	-----	-----

*Procedure*

The listening test took place in a 3<sup>rd</sup> order ambisonics lab with little visual distraction. The sounds presented were mono sounds presented using the two front speakers. Each participant performed pairwise ratings of dissimilarities between the different sounds using a sliding scale. In addition the participants marked which of the sound in the pair s/he preferred. Using a half-matrix design (testing all possible pairs in one direction) this resulted in 45 pairs. To be noted: the participants were aware of the sounds coming from different geothermal heat pump systems as it could affect their choice of preference.

**Results**

The dissimilarity ratings were analyzed using the individual difference scaling (INDSCAL) model. The INDSCAL model assumes that all participants share the same psychological scale but attends differently to the underlying psychological dimensions (Ashby et al, 1994). An advantage with the INDSCAL model is that it provides a unique configuration solution that requires no further rotation of the model (Martens and Zacharov, 2000). The analysis resulted in a 2-dimensional model (*Stress*=.131). Stress values <.133 were considered acceptable as determined by Sturrock and Rocha (2000). The MDS solution is presented in figure 1 labelled by their model (a-c).

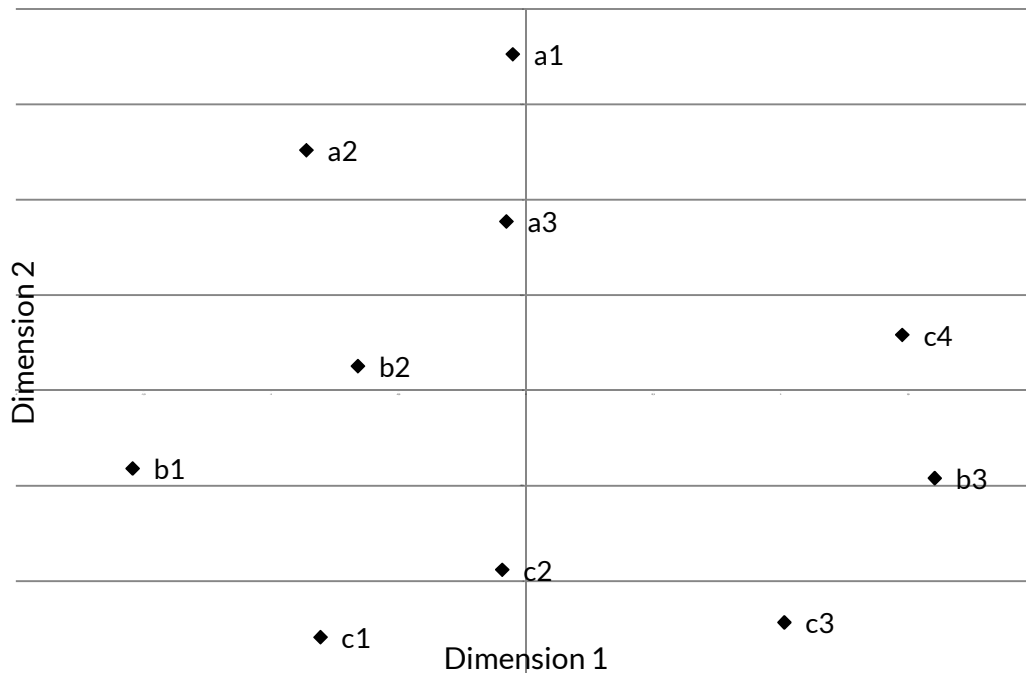


Figure 1. The MDS solution labelled by their brand.

The two dimensions were analyzed using the preference ratings of the listening test, the psychoacoustic parameters and the compressor speed. The preference ratings are listed in table 1. The results showed that Dimension 1 is partly explained by the preference mapping ( $R^2_{adj.}=.32$ ,  $F=5.2$ ,  $p<.05$ ) but mostly by the compressor speed ( $R^2_{adj.}=.83$ ,  $F=46.2$ ,  $p<.001$ ). Dimension 2 is explained by the variance in sharpness ( $R^2_{adj.}=.74$ ,  $F=27.0$ ,  $p<.001$ ). The other psychoacoustic parameters showed no significant relationship with either dimension. Regression analyses further showed that the preference mapping could be explained by both compressor speed and sharpness ( $R^2_{adj.}=.67$ ,  $F=10.0$ ,  $p<.01$ ), the participants preferred sounds with less sharpness and a compressor speed at higher frequency.

## Discussion

Little of previous research on the sounds of heat pumps have focused on other aspects than low frequency content and tonality. This experiment is a first step to further distinguish the dominating parameters to explain perception of ground source heat pumps. Creation of perceptual maps require an inter comparison between the specific stimuli used in the experiment. The result will thus depend on which stimuli are used. The aim of the experiment was to use as different heat pump sounds as possible to set a ground work for later experiments on finding the parameters explaining annoyance for heat pumps. The experiment was limited to ground source heat pumps, as we believe that air source heat pumps has a distinct different sounds, the latter will instead be evaluated in a later experiment.

The low frequency content did not influence the level of annoyance. This might seem surprising, but Kjellberg et al (1997) proposed that the difference between the C-weighted and the A-weighted SPL may be limited as predictor of annoyance when the overall noise level is too low. This could be a reason to the lack of connection between annoyance and dB(C) in present study. However, most ground source heat pumps hold a relatively low sound pressure level, indicating that dominating low frequency character might not influence the annoyance level to a higher degree.

Dissimilarity ratings require the use of shorter sound stimuli to enable comparison between presented pairs. This makes it difficult to discern whether fluctuations in the heat pumps influence level of annoyance. For future experiments longer stimuli are needed.

## Conclusion

The results showed that the most salient parameters are compressor speed and the sharpness level. Both have a significant impact on annoyance responses to the ground source heat pumps. To further evaluate whether fluctuations also influence annoyance longer stimuli are needed.

## References

Ashby, G. F., Maddox, W. T., and Lee, W. W. (1994). On the dangers of averaging across subjects when using multidimensional scaling or the similarity-choice model. *Psychol. Sci.* 5, 144–151.

Blazier, W. E., & Ebbing, C. E. (1992, July). Criteria for low-frequency HVAC system noise control in buildings. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 1992, No. 2, pp. 761-766). Institute of Noise Control Engineering.

Broner, N., & Leventhall, H. G. (1983). Low frequency noise annoyance assessment by low frequency noise rating (LFNR) curves. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2(1), 20-28.

Caird, S., Roy, R., & Potter, S. (2012). Domestic heat pumps in the UK: user behaviour, satisfaction and performance. *Energy Efficiency*, 5(3), 283-301.

Holmberg, K., Landström, U., & Kjellberg, A. (1997). Low frequency noise level variations and annoyance in working environments. *Journal of low frequency noise, vibration and active control*, 16(2), 81-87.

Martens, W. L., and Zacharov, N. (2000). Multidimensional perceptual unfolding of spatially processed speech I: Deriving stimulus space using INDSCAL. *Proceedings AES 109th Convention*, Los Angeles, CA, Preprint No. 5224.

Miller, J. R., and Carterette, E. C. (1975). Perceptual space for musical structures. *J. Acoust. Soc. Am.* 58, 711–720.

Persson Waye, K., & Rylander, R. (2001). The prevalence of annoyance and effects after long-term exposure to low-frequency noise. *Journal of sound and vibration*, 240(3), 483-497.

Sturrock, K., & Rocha, J. (2000). A multidimensional scaling stress evaluation table. *Field methods*, 12(1), 49-60.

Wang, L. M., & Novak, C. C. (2010). AB-10-019: Human performance and perception-based evaluations of indoor noise criteria for rating mechanical system noise with time-varying fluctuations (1322-RP).



## IMPROVED MEASUREMENT METHOD FOR HEAT PUMP NOISE

Henrik Hellgren<sup>a\*</sup>, Ola Gustafsson<sup>a</sup>, Penny Bergman<sup>a</sup>

<sup>a</sup> SP Technical Research Institute of Sweden, Borås, Sweden

---

**Abstract:** Today heat pump noise is evaluated as an A-weighted sound power level measured in one operating condition, normally referred to as the standard rating condition. The A-weighted level at the standard rating condition is what the consumer will read on the European energy label and the A-weighted level is the main indicator for noise pollution. However, the A-weighted level at one operating condition can give poor reflection of the actual noise, due to varying thermal load and operating states. Development of new noise indicators are needed to give the consumer better guidance of the declared noise level, as the A-weighted level can be insufficient to assess noise annoyance. This study investigates the noise behavior of air- and ground-source heat pumps, to identify the variation in noise level over time and at different loads. Both types of heat pumps have a noise character which is dominated by tonal noise in the low frequency region, a reason to use the C-weighted level for more sufficient prediction of annoyance. An indication of strong dominance of low frequency noise is given if the difference between C- and A-weighted levels is above 10 dB. The results from this study show that this is very often the case, but the C-weighted level can vary while the A-weighted level is steady. This behavior is more common with ground source heat pumps, because of the absence of masking noise from the fan. This suggests that separate evaluation methods for air- and ground-source heat pump might be needed.

© 2017 Stichting HPC 2017.

Selection and/or peer-review under responsibility of the organizers of the 12th IEA Heat Pump Conference 2017.

**Keywords: Noise, Heat Pump, Rating, Method**

---

### 1 INTRODUCTION

The information on the European energy label has many advantages. The consumer is given the possibility to make an aware choice, but the information is still easy to interpret and have useful meaning. A disadvantage with the information regarding noise is the mismatch between seasonal coefficient of performance (SCOP) and the A-weighted sound power level at standard rating condition. Compared to the SCOP the sound power level is like a snapshot of an arbitrary operating condition. The operating behavior of a heat pump is expected to be varying and cyclic, which poses a challenge of how one in a general sense evaluates noise from of heat pumps. Bessac showed that one single operating condition is not enough to evaluate the noise performance of variable capacity heat pump (Bessac 2004) and Gustafsson et al showed that the part load operation of a variable capacity air source heat pump has an important impact on the sound power level (Gustafsson et al 2011). There are also other aspects that may influence the noise experience and annoyance. Leventhall suggests in a review of low frequency sounds that time varying patterns add to the level of

---

\* Corresponding author. Tel.: +46 10-516 5604.

E-mail address: henrik.hellgren@sp.se.

annoyance (Leventhall 2004). This is of special interest when comparing fixed and variable capacity heat pumps. Variable capacity heat pumps have longer operating times and fewer stops, but also varying noise levels within an operating cycle. Fixed capacity heat pumps have a steady noise level within the operating cycle, but an intermittent control that regulates the operation. This suggests that they perhaps need to be treated differently when defining a standard rating condition. It also means that it is more difficult to define a standard rating condition for a variable capacity heat pump, if the aim of the rating is to relate to a common operating condition.

The development of new noise indicators including more variables can give the consumer better guidance and a more meaningful comparison between heat pumps. In the current project the aim is to develop a refined measurement method based on how different loads and other aspects influence the subjective experience. In this first stage of the study the focus is thus on how different analysis methods may differentiate between sounds from heat pumps.

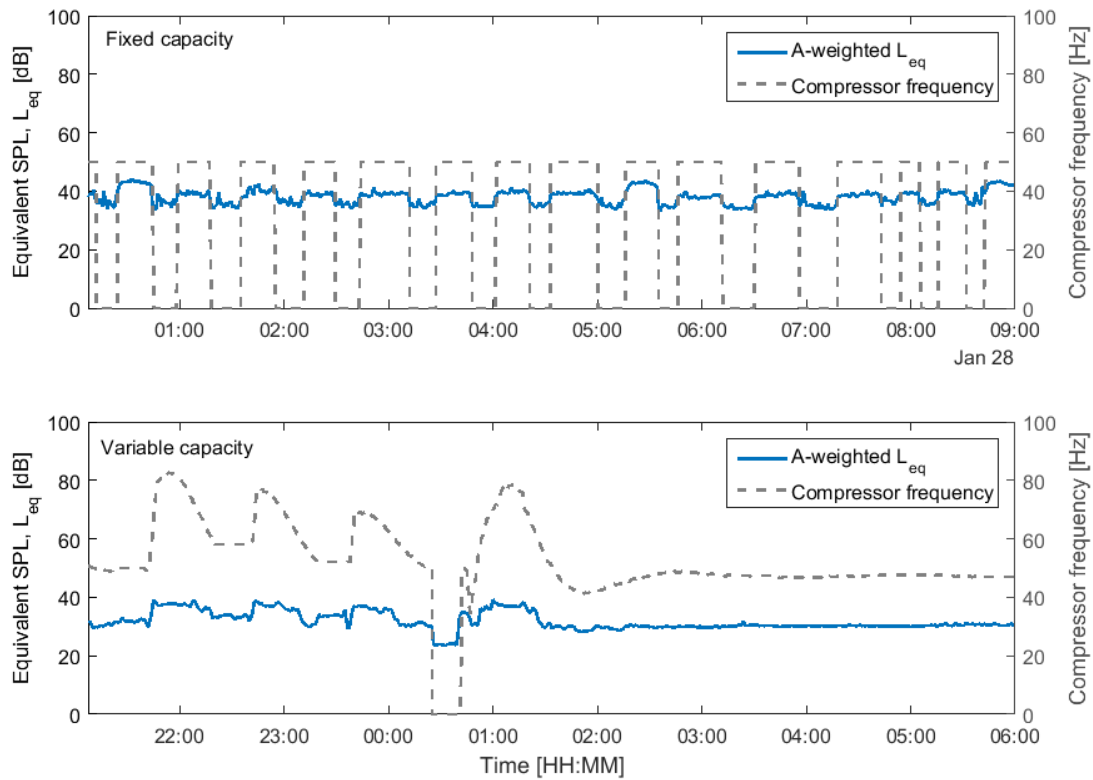
## **2 MEASUREMENT PROCEDURE**

The aim of the measurements performed in the present study was to investigate how the heat pumps sound in situ. This to get an overview on how air source and ground source heat pumps vary in noise level and characteristics over time. Heat pump noise is rated by their A-weighted level, but if there is a strong dominance of sound energy in the lower frequencies the A-weighted level can be insufficient to assess the perception of the noise. Additionally the behavior of the variable heat pump could have a direct impact on the A-weighted sound pressure level ( $L_{eq}$ ), as the A-weighting filter will suppress low frequencies when the compressor operates in the lower frequency region.

It was therefore decided to measure both the A- and C-weighted sound level and the 1/3 octave band levels. Field measurements were conducted on heat pumps installed in single family houses in Sweden during January to March. The heat pumps were monitored for 48 hours using a Norsonic 140 sound level meter was placed at 1 meter distance in front of the heat pumps and at a height of 1.2 meter.

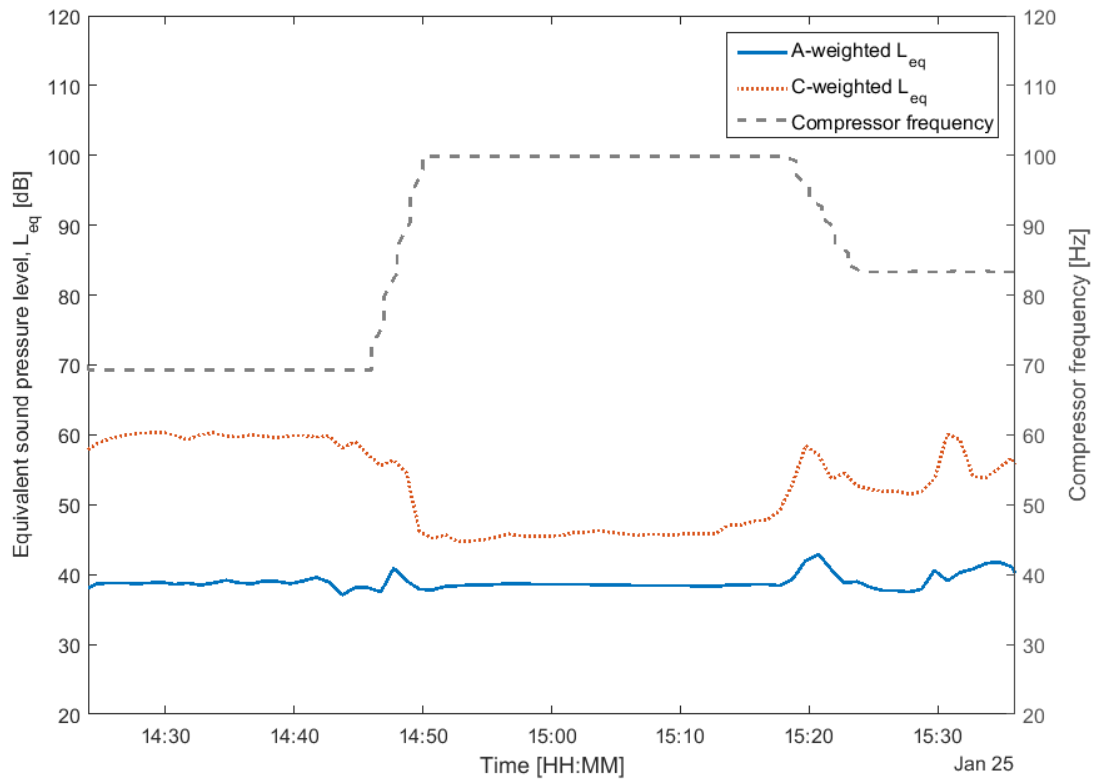
## **3 RESULTS AND DISCUSSION**

As a first step a comparison was conducted between a fixed and a variable capacity ground source heat pump. As expected the variation in compressor frequency of the variable capacity heat pump has direct impact on the A-weighted level and the operating time is also longer, see figure 1. The fixed capacity heat pump operates in shorter cycles, but with a quite stable noise level. The difference in the time variant noise level between the capacity control strategies is of importance for the perception when observed over a longer time span, but for the rating purposes the sound power level is sampled at one point in time. This suggests that the challenge in the improvement of the measurement methodology is to join these two aspects into one rating value that reflect useful meaning for the consumer.



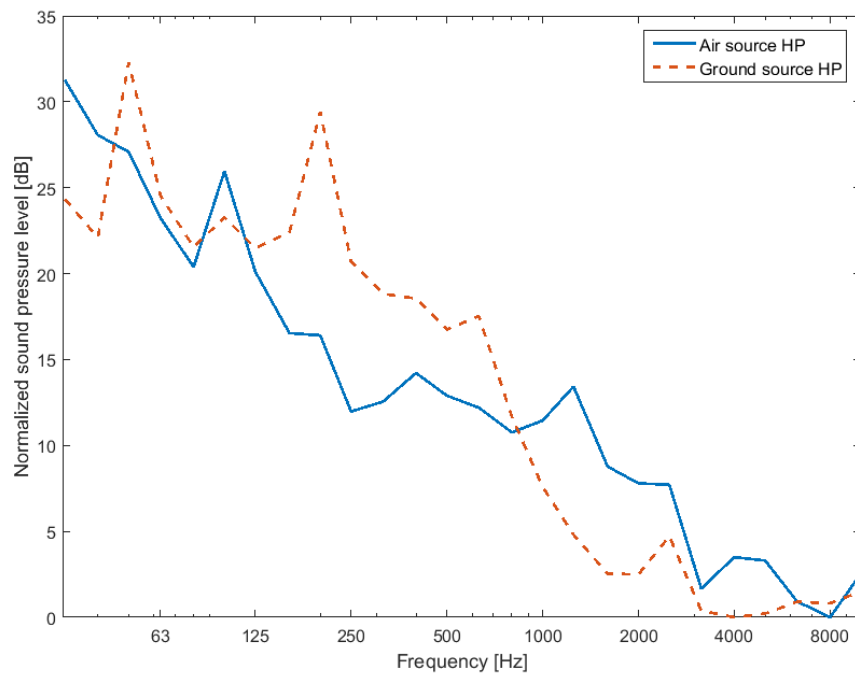
**Figure 1** The operating behaviour of a fixed (top) and a variable (bottom) capacity heat pump. The dashed line (- -) shows the operating frequency of the compressor and the solid line (-) shows the A-weighted sound pressure level ( $L_{eq}$ ).

A second hypothesis was that there might be necessary to measure not only A-weighted levels but also C-weighted levels. Heat pump noise is today rated by their A-weighted level, but when there is a dominance of sound energy in the lower frequencies the A-weighted level may be insufficient to assess the perception of the noise. A comparison between the C- and the A-weighted level can give an indication of whether there is a dominance of low frequency noise. If the difference is above 10 dB it can be assumed that the low frequency is dominating and therefore affecting the annoyance. Use of the A-weighted levels have been debated, in a larger questionnaire of residents exposed to noise from heat pumps and ventilation the dB(A) noise levels could not predict annoyance and often dB(C) levels are suggested as more relevant to this type of sounds (Persson Waye et al 2001). In a recent study on road traffic noise the low frequency content was however of less importance, suggesting that the choice of weighing might be dependent on the source of stimuli (Torija 2015). In figure 2 an operating sequence of the measure of a ground source heat pump is shown. When the compressor frequency is adjusted from 70 Hz to 100 Hz the difference between the C- and A-weighted levels is decreased to more than half of the preceding difference. Throughout the sequence the A-weighted level remains stable, but the change in the C-weighted level can have an influence on the perception of the noise. This behavior is common for a ground source heat pump, where the noise character is entirely related to the compressor. It should be noted that the measurement uncertainty is high in lower frequencies and has not been evaluated at this stage, but the results suggest that there is a clear need to further investigate the behavior of the ground source heat pump.



**Figure 2 Operating sequence of a ground source heat pump. The dashed line (- -) shows the operating frequency of the compressor, the dotted line (-·-) shows the C-weighted sound pressure level and the solid line (-) shows the A-weighted sound pressure level.**

For an air source heat pump the fan appears to have an influence on the noise level as it has a broadband noise spectrum and it can also have a masking effect on the compressor noise. This has an impact on the frequency spectrum of the noise, where the tonal character of the compressor noise is suppressed. A comparison between the 1/3 octave band frequency spectra of an air source and a ground source heat pump is shown in figure 3. The spectrum of the ground source heat pump has dominant sound energy radiated in low frequencies below 500 Hz and there is less sound radiation in the higher frequencies. There are also distinct peaks in the spectrum related to the operating frequency of the compressor, which is not as clear in the frequency spectrum of the air source heat pump. When comparing the noise spectra the dominance of the low frequencies and the attenuated high frequencies of the ground source heat pump raise questions if the A-weighted level solely is suitable for the rating of heat pump noise.



**Figure 3 Frequency spectra in 1/3 octave bands of an air source and a ground heat pump. The dashed line (- -) shows the dominance of the low frequencies of a ground source heat pump and the solid line (-) shows how the influence of the fan suppress the tonal character of the compressor for an air source heat pump.**

#### 4 CONCLUSION

Capacity control has a clear impact on time variant noise level and the adjustment of the compressor frequency of a variable capacity heat pump has an influence on the A-weighted sound pressure level. For some operating sequences of ground source heat pumps the C- and A-weighted level have a difference that indicate strong dominance of low frequency noise. The results from this study will be used in a second step of the project to evaluate the perceptual responses to different kinds of heat pumps. At this stage however the results suggest that it is of interest to further investigate the possibility to use separate evaluation methods for air source and ground source heat pumps in order to give the consumer a better ability to make an informed choice.

#### 5 REFERENCES

- Bessac F. 2004. How to estimate the sound level of inverter-type air-conditioning units. The 33<sup>rd</sup> International Congress and Exposition on Noise Control Engineering. Prague, Czech Republic.
- Gustafsson O, Johansson H, Fahlén P, Axell M, Larsson K. 2011. Noise level in relation to energy performance of air-to-air heat pumps. 10<sup>th</sup> IEA Heat Pump Conference. Tokyo, Japan.
- Leventhall, H.G. 2004. Low frequency noise and annoyance. *Noise Health*, 6:59-72.
- Persson Wayne K, Rylander R. 2001. The prevalence of annoyance and effects after long-term exposure to low-frequency noise. *Journal of Sound and Vibration*, 240(3):483-497.
- Torija A.J., Flindell I.H. 2015. The subjective effect of low frequency content in road traffic noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137 (1):189-198.