

Musikperception hos hörselskadade

SABINA ANDERSSON
och LARS GRIBBE



**KTH Datavetenskap
och kommunikation**

Musikperception hos hörselskadade

S A B I N A A N D E R S S O N
o c h L A R S G R I B B E

DM229X, Examensarbete i medieteknik om 15 högskolepoäng
vid Programmet för medieteknik 300 högskolepoäng
Kungliga Tekniska Högskolan år 2012
Handledare på CSC var Kjetil Falkenberg Hansen
Examinator var Alex Jonsson

URL: [www.csc.kth.se/utbildning/kandidatexjobb/medieteknik/2012/
andersson_sabina_OCH_gribbe_lars_K12070.pdf](http://www.csc.kth.se/utbildning/kandidatexjobb/medieteknik/2012/andersson_sabina_OCH_gribbe_lars_K12070.pdf)

Kungliga tekniska högskolan
Skolan för datavetenskap och kommunikation

KTH CSC
100 44 Stockholm

URL: www.kth.se/csc

Sammanfattning

Majoriteten av den forskning som bedrivs kring hörselnedsättning handlar om att förbättra människors talförståelse, medan musikuppfattningen ofta hamnar i skymundan. I takt med att tekniken förfinas och behovet av hjälpmedel för talförståelse i allt högre grad blir tillfredsställt, tror vi att efterfrågan av hörhjälpmedel för musikperception kommer att öka, dels bland personer som är allmänt musikintresserade men inte kan tillgodogöra sig musiken fullt ut, och dels bland yrkesmusiker som med rätt hjälpmedel skulle kunna fortsätta sitt yrkesliv även efter en hörselskada. Med anledning av detta har vi gjort en undersökning kring musikupplevelse och hörselnedsättning.

I vårt arbete har vi undersökt hur komprimering av höga frekvenser med hjälp av en multibandskompressor kan förbättra upplevelsen av musik för personer med hörselnedsättning. Undersökningen utformades som ett lyssnartest där 13 personer med hörselnedsättning fick lyssna på musik med olika grad av dynamisk komprimering av höga frekvenser. Testet utfördes i studiomiljö med hjälp av programmet Ableton Live samt Pure Data för kontroll av MIDI-parametrar. Kompressionen har skett på ett frekvensband och till största del varit verksam på frekvenser från 1500 Hz och uppåt.

Inga signifikanta resultat har framkommit om att hörselskadade som grupp uppfattar metoden som positiv, men på individuell nivå nåddes större framgång då flera personer upplevde den komprimerade musiken som mer njutbar.

Abstract

Traditionally, hearing aid tools are primarily developed for understanding speech. As the needs for assistive devices for speech intelligibility increasingly are met, we believe it is time to investigate how to improve musical experience for hearing impaired. With a closer consideration of the music criteria, one might enhance music listening for those with hearing loss. It could also be of practical help for professional musicians with work-related hearing impairment.

The aim of this study has been to investigate if the use of a multiband compressor could help to improve music listening without the presence of other hearing aids. The theory tested was whether dynamic amplitude lifting in the frequencies where hearing loss occurs would affect music perception positively. The study was conducted in the form of a listening test in a studio on a group of 13 hearing impaired persons, with the use of Ableton Live's built-in multiband dynamics compressor, and Pure Data for MIDI parameter controlling. One frequency channel was used, with a lower limit of 1500 Hz.

On a general level, as for hearing impaired as a group, no significant positive results could be found. More promising results were seen on a personal level, where several subjects found the music with compression more enjoyable.

Innehåll

1	Inledning	1
2	Teori	3
2.1	Tal och musik	3
2.2	Ljud- och musikperception	4
2.3	Örat och hörseln	4
2.4	Multibandskompressor	5
2.5	Komprimering i hörapparater	6
2.6	Liknande undersökningar och produkter	7
3	Metod	8
3.1	Parametrar	8
3.2	Musiken	8
3.3	Testprocedur	9
3.3.1	Moment ett	9
3.3.2	Moment två	11
3.3.3	Moment tre	12
3.4	Teknisk konstruktion	12
4	Resultat	15
4.1	Moment ett: jämförelse	16
4.2	Moment två: bedömning av ljudkvalitet	19
4.3	Moment tre: egen justering av parametrar	21
4.4	Övrigt	21
5	Diskussion	23
5.1	Typer av hörselnedsättning och ljudpreferencer	23
5.2	Hörapparat eller ej	24
5.3	Metodkritik och felkällor	25
5.4	Applikationer och fortsatt forskning	26
6	Slutsatser	28

1 Inledning

Det är inte alla som har möjlighet att njuta av musik. I en studie på personer med åldersrelaterad hörselnedsättning uppgav nästan 30 % av de svarande att deras hörselnedsättning påverkade deras upplevelse av musik negativt (Leek et al., 2008). Men majoriteten av den forskning som bedrivs handlar om att förbättra människors talförståelse. Hörapparater och andra hjälpmedel är i första hand inriktade på tal och i regel behandlas endast frekvenser mellan 125 och 8000 Hz. Det finns alltså ett till viss del förbiset värde i att undersöka om det med olika hjälpmedel går att förbättra upplevelsen av musik hos personer med hörselnedsättning. Värdet ligger till stor del i en höjd livskvalitet för den som är allmänt musikintresserad men inte kan tillgodogöra sig musiken så som den är tänkt. Men det skulle också kunna vara av praktisk nytta för till exempel yrkesmusiker som med rätt hjälpmedel skulle kunna fortsätta sitt yrkesliv även efter en hörselskada.

I takt med att tekniken förfinas och behovet av hjälpmedel för talförståelse därmed i allt högre grad blir tillfredsställt, tror vi att efterfrågan av den här typen av hjälpmedel kommer att öka. Som ett led i denna utveckling har vi gjort en undersökning kring musikupplevelse och hörselnedsättning. Vi har i denna uppsats tagit oss an frågan hur man kan förbättra musikupplevelsen för hörselskadade människor. Då nedsatt hörsel i de höga frekvensområdena är den vanligaste hörselnedsättningen (HRF, 2004), har vi inriktat oss på personer med denna hörselnedsättning. Mer specifikt har vi undersökt hur dynamisk komprimering av amplituden vid höga frekvenser kan påverka musikupplevelsen för dessa personer.

Frågeställningen för arbetet är:

Hur kan dynamisk komprimering av höga frekvenser påverka musikupplevelsen för en person med hörselnedsättning?

För att undersöka detta utfördes ett lyssnartest på personer ur målgruppen. I testerna användes en multibandskompressor verksam på de högre frekvensområdena. Hypotesen var att en dynamisk förstärkning, till en hörbarnivå utan att bli obehagligt hög, av de höga frekvenserna med låg amplitud kunde ge en förhöjd musikupplevelse. För att minimera felkällor fick testpersonerna inte ha hörapparater i öronen under undersökningen, och ljudnivån anpassades individuellt. Fokus i denna uppsats ligger inte i att ta fram bättre hörapparater. Istället är målet ett resultat som ökar förståelsen för att bättre kunna modifiera musiken *innan* den går ut ur högtalarna. Testpersonerna uppmanades att visa upp egna audiogram från tidigare hörundersökningar. På dem som inte hade audiogram utfördes ett hörseltest med professionell

utrustning. Audiogrammen användes sedan för att se om det fanns en korrelation mellan testresultat och hörselnedsättning. Testpersonernas audiogram, personuppgifter och övriga uppgifter har behandlats anonymt och konfidentiellt.

2 Teori

Det finns sparsamt med forskning kring musiklyssnande och hörselskadade. Den mesta av litteraturen handlar dels om forskning kring hörapparater, dels psykoakustik. Audiologen och forskaren Marshall Chasins arbete har varit centralt för detta arbete. Han har skrivit många artiklar om konkreta åtgärder till förbättrad musikanpassning av hörapparater.

2.1 Tal och musik

Om man tittar på hur musik skiljer sig från tal, är det lätt att se varför hörapparater som är utvecklade för att ge en bättre talförståelse är otillräckliga för att skapa en korrekt återgivning av en musiksigenal. Chasin nämner tre viktiga skillnader mellan tal- och musiksigenaler som måste tas hänsyn till vid anpassning av hörapparater för musiklyssnande. (Hockley et al., 2010; Chasin och Russo, 2004)

En av dessa är skillnaden i frekvensomfång och i grundfrekvens. Även om mänskligt tal kan skilja sig åt mellan individer, så är variationsmöjligheterna begränsade. Ansatsröret som formar hur rösten låter, ser i grunden likadant ut hos alla människor. Musik å andra sidan skapas från en mängd varierande ljudkällor och innehåller ofta viktig information i frekvensområden både över och under mänskligt tal. Inom talforskning används ofta analysmodellen *Long Time Average Speech Spectrum* (LTASS), vilken beskriver ett medelvärde för hur ett spektrum för mänskligt tal ser ut. Motsvarande kan göras på musiksigenaler genom *Long Time Average Spectrum* (LTAS), men då musik kan ha så pass varierande frekvensinnehåll både mellan olika typer av musik och inom ett och samma musikstycke, blir detta mått mindre relevant som riktlinje.

Nästa skillnad Chasin nämner är *toppfaktorn* (Crest factor), det vill säga förhållandet mellan korta transienttoppar och medelljudnivån över längre tidsintervall (RMS-nivå) hos tal respektive musik. I tal är denna faktor maximalt runt 12 dB, medan den i musik kan ligga runt 20 dB för vissa instrument. Därför är det enligt Chasin viktigt att man släpper igenom ljudets fulla dynamik och använder en snabb kompressor (se kapitel 2.5) efteråt. Då klipper man inte bort den viktiga informationen i topparna på ljudsignalen, vilket oftast görs i ett förförstärkningssteg i hörapparater vid ljudnivåer över cirka 85 dB.

Den tredje skillnaden är ljudnivån, vilken är viktig för hörapparater som används i livemusiksammanhang. Den är värd att nämna även om det har mindre betydelse för detta arbete. För tal i normal samtalston brukar man

räkna med ljudnivån 65 dB, för skrik upp till 83 dB. Livemusik har inte sällan nivåer runt 105 dB med toppar ända upp till 120 dB. I Sverige är Socialstyrelsens allmänna råd för lokaler och platser där hög musik spelas och personer över 13 år får vistas, att ekvivalent ljudnivå max får vara 100 dB samt att ljudnivån inte får överstiga 115 dB i topparna (Socialstyrelsen, 2005).

2.2 Ljud- och musikperception

Det finns ett antal fenomen i den mänskliga hörseln som måste tas i beaktande i det här arbetet. Ett sådant är *loudness recruitment*, där avståndet krymper mellan hörtröskeln (under vilken inga ljud uppfattas) och den ljudnivå där ljudet upplevs som obehagligt. Det kan innebära att en person med en hörtröskel på 60 dB nästan med detsamma kommer att uppleva ljuden i dess fulla styrka så snart de stiger över hörtröskeln. (Moore, 2003, p. 152) En annan dokumenterad egenskap i människans perception av ljud är att om två identiska ljud presenteras med en knappt märkbar nivåskillnad (cirka 1 dB) så upplevs nästan alltid det högre som mer angenämt. På grund av detta finns risk för misstolkning av resultat så att en modifiering av signalen ger ett positivt resultat, medan orsaken i själva verket var en skillnad i ljudstyrka (Fastl, 2005).

Upplevelsen av musik är subjektiv, och huruvida en musikupplevelse är förbättrad i jämförelse med en annan kan således inte mätas objektivt. Chasin använder sig av fem musikperceptionsskalor för att låta lyssnare bedöma hur ljudkvalitet uppfattas: *ljudstyrka* (loudness), *fullighet* (fullness, motsats: tunn), *tydlighet* (crispness, motsats: ihopflytande), *autencitet* (naturalness, i vilken utsträckning musiken låter bearbetad i efterhand) och *övergripande kvalitet* (overall fidelity). Dessa skalor är en omarbetning av dem som Gabrielsson och Sjögren (1979) kom fram till.

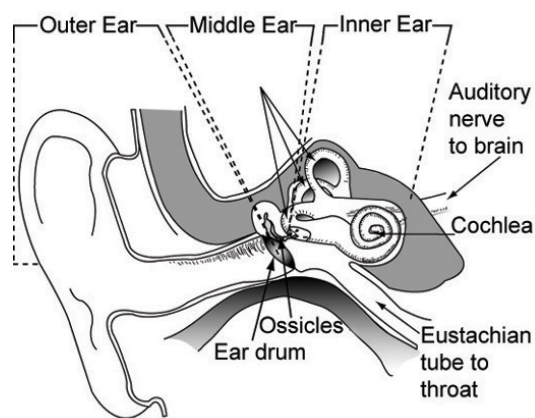
Det vanligaste sättet att dokumentera hörselnedsättning är via audiogram, vilket är ett linjediagram över hörtröskeln vid olika frekvenser. Eftersom audiogram tas fram genom att spela upp rena sinustoner och endast mellan 125–8000 Hz, är det inte alltid ett helt rättvist mått på vare sig talförståelse eller musikuppfattning. Det ger dock en uppfattning om personens typ och grad av hörselnedsättning.

2.3 Örat och hörseln

Örat består av ytterörat, mellanörat och innerörat (se figur 1). I innerörat finns cochlean (hörselnäcken) dit ljudet kommer efter att ha fortplantats via

hörselgången, hörselbenen och trumhinnan. I cochlean finns hårceller vilka är hörselns sinnesceller. De hårceller som sitter långt in i cochlean reagerar på låga frekvenser medan de närmast trumhinnan tar emot de högsta frekvenserna. Hörselnerven transporterar sedan signalerna vidare till hjärnan.

Den vanligaste hörselnedsättningen är den som kallas sensorineural, vilken beror på att hårcellerna och/eller nervtrådarna har blivit skadade (SBU - Statens Beredning för medicinska utredningar, 2003, kapitel 2). De vanligaste orsakerna till sensorineural hörselnedsättning är buller och ökande ålder men den kan även bero på medfödda skador, sjukdom och olyckor. Vid bullerskadorna är det vanligt att nedsättningen är kraftigare runt 4000 Hz (Moore, 2003). Graden av hörselnedsättning kan enligt Världshälsoorganisationen variera mellan *lätt* (slight), *måttlig* (moderate), *svår* (severe) och *grav* (profound) hörsel förlust.¹



Figur 1: Örat. Källa: Wiki Commons.

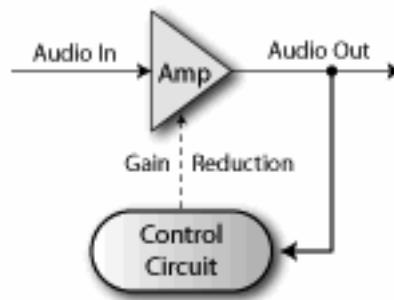
2.4 Multibandskompressor

En kompressor trycker ner ljudnivån när den blir för stark och kan dynamiskt slå på förstärkaren när ljudnivån sjunker under en bestämd ljudnivå. Detta genom att förstärkaren styrs av sin egen utsignal (se figur 2). Den nivå som bestämmer när kompressorn ska börja eller sluta arbeta kallas för *tröskelvärde*. Mängden förstärkning eller dämpning bestäms av kompressorns *ratio*, vilket är förhållandet mellan hur mycket ljudet skjuter över tröskelvärdet och hur stor dämpning man vill ha. I hörapparater ligger ration

¹http://www.who.int/pbd/deafness/hearing_impairment_grades/en/

för övre begränsning av ljudnivå vanligtvis runt 2.5:1 (Battenberg, 2007), vilket innebär att om ljudnivån överskrider tröskelvärdet med 2.5 dB, dämpas den till 1 dB över tröskeln.

En multibandskompressor använder olika inställningar för olika frekvensband. För att åstadkomma det filtreras först huvudsignalen av ett bandpassfilter för varje frekvensband som ska komprimeras, varefter en kompressor per frekvensband används. Bandpassfiltrets övre och undre gränser kallas för *brytfrekvenser*. Alla frekvenser däremellan kommer att påverkas av kompressorn.



Figur 2: Modell av en kompressor. Källa: Wiki Commons.

Ytterligare två viktiga parametrar i kompressorn är *attack* och *release*, vilka bestämmer hur snabbt kompressorn ska reagera på ett starkt ljud respektive sluta arbeta när ljudnivån är normal igen. En snabb kompressor reagerar på en ökning i ljudnivå inom cirka 20–100 millisekunder, vilket är viktigt i hörapparater för att motverka att starka ljud över huvud taget släpps igenom.

2.5 Komprimering i hörapparater

Komprimering är idag standard i hörapparater. Det är en nödvändig komponent i en hörapparat eftersom en enkel linjär förstärkning lätt resulterar i obehag vid starka ljud. Kompressorns huvudsakliga uppgift är att minska omfånget på ljudnivåerna i ljudet från omgivningen så att de passar hörseln hos en person med hörselnedsättning (Dillon, 2001).

Villchur (1973) var den första att föreslå användandet av varierande grad av komprimering vid olika frekvenser i hörapparater. Villchur och kollegor introducerade den första hörapparaten med detta inbyggt 1990 (Bernard

Becker medical library, 2009). Tack vare introducerandet av programmerbara digitala hörapparater i slutet av 80-talet är det numera standard att man som patient, på rekommendation av en audiolog, får välja mellan en- eller flerkanaliga hörapparater, där det med kanaler menas antal frekvensband (Amlani, 2008).

2.6 Liknande undersökningar och produkter

Av de fåtal exempel på liknande forskning som bedrivits kan nämnas den produkt som blivit resultatet av Chasins forskning, *Live Music Plus*. Det är ett musikprogram till hörapparater optimerat för musik i livesammanhang och bygger på de skillnader mellan tal och musik som nämnts ovan (Hockley et al., 2010).

Ett annat exempel är *Crescendo* som utvecklats av David McClain vilket var en multibandskompressor till för att hjälpa hörselskadade professionella musiker att uppfatta musiken på rätt sätt i studiomiljö (Chameleon).

3 Metod

För att finna svar på frågeställningen inriktades studien på människor i alla åldrar med en hörselnedsättning i de höga frekvensområdena. För att tekniken i hörapparater inte ska inverka på resultatet, har testen utförts utan dessa. Personerna i testgruppen har alltså varit tvungna att ha så pass bra hörsel att de kan höra musiken utan hjälpmedel, det vill säga måttlig hörselnedsättning. Rekrytering av personer till undersökningen har skett med hjälp av Hörselskadades riksförbund (HRF) i Stockholmsområdet vilka meddelade sina medlemmar via mail och Facebook. Ytterligare testpersoner hittades med hjälp av vänner och bekanta.

3.1 Parametrar

I en multibandskompressor finns flera kontrollerbara parametrar. För att underlätta analys minimerades antalet variabla parametrar och flera parametrar har varit statiska genom hela eller delar av testet. De tre variabler som ska ligga till grund för test och resultat är tröskelvärde, ratio och nedre brytfrekvens. Attack och release har valts så korta som möjligt utan att påverka ljudet negativt i form av distorsion eller andra ljudartefakter. De parametrar som är statiska genom hela testet är:

- Attack: 100 ms
- Release: 500 ms
- Övre brytfrekvens: 15000 Hz
- Ingen bandspecifik pre- och postamplifiering

Övre brytfrekvens hade kunnat uteslutas då den har liten betydelse för ljudbilden och det är mycket osannolikt att testpersonerna kan uppfatta så höga frekvenser. Den får dock vara med för rapportens tydlighet.

3.2 Musiken

Musiken har valts med tanke på att den ska innehålla relativt mycket information i de högre frekvenserna, samt ha en jämn ljudintensitet utan plötsliga ljud. Totalt användes fyra musikstycken:

Till moment ett och två av testet:

- Scarborough Fair (Simon & Garfunkel, *Parsley, Sage, Rosemary & Thyme*, Sony Music 2001) som innehåller mycket akustisk gitarr, ljus sång och cembalo

- Riddarnas dans (ur *Romeo & Julia* av Sergei Prokofjev, London Symphony Orchestra och André Previn, EMI Classics Double Fforte 1996), klassisk musik med mycket ljusa och mörka stråkar
- Did You Give the World Some Love Today (Doris, *Did You Give the World Some Love Today*, Odeon/EMI 1996), poppig 60-talslåt med mycket trummor, elgitarr och sång

Till moment tre:

- Ombra Mai Fu (Malena Ernman, G. F. Händel, *La Voix Du Nord*, King Island 2009), klassiskt operastycke ackompanjerat av stråkensemble.

För att komma fram till vilken musik och vilken komprimeringsgrad som skulle användas har analyser gjorts i den fria programvaran Audacity² på minutlånga sekvenser. Med ett 128 ms Hanning window har vi tittat på hur ljudintensiteten fördelas över olika frekvenser före och efter komprimering. I figur 3 syns en illustrerande jämförelse mellan *Riddarnas dans* före och efter en relativt kraftig komprimering. En tydlig höjning av ljudintensiteten inträder vid 1500 Hz och håller i sig ända upp till 15000 Hz. Ur respektive musikstycke användes minutlånga slingor som repeterades kontinuerligt, för att på så vis få ett så jämnt flöde av musik som möjligt genom hela lyssningen.

3.3 Testprocedur

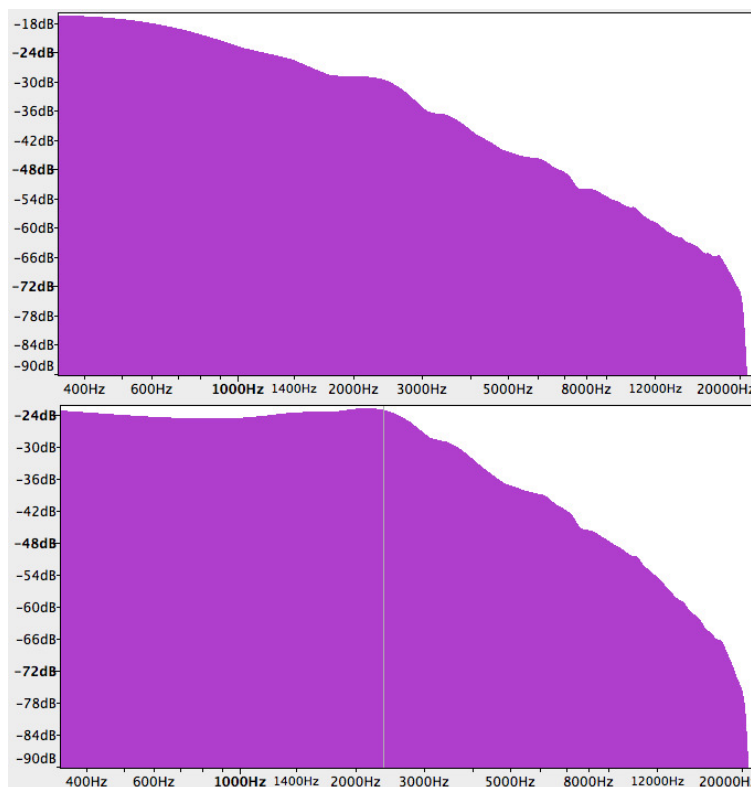
Som testmetod utvecklades ett lyssnartest som bestod av tre moment, som sen utfördes på personer ur målgruppen.

3.3.1 Moment ett

I det första momentet fick testpersonen jämföra komprimerad och icke-komprimerad musik. Tre olika musikstycken användes, vart och ett med tio olika nivåer av komprimering. Med hjälp av ett knapptryck kunde testpersonen byta mellan normal och komprimerad ljudbild. Övergången styrdes mjukt med hjälp av Pure Data³, utan att musiken avbröts. Testpersonerna noterade i ett pappersformulär vilket av ljudalternativen de föredrog med avseende på ljudkvalitet och njutbarhet. Tröskelvärdet varierade i diskreta steg om 5 dB mellan -20–0 dB, och ration pendlade mellan 1:2.5 och 1:5.3.

²<http://audacity.sourceforge.net/>

³<http://puredata.info/>



Figur 3: Figur 3a. Long time average spectrum med 128 ms Hanning window. Riddarnas dans före och efter kompression.

I *Scarborough Fair* lät vi den nedre brytfrekvensen variera för två olika grupper av testpersoner. P1–P5 fick höra musiken med en brytfrekvens på 30 Hz, med andra ord en komprimering över nära nog hela det hörbara spektrat. P6–P13 fick lyssna på musiken med nedre brytfrekvensen 500 Hz. Detta gjordes som en jämförelse för att se om skillnaden mellan olika brytfrekvenser påverkade resultatet.

Eftersom det fanns risk för att ljudnivåhöjningen på musiken vid införandet av komprimering kunde påverka bedömningen av ljudkvaliteten, försökte vi parera detta för P6–P13 testpersonerna genom en programmerad automatisk volymsänkning som är approximerad genom att vi själva lyssnat i studiomiljön. P1–P5 fick själva parera volymhöjningen endast med masterreglaget. Samtliga personer gjordes uppmärksamma på att de skulle försöka undvika att låta sig påverkas av skillnader i ljudnivå vid bedömningen av

Tabell 1: Musikperceptionsskalor, med tillhörande ställda frågor.

Skala	Fråga till testpersonen	Betyg 1	Betyg 5
Ljudstyrka	Hur starkt upplever du ljudet?	För svag	För stark
Fyllighet	Hur fyllig upplever du att musiken är?	Tunn	Fyllig
Tydlighet	Hur tydligt, eller klart, låter musiken?	Ihopflytande	Tydlig
Skarphet	Upplever du musiken som mjuk eller skarp?	Mjuk	Skarp
Klangfärg	Upplever du musiken som ljus eller mörk?	Mörk	Ljus
Övergripande upplevelse	Hur upplever du ljudkvaliteten som helhet?	Dålig	Bra

musikens njutbarhet.

3.3.2 Moment två

I moment två fick testpersonerna betygsätta musik utefter sex musikperceptionsskalor tagna bland annat från Chasins musikperceptionstester med hörapparater, se tabell 1. Vi har strukit *autenticitet* och lagt till två egna, efter inspiration av Gabrielsson och Sjögren (1979) *skarphet* och *klangfärg*. Båda dessa har relevans för att bedöma den typ av modifikation vi gör av ljudet, då en förstärkning av frekvensspektrats högre delar kan resultera i en ljusare och skarpare ljudbild. *Övergripande kvalitet* byttes ut mot *övergripande upplevelse*, för att få en benämning med mer känslomässig innebörd.

Testpersonerna lyssnade till varje musikstycke både med och utan kompression, och graderade musiken mellan 1 till 5 på varje perceptionsskala. Komprimeringen var inställd på tröskelvärde -10 dB och ratio 1:5.3. I både moment ett och två var nedre brytfrekvensen konstant 1500 Hz genom hela testen, så när som på *Scarborough Fair* där den var 30–500 Hz.

3.3.3 Moment tre

I det tredje momentet fick testpersonerna själva ändra på tre parametrar tills de tyckte att musiken lät bäst. De parametrar som gick att ändra var tröskelvärde, ratio och nedre brytfrekvens i omfånget -80–0 dB, 1:1–1:30 respektive 30–3000 Hz.

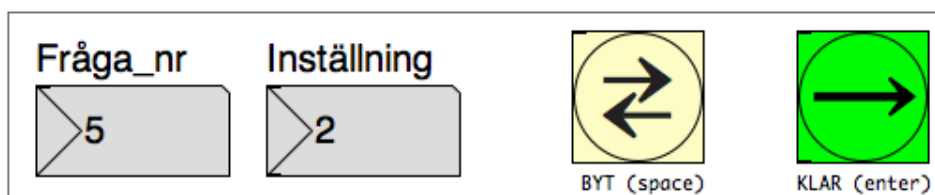
Som beskrivits ovan finns en risk för att en liten volymhöjning kan göra att musik upplevs som mer angenäm. Därför fick testpersonerna svara på följande frågor efter testet:

- Upplevde du någon skillnad i ljudnivå (volym) mellan de olika inställningarna?
- Om ja, upplevde du att skillnaden i ljudnivå störde din bedömning av ljudkvalitén?

Dessutom fick de svara på om de tyckte att något lät obehagligt under testet, samt om de betraktar sig själva som musikintresserade.

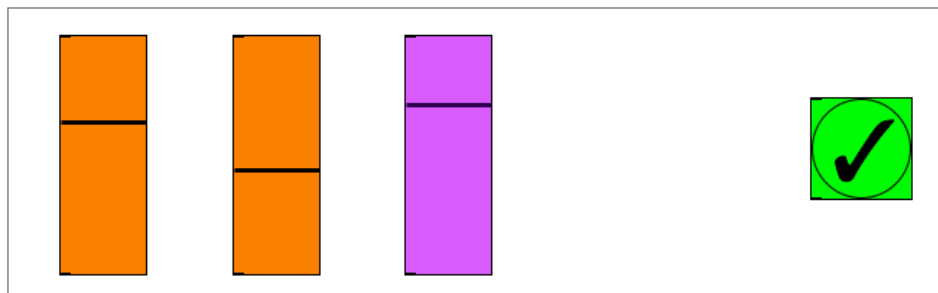
3.4 Teknisk konstruktion

Musiken spelades upp med programmet Ableton Live⁴, vars inbyggda multibandskompressor också användes. Parametrarna styrdes via MIDI från Pure Data. Som Chasin beskriver kan det ha en fördärvande inverkan på musiken om topparna trycks ner, därför behöll vi musikens fulla dynamik i detta första steg. Ett grafiskt användargränssnitt, som syns i figurerna 4 och 5, har gjorts i Pure Data till det första och sista momentet av testet. I det sista momentet har testpersonerna även fått använda en *Korg Nanokontrol2* för att styra Pure Data, se figur 6.



Figur 4: Gränssnitt för moment ett. Det visar vilken fråga man är på och vilken av de två varianterna som spelas. Med "BYT"-knappen byter man mellan komprimerad och okomprimerad ljudbild. Med "KLAR"-knappen går man vidare till nästa fråga.

⁴<http://www.ableton.com/>



Figur 5: Gränssnitt för moment tre. De tre spakarna styr tröskelvärde, ratio och brytfrekvens.



Figur 6: Studion sedd från testpersonens perspektiv. Högtalare, MacBook, Korg NanoKontrol2, Mixer.

Testen ägde rum i en inspelningsstudio med en dokumenterad efterklangstid på 0.1 sekunder och en efterklangsradi på 1.2 m på större delen av spektrat. Det ungefärliga avståndet mellan testpersonen och högtalarna

var 2 m, vilket innebär att testpersonen uppfattade en något mindre del direktljud från högtalaren än reflektioner från rumsytor. Musiken spelades upp med två aktiva högtalare (Genelec 1031A) som placerades framför testpersonen med cirka 1.5 meters mellanrum och riktades mot personen.

För att förhindra olyckor med för hög ljudvolym användes Lives inbyggda mjukvarulimiter som också förhindrade distorsion i ljudet genom att signalen inte fick överstiga 0 dB. Limitern är verksam på masterkanalen och kom således efter kompressorn i effektkedjan. Vidare användes ett mixerbord med ett masterreglage som testpersonen själv förfogade över igenom hela testet. Inkanalens gain (förstärkning) var inställd på så sätt att ljudnivån i rummet i musikens starkaste partier inte kunde överstiga 80 dB, ens med maxvolym på masterreglaget.

Tabell 2: Sammanställning av testdeltagarna. Kolumn 4-6 visar huruvida personen betraktade sig som musikintresserad (MI), upplevde nivåförändringar (F1) samt om ja på F1, upplevde att detta störde bedömningen. Kolumnen dB visar genomsnittlig ljudnivå under testet.

Person	Kön	Ålder	MI	F1	F2	dB	Grupp
P1	M	77	Ja	Ja	Nej	72	A
P2	K	63	Nej	Ja	Nej	NA	M
P3	M	70	Nej	Ja	Ja	64	M
P4	M	30	Nej	Ja	Nej	59	M
P5	M	60	Ja	Ja	Nej	58	M
P6	M	73	Ja	Ja	Ja	60	A
P7	K	67	Nej	Ja	Ja	51	M
P8	K	49	Ja	Ja	Nej	56	M
P9	M	50	Ja	Nej	-	71	A
P10	K	55	Ja	Ja	Nej	61	A
P11	M	45	Ja	Ja	Nej	72	G
P12	K	64	Nej	Ja	Ja	55	A
P13	M	22	Nej	Ja	Nej	63	A

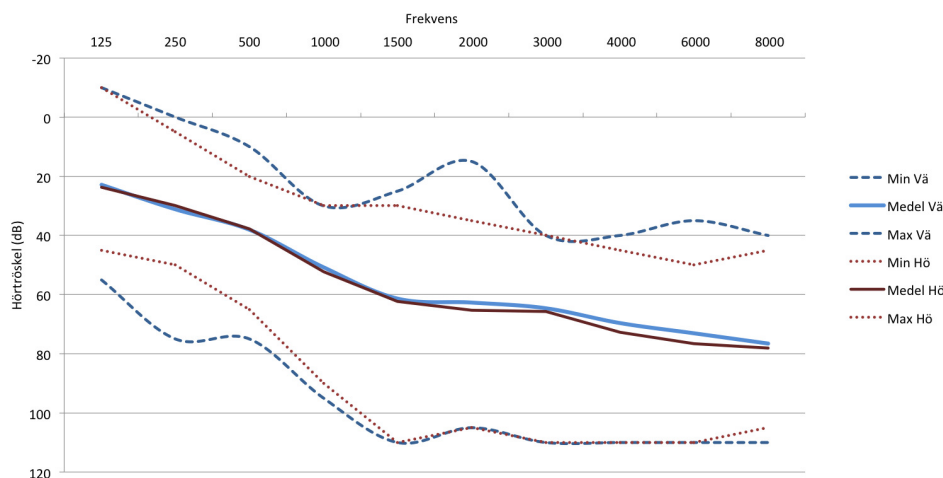
4 Resultat

Totalt 13 personer deltog i lyssnartestet. De hade olika slags hörselskador men alla hade en hörselnedsättning i de högre frekvenserna. Medelåldern på testpersonerna var 59 år, den yngsta var 22 år och den äldsta 77 år. Musikintresset hos testpersonerna varierade stort, från sporadiskt lyssnande på musik någon enstaka gång, till musiker, regelbundna konsertbesökare samt en högtalarkonstruktör.

I tabell 2 finns samlad information om testpersonernas kön, ålder, svar på följdfrågor samt medelljudnivå i studion under testet. Dessutom har en ungefärlig uppdelning av personerna gjorts utifrån deras grad av hörselnedsättning vid 2000 Hz. Där M hade mildare hörselnedsättning (hörtröskel under 60 dB) vid 2000 Hz och A hade allvarligare nedsättning vid 2000 Hz (över 60 dB). P11 har fått en egen grupp G, eftersom han hade en så pass grav hörselnedsättning.

Samtliga personer utom två hade med sig egna aktuella audiogram. På dem som saknade audiogram utförde vi själva ett hörseltest. En sammanställning av alla audiogram, med max-, min- och medelvärde visas i figur 7.

Generellt kan sägas om resultaten i samtliga moment att intrycket har varierat stort mellan olika personer, med reaktioner som innefattar allt ifrån entusiasm till oförståelse över vad skillnaden mellan inställningarna var.



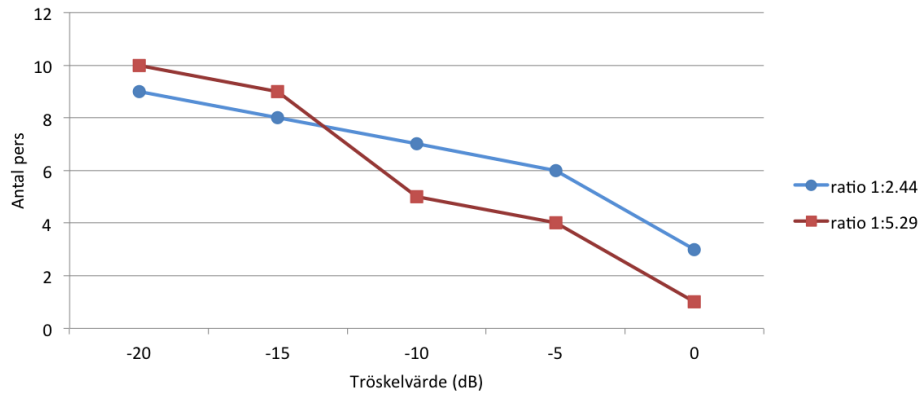
Figur 7: Sammanställning av audiogram. Med min-, max- och medelvärden.

4.1 Moment ett: jämförelse

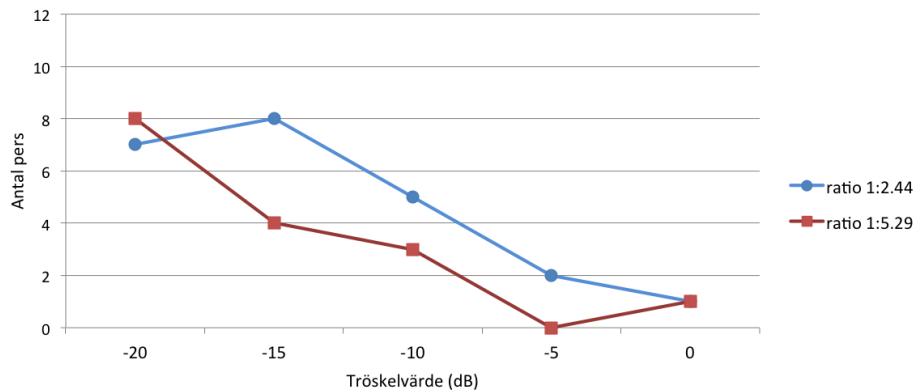
Resultaten nedan är en sammanställning av 12 personer. En person togs bort ur de samlade resultaten i moment ett då personens hörselnedsättning skiljde sig så pass mycket från de övriga. Mer om detta i kapitel 5.1.

I den inledande delen av testet har *Riddarnas dans* och *Did you give the world* haft samma parameterinställningar för alla deltagare genom hela testet (se metoddelen). I figur 8 och figur 9 kan vi se att en majoritet föredrog musik med komprimering framför ingen komprimering när denna hade ett lågt tröskelvärde, upp till -15 dB. I det klassiska stycket *Riddarnas dans* blev kurvan tydligast och lika för båda ratioinställningarna, medan den högre ration hade en negativ påverkan på njutbarheten jämfört med den lägre i popmusiken med trummorna.

När komprimeringen ökade, föredrog allt fler musiken utan komprimering. Detta berodde på att musiken uppfattades som för skarp av allt fler



Figur 8: Antal som föredrog komprimering i Riddarnas dans, moment 1

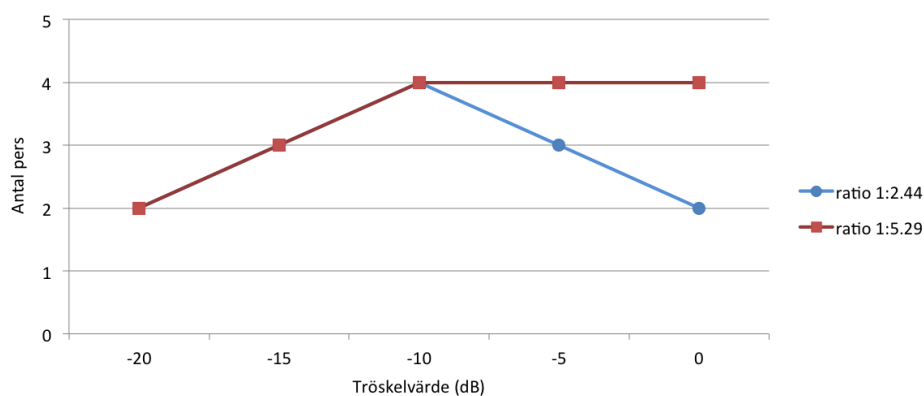


Figur 9: Antal som föredrog komprimering i Did you give the world, moment 1

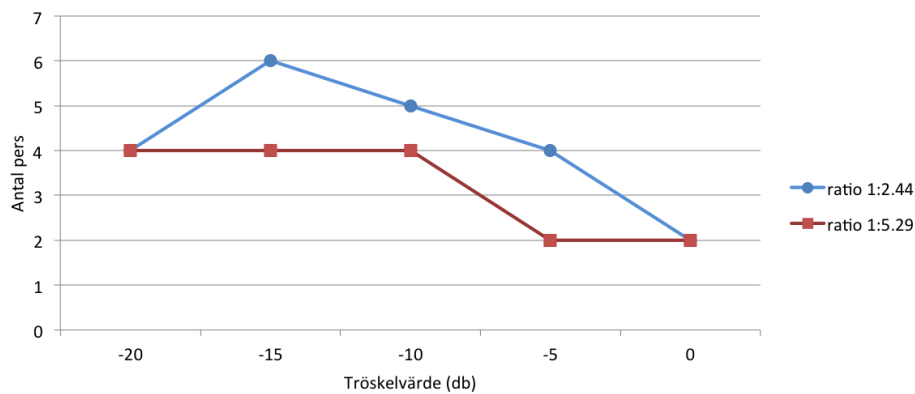
i och med stigande ratio och tröskelvärde. På följdfrågan om de upplevde obehag någon gång under testet, svarade nästan alla att vissa ljud blev för "skarpa", "vassa" eller "skärande". Ändå var det som man ser i figur 8 och figur 9 vissa som fortfarande föredrog komprimering även när den var kraftig. Några personer uppgav att de tyckte att det var svårt att höra skillnad på de två olika varianterna när komprimeringen var som lägst.

Att införa komprimering på ett så brett spektrum som gjordes i *Scarborough Fair* förändrar inte ljudets fördelning över frekvensbandet på ett hörbart sätt, utan är snarare samma sak som att höja volymen rakt av.

Detta delmoment var därför mest en referens och jämförelse med den musik där brytfrekvensen var högre. Till exempel ser vi i figur 10 och figur 11 att kurvan knappt avtar även om komprimeringen blir starkare, samt att resultaten är mer oregelbundna än i figur 8 och figur 9. Detta delmoment var också först i testförloppet, och avverkade den startsträcka som vissa personer behövde på sig för att komma in i testet och förstå vad de skulle lyssna efter.



Figur 10: Antal av P1 – P5 som föredrog komprimering i Scarborough Fair med brytfrekvens 30 Hz.



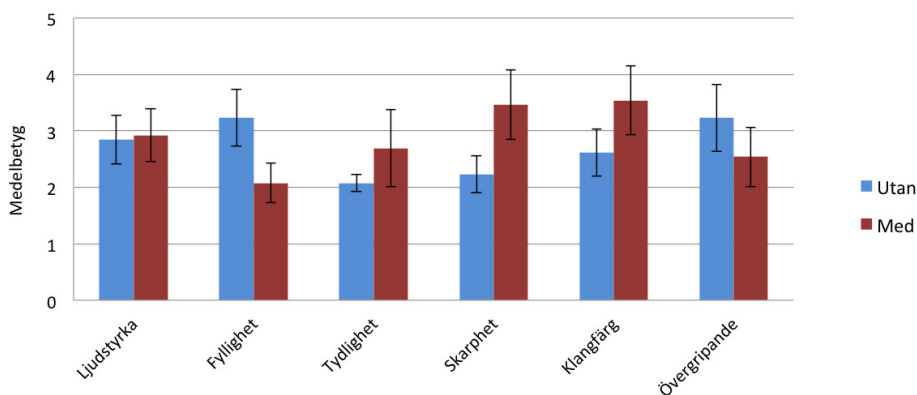
Figur 11: Antal av P6–P13 (ej P11) som föredrog komprimering i Scarborough Fair med brytfrekvens 500 Hz.

4.2 Moment två: bedömning av ljudkvalitet

I nästa del av lyssnartestet fick testpersonerna betygsätta musik med en av parameterinställningarna från moment ett av testet. Ration var då inställd på 1:5.3 och tröskeln på -10 dB. Samtliga deltagare fick betygsätta *Scarborough Fair* med och utan komprimerad ljudbild. P8–13 fick dessutom betygsätta *Riddarnas dans* med och utan komprimering. Testpersonerna fick betygsätta musiken på de sex olika betygsskalorna, enligt tabell 1, med betyg 1–5.

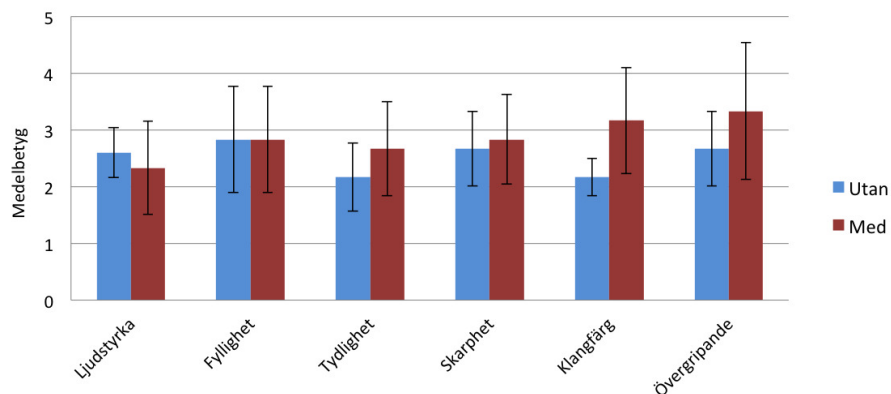
I diagrammet i figur 12 syns resultatet av det sammanlagda medelvärdet av testpersonernas betygsättning av *Scarborough Fair*. Musiken uppfattades som mindre fyllig och betydligt skarpare med komprimering. Dessutom bedömdes klangfärgen oftast som ljusare. På ”övergripande upplevelse” fick musiken utan komprimering högst betyg. Det är värt att notera att tydlighet inte nödvändigtvis behöver vara positivt för den totala upplevelsen. Enligt P6 hördes musiken tydligare med komprimering, medan njutbarheten reducerades.

Riddarnas dans med komprimering uppfattades även den som ljusare, men utan att bli skarpare. De två olika varianterna uppfattades som lika fylliga. På ”övergripande upplevelse” fick dock musiken med komprimering bättre betyg än den utan (figur 13). Även om detta delmoment endast genomfördes av sex personer, har det fortfarande relevans. Som jämförelse finns i figur 14 också vad P8–P13 svarade på det andra musikstycket i momentet.

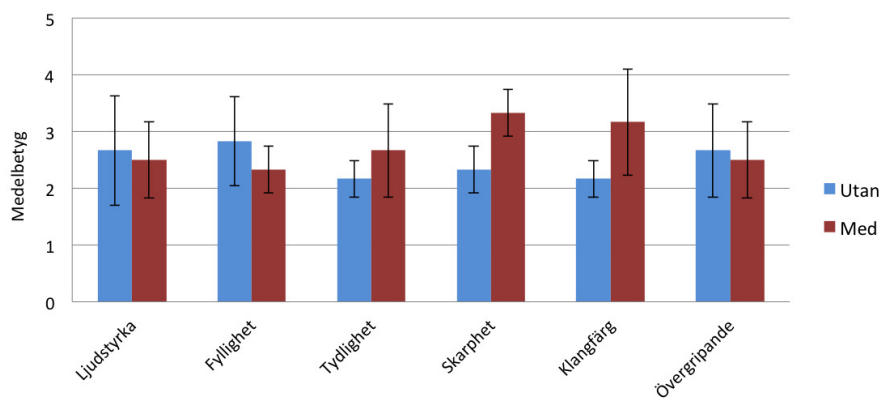


Figur 12: Medelvärde med konfidensintervall av alla deltagarnas bedömning av ljudkvaliteten hos Scarborough Fair.

Eftersom deltagarna genom hela testet själva förfogade över volymkon-



Figur 13: Medelvärde med konfidensintervall av P8–P13’s bedömning av ljudkvalitén hos Riddarnas dans.



Figur 14: Medelvärde med konfidensintervall av endast P8–P13’s bedömning av ljudkvalitén hos Scarborough Fair.

trollen, blev bedömningen av *ljudstyrka* snarare en bekräftelse på att testpersonerna hade ställt in en lagom ljudnivå. Endast i undantagsfall bedömdes ljudnivån som annat än lagom. I dessa fall var det personer som gärna ville höja volymen ytterligare men lät bli av säkerhetsskäl.

4.3 Moment tre: egen justering av parametrar

Denna del var testets mest experimentella. Testpersonerna fick själva justera tröskel och ratio samt nedre brytfrekvens. Nästan alla valde att höja både tröskel och ratio tills dess en tydlig skillnad i ljudbild inträdde. Det framkom med tydlighet att flera testpersoner upplevde en förbättring med en viss grad av komprimering. Många uppskattade att själva kunna styra kompressorn precis så att musiken bäst anpassades efter ens individuella behov. Det som uppskattades mest var möjligheten att med precision kunna ställa in kompressorn på gränsen där ljudet övergick från njutning till obehag. Vissa uppgav att de upplevde musiken på ett helt nytt sätt. Bland annat sa P1:

”Jag har aldrig upplevt musik så här bra utan hörapparat, jag trodde inte att jag kunde det.”

En annan positiv kommentar angående moment tre kom från P8:

”Det var en väldigt rörande upplevelse.”

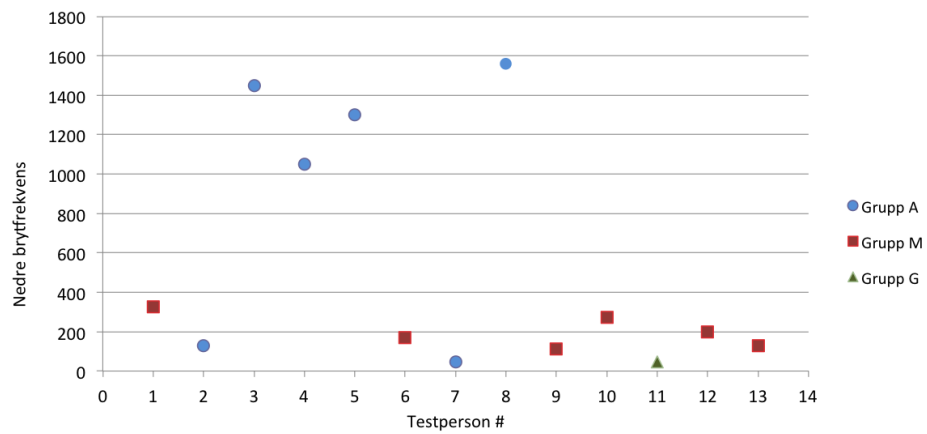
Samtidigt var det en person (P2) som uppgav att hon inte upplevde någon förändring när hon ändrade på inställningarna.

En indelning av testresultaten i två grupper utefter den grad av hörselnedsättning som audiogrammen anger, visar att de med störst hörselnedsättning valde en högre nedre brytfrekvens när de själva fick styra. Fyra personer valde brytfrekvenser över 1000 Hz. Dessa fyra tillhörde gruppen med störst hörselnedsättning (se figur 15).

4.4 Övrigt

Under testets gång mätte vi kontinuerligt ljudnivån inne i studion från ett avstånd på cirka 3 meter från högtalarna. Ljudnivån skiftade mycket mellan olika personer. Vissa ville lyssna väldigt starkt med toppar runt 80 dB, medan andra höll ljudnivån nere vid 50 dB och till och med lägre. Medel-ljudnivån för alla testpersoner låg runt 60 dB.

Inte i något av testresultaten syns någon betydande skillnad mellan dem som uppgav sig vara musikintresserade och dem som inte gjorde det. En något högre acceptans mot skarpa ljud fanns bland musikintresserade, och icke musikintresserade satte generellt högre betyg på alla skalor i moment två.



Figur 15: Deltagarnas val av brytrefvens i moment tre.

5 Diskussion

I stort kan vi konstatera att resultaten varierar mycket mellan individer, men att det finns en tendens till att någon grad av komprimering generellt skulle kunna vara gynnsam. Det som i synnerhet är intressant är möjligheten att själv med hjälp av styrparametrar kunna hålla ljudet precis nedanför gränsen mellan när musiken låter bäst och att den övergår i obehag på grund av för stark komprimering, så som möjliggjordes i moment tre. Eftersom denna gräns kan variera även inom ett och samma musikstycke, finns ett behov av mer realtidsanalys av signalen och kanske en dynamisk förändring av multibandskompressorernas parametrar.

I moment ett av testet, och i synnerhet i *Riddarnas dans*, valde en majoritet en liten grad av komprimering framför ingen alls. Detta skulle kunna ses som en bekräftelse på att musikupplevelsen förbättrades med komprimering i de höga frekvenserna. När komprimeringen däremot blev kraftigare, valde många bort den, då ljudet upplevdes som för skarpt. I kvalitetsbedömningsdelen gjorde kompressionen att många upplevde musiken som skarpare och ljusare, något som antagligen är en följd av att ljudnivån höjs i de höga frekvenserna. En jämförelse av resultatet från de två olika låtarna som användes i moment två (*Riddarnas dans* och *Did you give the world*) visar att komprimeringen uppfattades olika för olika musikstycken. Klassisk musik, som i vårt experiment representerades av *Riddarnas dans*, var mest behjälpt av komprimeringen då den fick bättre resultat på de generellt sett positiva upplevelserna klangfärg och övergripande upplevelse.

5.1 Typer av hörselnedsättning och ljudpreferencer

Många personer i vårt test uppgav att de var väldigt ljudkänsliga. Dessa personer lyssnade med svag volym (≈ 50 dB) genom hela testet, och upplevde i högre utsträckning att ljudet blev för skarpt. Detta visar på en skillnad i hur olika individer lyssnar på musik, där till exempel P9 och P11 vilka inte var ljudkänsliga gärna drog upp volymen så att de (enligt utsago) kände musiken i kroppen. Ljudkänslighet hos hörselskadade yttrar sig oftast som *loudness recruitment* och är kanske något som skulle kunna kompenseras för på en individnivå, så som i moment tre av testet. Personer med högre grad av hörselnedsättning valde generellt att ställa in en starkare ljudnivå, ibland dessutom i kombination med en bedömning av ljudnivån som för låg. Men det finns undantag från detta vilket troligen beror på ljudkänslighet. Dock finns inget som tyder på att vald ljudnivå har något direkt samband med resultatet.

En person (P11) hade mycket högre grad av hörselnedsättning än övriga deltagare (personen var döv på frekvenser över 250 Hz). Då det visade sig att den automatiska volymsänkningen gjorde att de låga frekvenser som personen kunde uppfatta försvann samtidigt som ljudnivåbortfallet inte kunde bli kompenserat för i höga frekvenser, modifierade vi brytfrekvensen under testets gång. På grund av detta har personens resultat uteslutits från sammanställningen av resultatet i moment ett. P11 upplevde att sångerskans röst försvann när brytfrekvensen gick över ett visst värde (≈ 180 Hz) och att musiken då blev mindre njutbar. Det var enligt många testpersoner viktigt att sångrösten kom fram ordentligt, och att det ibland var tvunget att göra en avvägning mellan vad som var viktigast att koncentrera inställningarna på utav stråkarna och sångstämman.

Det blev också tydligt vilka olika typer av ljud som enskilda individer bedömer som njutbara. Vissa bedömde musiken som mer njutbar när musiken hade ett stort innehåll av mörka toner (som exempelvis uttrycktes av P5), medan andra upplevde en förbättring vartefter ljusa frekvenser framträdde. Vi kan inte se något samband mellan detta och personernas audiogram eller val av ljudnivå. Vissa personer upplever också olika ljudegenskaper så som tydlighet som positivt medan andra tycker att det försämrar upplevelsen.

5.2 Hörapparat eller ej

Nästan alla testpersoner uppgav att de, när eller om de lyssnar på musik i vardagen, gör detta med hörapparat. Vissa kunde i konsertsituationer ta av sig hörapparaten, då hörslingor⁵ ibland innebar mer besvär än hjälp (P10), samt att hörapparaterna ibland inte gav tillräckligt skydd mot höga transienter.

Eftersom att vi ville undvika den felkälla som lyssning med hörapparater hade medfört och därför genomförde testen utan dessa, innebar testet en annorlunda lyssningssituation för flera av testpersonerna. Många visste inte till en början hur hög ljudnivå de kunde använda utan att vi, de normalhörande testledarna som satt i samma rum, skulle uppleva ljudet som för starkt. Personerna uppmanades dock att välja en ljudnivå som var till *deras* bekvämlighet.

⁵Elektromagnetiska förstärkningssignaler som tas emot av hörapparater, finns installerade i de flesta stora konsertsalar där ljudnivån kan bli låg långt ifrån scenen.

5.3 Metodkritik och felkällor

I frågor som ställdes efter testet sade fyra av personerna att de kände att de hade blivit påverkade av att musiken tycktes förändras i volym då inställningarna ändrades. Tre av dessa (P6, P7, P12) hade automatisk volymsänkning. En automatisk volymsänkning är alltså inte det självklara valet för den här typen av test. Personer med kraftig hörselnedsättning i de högre frekvenserna kunde med automatisk volymjustering uppleva att musiken i själva verket sänktes, då de inte uppfattade nivåskillnaden i de höga frekvenserna, utan bara hörde att en del av basen försvann. Volymskillnaderna är med andra ord individuella, och i konstruerandet av den här typen av test krävs en avvägning mellan att försöka motverka att den totala ljudnivån höjs och att de frekvenser som inte komprimeras blir svagare. Dessutom är människan mer känslig för förändringar i ljudnivå i lägre frekvenser, varför det kanske vore lämpligt att mäta dessa när man gör automatiska förändringar i ljudnivå, särskilt då vissa personer bedömer låga frekvenser som mest njutbara. På själva resultatet går det inte att se någon skillnad mellan dem som fick automatisk volymsänkning och dem som inte fick det.

Det finns flera felkällor kring musikvalet som kan ha påverkat resultatet både i positiv och negativ riktning. Att viss typ av musik får bättre resultat än annan har redan slagits fast, och troligtvis hade vi fått ett annat resultat med annat musikval. Dessutom förekom kommentarer från exempelvis P2 och P11 om att musiken var ”dålig” eller inte passade deras smak. Givetvis finns en risk att detta påverkar resultatet i en annan riktning än för de personer som uppskattade musiken eller, som till exempel P9, hade kvar känslan av hur musiken lät sedan innan deras hörselskada inträffade. Man skulle kunna tänka sig ett scenario där testpersonerna själva hade fått välja musik som de vanligtvis lyssnar på.

Hur länge man ges möjlighet att lyssna på ett musikstycke har också påverkan på vad som upplevs som njutbart. P6 uttryckte svårigheten i att bedöma musik på basis av några sekunders lyssnande, eftersom musiklyssnande är en längre process och njutning eller obehag inte nödvändigtvis inträder direkt. P4 sade, efter en lång stund vid moment tre av testet, att han hade kunnat ”sitta hela dagen” i jakten på den perfekta inställningen.

Ytterligare felkällor värda att nämna är högtalarplacering, hur testpersonernas sinnestillstånd påverkas under testets gång samt osäkerhet kring kvaliteten på viss utrustning. Det sistnämnda gäller i synnerhet Lives inbyggda kompressor som vi inte hittat någon dokumentation om mer än positiva utlåtanden i musikerforum.

5.4 Applikationer och fortsatt forskning

Enligt P8 var studion en idealisk lyssningsmiljö som inte återspeglar en naturlig situation. Men att vidareutveckla den prototyp som användes i testet till en modul för användning på en stereoanläggning för hemmabruk eller till musiker och producenter i arbetsmiljö är ändå en möjlig fortsättning. En sådan applikation skulle behöva föregås av ytterligare forskning, dels för att fastställa att det finns ett behov, dels för att avgöra vilka inställningar som skulle vara nödvändiga för att en personlig kalibrering skulle bli optimal. En sådan produkt skulle för bäst resultat kräva att en person kunnig i både audiologi och akustik var med vid installationen. Flera testpersoner skojade om hur mycket deras närstående och grannar fick utstå av hög musik. Det finns dock ett visst allvar i detta, och om det finns svårigheter i att med en vanlig equalizer åstadkomma en ljudbild som varken skär vid starka diskantljud, eller dundrar på med de låga frekvenser som vanligtvis är de som fortplantar sig genom lägenhetsväggar, skulle en lösning med en multibandskompressor kunna vara ett alternativ. Det skulle också vara intressant att undersöka hur detta skulle kunna appliceras i lyssning med hörlurar.

Under tiden för detta projekt har vissa frågor dykt upp. Dessa skulle kunna vara föremål för fortsatta undersökningar inom området. Här följer några exempel.

Eftersom vi inte anpassat undersökningarna efter personernas audiogram, skulle detta kunna vara en intressant fortsättning. I kombination med detta skulle man kunna testa olika mycket kompression på olika frekvensband. Med hjälp av det skulle man kunna undersöka dels om människor med väldigt ojämn kurva upplever musiken bättre vid mer partiell komprimering. Eventuellt skulle man kunna se om man kan kompensera nedsättning i vissa frekvenser genom starkare komprimering i närliggande frekvenser där hörseln är bättre.

Ett av de största problemen som framkom i vår undersökning var att så många uppgav att de upplevde att musiken flöt ihop. Detta är ett vanligt problem hos ljudkänsliga personer och något som borde undersökas ytterligare. Till exempel blir förståelsen av sjungen text lidande för väldigt många av dessa personer. I våra resultat bedömdes tydligheten som bättre med komprimering, men generellt var denna förbättring inte bra nog. En undersökning av detta skulle kunna bygga på en analys av musikens spektrum snarare än, eller eventuellt i kombination med, audiogram.

Slutligen vore det intressant med en insamling av mer kvalitativ data, till exempel genom små fokusgrupper. Mycket i vår undersökning pekar på att det finns gemensamma nämnare mellan personer med liknande hörselskador,

samtidigt som själva lyssnandet varierar stort från person till person. Om den här typen av undersökningar i slutändan ska kunna leda fram till en praktisk applikation behövs slutanvändarnas åsikter tas i beaktande. I vårt test gavs till exempel deltagarna ingen möjlighet att under lyssningen beskriva ljudbilden med egna ord, vilket i efterhand skulle kunna ha varit givande eftersom de ibland hade åsikter om ljudet och till exempel beskrev det som ”burkigt” eller ”svajigt”, men då inte kunde hänvisa till vilken del av testet dessa upplevelser inträffade.

6 Slutsatser

Resultatet av detta arbete kan bidra med kunskap av både kvalitativ och kvantitativ karaktär. Den huvudsakliga slutsatsen är att olika individer blir behjälpta till olika grad av den typ av komprimering som vi använt på musiksignalen. Vissa personer upplever en mycket stor förbättring av musikupplevelsen, medan andra snarare upplever en försämring eller ingen skillnad alls. Generellt anser en övervägande del att någon grad av komprimering förbättrar musikupplevelsen, och att kraftig komprimering gör att musiken upplevs som för skarp. Den positiva effekten är störst när personerna själva får styra kompressorns värden. Av dem som upplever en förbättring finns stora individuella skillnader i hur hög grad av komprimering samt vilken brytfrekvens som föredras.

Vad som avgör vilka ljudegenskaper en person uppfattar som njutbara i musik är inte helt självklart, men har troligen ett samband med ljudkänslighet och typ av hörselnedsättning. Andra faktorer som kan spela in är vilken typ av ljud man föredrar i musik samt vana att lyssna på musik utan hörapparater.

Resultatet pekar mot att en högre grad av anpassning av ljudsignalen till varje enskild persons vanor och preferenser är en fördel för musikupplevelsen. Ytterst få generella slutsatser går att dra om hur multibandskompression kan påverka musiklyssning positivt för alla hörselskadade. Däremot finns många enskilda exempel.

Referenser

- A. M. Amlani. Multichannel Compression Hearing Aids: Perceptual Considerations. *The Asha Leader*, 2008. URL <http://www.asha.org/Publications/leader/2008/080304/f080304b.htm#2>.
- E. Battenberg. Optimizing the Hearing Aid Musical Experience. In *19th International Congress on Acoustics, Madrid, Spain, Sep 2007*. Electrical Engineering and Computer Science at UC Berkeley, 2007. URL http://www.eecs.berkeley.edu/~ericb/school/hearing_aid_music07.pdf.
- Bernard Becker medical library. Timeline of Hearing Devices and Early Deaf Education, 2009. URL <http://beckerexhibits.wustl.edu/did/timeline/index.htm>.
- Chameleon. Developer interviews. URL <http://www.chameleon.synth.net/english/developers/interviews.shtml>.
- M. Chasin och F. A. Russo. Hearing Aids and Music. *Trends in Amplification*, 8(2):35–47, June 2004. ISSN 1084-7138. doi: 10.1177/108471380400800202. URL <http://tia.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/108471380400800202>.
- H. Dillon. *Hearing Aids*. Thieme, New York, NY, 2001. ISBN 9781588900524.
- H. Fastl. Psychoacoustics and Sound Quality. *Methods*, pages 139–162, 2005. doi: 10.1007/3-540-27437-5_6. URL http://dx.doi.org/10.1007/3-540-27437-5_6.
- A. Gabrielsson och H. Sjögren. Perceived sound quality of sound reproducing systems. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 65(4):1019–1033, 1979. URL <http://link.aip.org/link/?JASMAN/65/1019/1>.
- N. Hockley, F. Bahlmann, och M. Chasin. Programming hearing instruments to make live music more enjoyable. *The Hearing Journal*, 63(9), 2010. URL http://journals.lww.com/thehearingjournal/Abstract/2010/09000/Programming_hearing_instruments_to_make_live_music.6.aspx.
- HRF. Hörselnedsättning - vad beror det på?, 2004. URL http://www.hrf.se/templates/Page2x1___3896.aspx.

- M. R. Leek, M. R. Molis, L. R. Kubli, och J. B. Tufts. Enjoyment of Music by Elderly Hearing-Impaired Listeners. *Journal of the American Academy of Audiology*, 19(6):519–526, June 2008. ISSN 10500545. doi: 10.3766/jaaa.19.6.7. URL <http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article&issn=1050-0545&volume=19&issue=6&spage=519><http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19253784>.
- B. C. Moore. *An Introduction to the Psychology of Hearing*. Emerald Group Publishing, Cambridge, 2003. ISBN 978-0125056281.
- SBU - Statens Beredning för medicinska utredningar. Hörapparat för vuxna – nytta och kostnader. Technical report, 2003. URL <http://www.sbu.se/upload/Publikationer/Content0/1/horsel/horselfull.html>.
- Socialstyrelsen. SOSFs 2005:7 Socialstyrelsens allmänna råd om höga ljudnivåer, 2005. URL <http://www.socialstyrelsen.se/sosfs/2005-7>.
- E. Villchur. Signal processing to improve speech intelligibility in perceptive deafness. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 53(6):1646, June 1973. ISSN 00014966. doi: 10.1121/1.1913514. URL <http://dx.doi.org/10.1121/1.1913514><http://link.aip.org/link/JASMAN/v53/i6/p1646/s1&Agg=doi>.

