



**KTH Aeronautical
and Vehicle Engineering**

Slutrapport EMFO projekt

Buller från drivsystem

Diarenr. AL90A 2008:15363

Mats Åbom
KTH 2009-03-17

1. Projektets bakgrund

För vägtrafik i bebyggda områden och tätorter (hastigheter < 50 km/h) dominerar buller från drivsystem. Detta är särskilt fallet vid acceleration (insugnings/ avgasbuller) samt vid låg fart då kylfläktbuller kraftigt ökar. En trend är att bygga in (skärma) olika bullerkällor på ett fordon men det accentuerar då aerodynamiskt buller från drivsystem dvs ljudemission från insugnings/avgassystem samt kylarfläkt. Utveckling av bättre och effektivare lösningar för dessa system som kan uppfylla strängare ljudkrav kombinerat med krav på minskad vikt/volym samt fiberemission är syftet med detta projekt.

1.1 Projektets tidsplan och upplägg

Projektet som ursprungligen var planerat för 3 år förlängdes och genomfördes till sist under 4 år. Arbete har varit en kombination av forsknings- och utvecklingsarbete uppdelat på följande huvudområden:

- i)** förbättrad metodik för akustisk design av kompakta insugningssystem baserad på att källdata för motorer kopplas till linjära akustiska FE/BE modeller;
- ii)** nya lösningar för "kompakt" ljuddämpning baserat på aktiv kontroll av lågfrekvent ljud;
- iii)** nya lösningar för luftljudsdämpning utan fibrer baserat på s.k. mikro-perforerade plåtar med tillämpning på bla kylfläktar och ljuddämpare.

Arbetet har utförts av 2 doktorander, en anställd vid KTH och en industridoktorand från Volvo CC. I tillägg har seniorforskare vid KTH-MWL varit inblandade samt experter från de deltagande företagen.

Nedan följer en genomgång av det arbete som genomförts inom vart och ett av de ovannämnda tre huvudområdena.

2. Ljud från insugningsystem

Magnus Knutsson, Volvo Car Corporation

2.1 Inledning

Ljudet som utstrålar från en förbränningsmotors luftintag orsakas av samma mekanism som avgasljudet, dvs av kolvarnas oscillerande rörelse inuti motorblockets cylindrar. Skillnaden är att cylindertrycket är mycket högre då ljudet släpps ut genom avgasventilerna jämfört med insugningsventilerna samt att avgaserna givetvis är heta och leds från motorn emedan den kalla insugningsluften sugas in till motorn. Dock är insugningsljudet så pass starkt att det vid vissa körfall bidrar starkt till fordonets utstrålade ljudeffekt. Mest ljud utstrålas då gasspjället är helt öppet och fordonet accelererar maximalt. Det så kallade förbipassage-lagkravet reglerar hur mycket fordonet får låta för detta körfall. Då bidraget från insugningsljud är så pass starkt att fordonet inte uppfyller lagkravet måste ljudreducerande tillgripas. Då detta oftast uppdagas sent i utvecklingsprocessen är lösningarna ofta mycket kostsamma och kan dessutom reducera effektiviteten på motorn negativt med ökad bränsleförbrukning som påföljd. Syftet med detta projekt har varit att utveckla nya, förbättrade metoder att prediktera insugningsljud och därmed möjliggöra tidig optimering.

2.2 Prediktering av linjära akustiska källdata med icke-linjär gasväxlingsberäkning

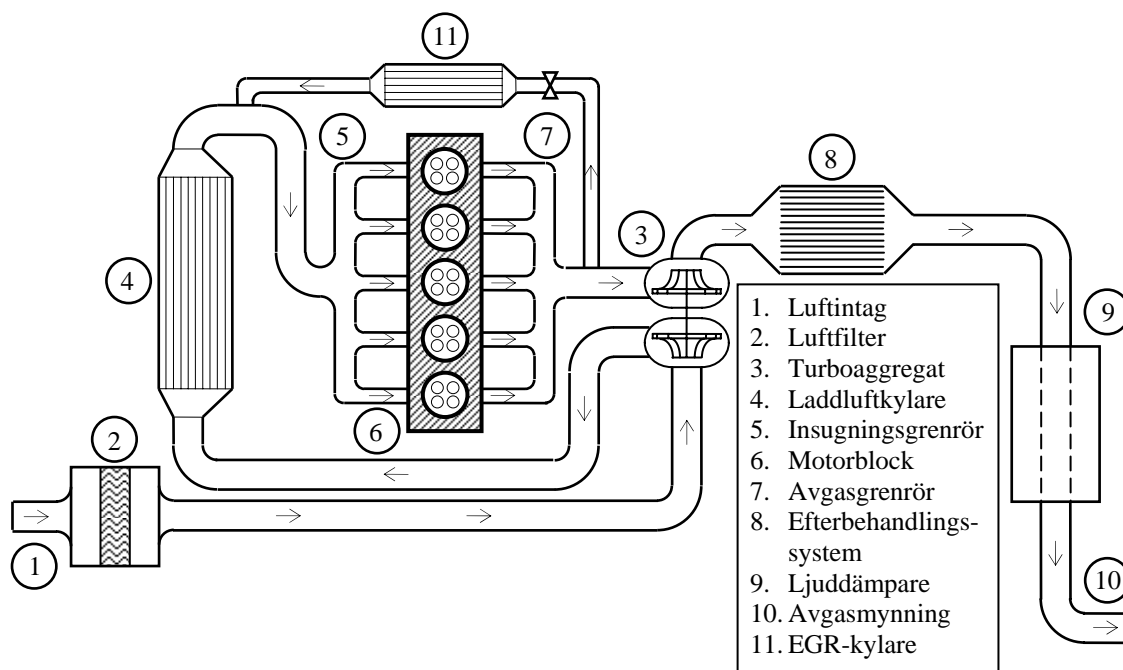
I designarbetet för att uppnå önskvärd motorprestanda är det vanligaste verktyget så kallad icke-linjär gasväxlingsberäkning. Med hjälp av numeriska beräkningsmetoder simuleras luftens väg genom motorn. En biprodukt är att de ljudvågor som finns i insugnings- och avgassystemet också predikteras, men med en noggrannhet som inte alltid är tillräcklig. Framförallt begränsas noggrannheten på dessa prediktioner av komponenter med stora volymer, stora förluster och stor krökning. Traditionella metoder för ljuddesign, där varje frekvenskomponent studeras separat, har inte dessa begränsningar och är dessutom avsevärt snabbare då de görs under linjärt antagande. Nackdelen ligger här istället i att en ljudkälla måste ansättas. Denna är som regel okänd. Detta delprojekt har visat att man via gasväxlingsberäkning kan extrahera källdata som därefter kan användas vid linjär akustisk analys. Dessa källdata beskriver dels styrkan på motorns ljud samt hur infallande ljud reflekteras. Ett stort antal mätserier på motor i rigg har utförts för att validera noggrannheten som har påvisats vara relativt god.

2.3 Validering av källdata + linjär transmission + utstrålning

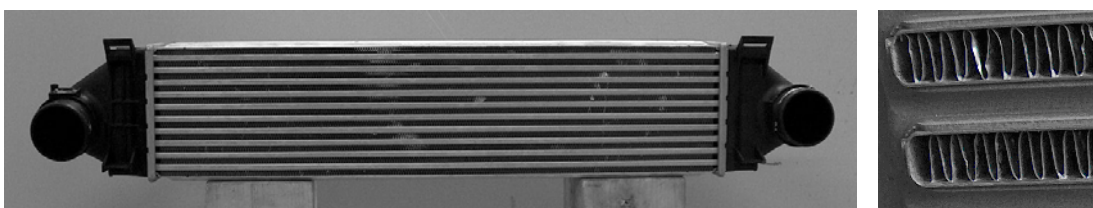
Nästa steg i projektarbetet har varit att validera att det går att prediktera det ljud som strålar ut från insugningsmynningen med den tidigare framtagna källmodellen kopplad till linjär akustisk analys. En tredimensionell numerisk akustisk beräkningsmodell av ett luftfilter med tillhörande slangar och ljuddämpare har skapats för detta ändamål. Vidare har ytterligare ljudmätningar på motor med motsvarande luftfiltersystem gjorts i rigg och en klar förbättring har konstaterats för de frekvenser där gasväxlingsberäkning visar dålig noggrannhet. Den föreslagna modellen visar därmed potential för att kunna användas vid fortsatt designarbete.

2. 4 Laddluftkylare som ljuddämpare

Överladdade motorer är ofta utrustade med laddluftkylare (intercooler) för att ytterligare förbättra deras prestanda, se Figur 2.1 och 2.2. Syftet med denna komponent är att kyla, den av turbo-kompressorn trycksatta, luften för att därigenom möjliggöra att ytterligare luft tillförs motorn. I Figur 2.1 visas laddluftkylarens läge i förhållande till andra vitala komponenter i gasväxlingssystemet på en överladdad personbilmotor. Som kan ses måste det ljud som skapas av motorn passera laddluftkylaren, turbokompressorn och luftfiltret innan det strålar ut vid luftintaget. För att uppnå erforderlig bullerreducerande prestanda, i kombination med så små energiförluster som möjligt skall givetvis alla dessa tre komponenter optimeras tillsammans. Samoptimering görs idag med avseende på motorprestanda men ej avseende buller. Kunskapen om laddluftkylarens och turbokompressorns egenskaper vad gäller ljudtransmission är hitintills relativt outforskade. I detta projekt har därför en ny akustisk modell för laddluftkylare utvecklats. Ljuddämpningen i en laddluftkylare kan i princip härledas till två fenomen: utsläckande reflektioner orsakade av area förändring och kapillära förluster i de smala rör där värmeöverföringen sker. Båda fenomenen beaktas i den aktuella modellen. För att validera modellen under realistiska förutsättningar har mätningar gjorts i en speciell rigg där ljud skapas med högtalare och luftflöde med en fläkt. Data från den nyutvecklade modellen visar god överensstämmelse med experimentella data.



Figur 2.1. Schematisk bild av gasväxlingssystemet på en överladdad personbilmotor

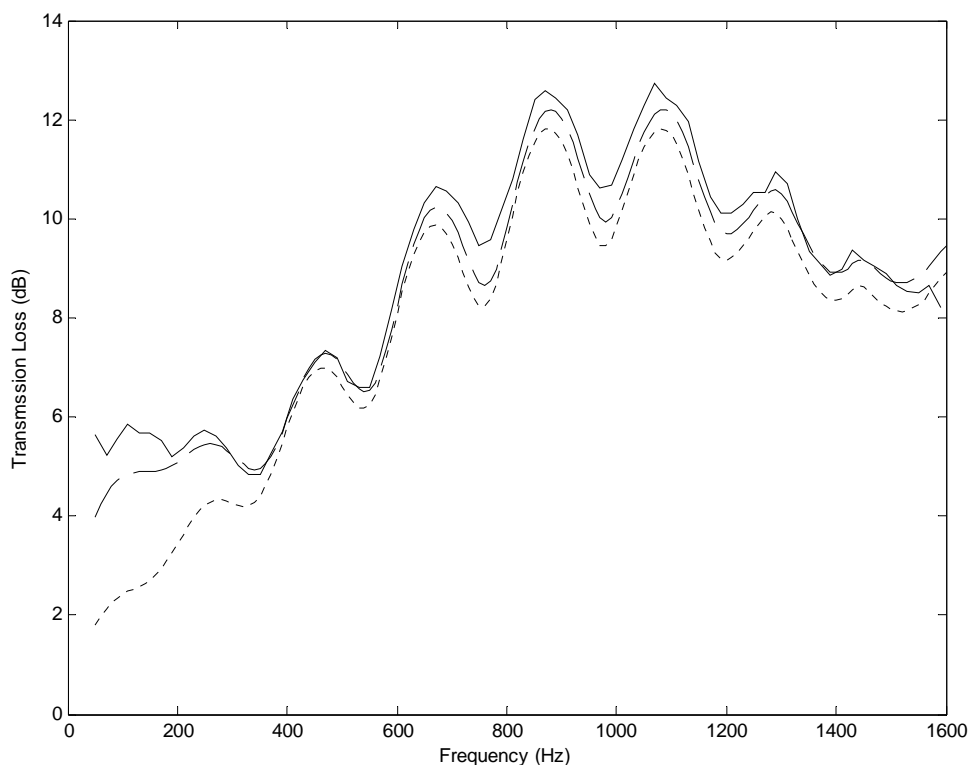


Figur 2.2. Vänster bild: Laddluftkylare. Höger bild: interna kylkanaler.

2.5 Ny modell för dämpning orsakad av turbulens

I arbetet med den nya modellen för laddluftkylare konstaterades att gynnsam extra lågfrekvent ljuddämpning uppstod när laddluftkylaren genomströmmades med luft med hastigheter av storleksordningen 30 m/s, vilket är relevant för dess tilltänkta användning tillsammans med personbilmotorer. För att reducera lågfrekvent ljud krävs generellt ljuddämpare med stora volymer, vilka därmed är utrymmeskrävande, dyra och svåra att passa in i ett motorrum. Att hitta nya, mindre utrymmeskrävande åtgärder som dämpar ljud med låga frekvenser är därmed av mycket stort intresse.

Den extra ljuddämpning på 3 - 4 dB som uppmättes i frekvensområdet 50 - 400 Hz för laddluftkylaren, se Figur 2.3, har konstaterats bero på växelverkan mellan turbulens och ljudvågor. Existerande modeller för detta fenomen är enbart giltiga för förhållandevis grova rör och ger därför mindre bra noggrannhet för de smala rören i laddluftkylaren. En ny modell som beaktar växelverkan mellan turbulens och ljudvågor i smala rör har därför utvecklats. Validering har gjorts dels mot existerande vetenskaplig data och dels mot experimentella data för laddluftkylaren. Noggrannheten är mycket god vilket kan ses i Figur 2.3.



Figur 2.3. Ljuddämpning (Transmissionsisolering) i dB för laddluftkylaren i Figur 2.2. —, Uppmätt; ---, Ny modell (med turbulens), ····, Tidigare modell (utan turbulens)

2.6 Nytt angreppssätt för att implementera uppmätta data för enskilda komponenter vid gasväxlingsanalys

I de fall då relevanta analytiska data, representerande ljudtransmission för en komponent, saknas kan det vara av intresse att införskaffa dessa genom experimentella tekniker och därefter implementera dessa i befintliga analysverktyg. Uppätning görs med fördel med högtalare som ljudkällor och representeras därefter som en så kallad 4-pol (två-port). Att därefter nyttja dessa i akustik linjär analys är en standardprocedur. Däremot verkar tids-implementering i gasväxlingsberäkning vara en oprövad metod. Det avslutande delprojektet har undersökt huruvida det är möjligt att göra detta via de digitala filtreringsmetoder som används t ex vid studier av elektriska växelströmskretsar. Studien har gjorts med den kommersiella gasväxlingsprogramvaran GT-Power som används av majoriteten av fordonstillverkarna i Sverige, kopplat till det generella analysverktyget Simulink där de matematiska operationerna utförs tidsdiskret. För det mycket enkla fallet med ett luftfilter format som ett rätblock med ett filterpapper monterat i mitten har mycket goda resultat uppvisats. Ljudkällan har i det initiella testförsöket utgjorts av en högtalare som utstrålar en frekvenskomponent i taget. Ytterligare studier behöver göras för att säkerställa att metoden fungerar tillfredsställande i en komplett gasväxlingsberäkning där ljudkällan består av en förbränningsmotor som avger flera övertoner till motorns grunvarvtal. Om dessa studier faller väl ut kan avsevärt förbättrade ljudpredikteringar åstadkommas med relativt enkla medel samt tillgång till ovannämnda programvaror som representerar industristandard.

2.7 Referenser

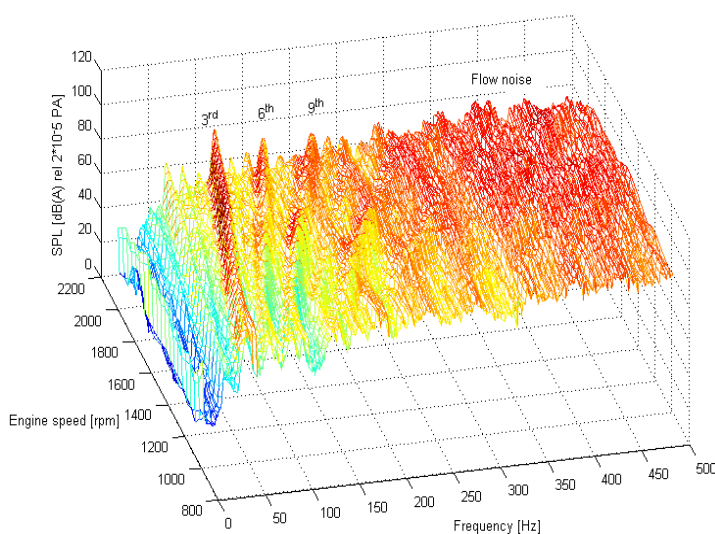
- [2.1] M. Knutsson (2007), "IC-engine intake noise predictions based on linear acoustics", Lic. Tech. thesis KTH, TRITA-AVE 2007:70.
- [2.2] M. Knutsson and M. Åbom (2008), "Sound propagation in narrow tubes including the effects of viscothermal and turbulent damping with application to charge air coolers", *J. of Sound and Vibration* 320, pp. 289-321.
- [2.3] M. Knutsson, H. Bodén, IC-Engine Intake Acoustic Source Data from Non-Linear Simulations, *SAE Technical Paper 2007-01-2209*, 2007.
- [2.4] M. Knutsson, M. Åbom, Acoustic analysis of charge air coolers, *SAE Technical Paper 2007-01-2208*, 2007.
- [2.5] M. Knutsson (2009), Doctoral thesis to be presented in June 2009.

3. Nya metoder för kontroll av lågfrekvent avgasljudd

Mikael Karlsson, KTH

3.1 Bakgrund

Lågfrekvent avgasbuller är en av de huvudsakliga ljudkällorna på ett nyttofordon. För att dämpa motorordningarna som är den dominerande komponenten till den totala ljudnivån krävs en viss akustisk volym. För att möta kommande emissionsmål för tunga fordon måste ett antal platskrävande efterbehandlingsteknologier implementeras. De installeras i det utrymme som historisk har varit reserverat för ljuddämparen. Följaktligen finns det ett behov att utveckla mer packningsintensiva ljuddämparkoncept. För att vara konkurrenskraftigt måste ett koncept också erbjuda bra bränsleekonomi, d.v.s. ha lågt mottryck och låg vikt. I Figur 3.1 ses ett typiskt vattenfallsdiagram vid ett varvtalsvep för en lastbil. Man ser tydligt motorordningarna.



Figur 3.1. Typisk ljudnivå vid ett varvtalsvep för en tung lastbil.

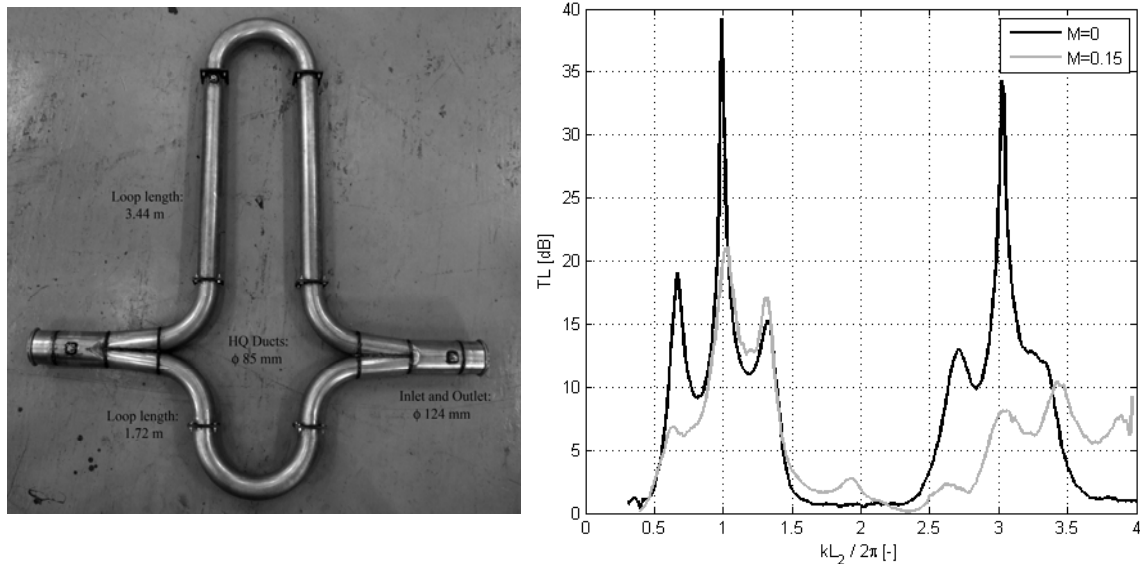
3.2 Möjliga varianter

Historiskt sett har konstruktionen av ljuddämpare varit relativt konservativ och baserats på ett antal väl utprovade koncept. Huvudsakligen kan en ljuddämpare vara reaktiv eller resisitiv. En reaktiv ljuddämpare dämpar ljud genom reflektion eller utsläckning av infallande ljudvåg, exempel är olika typer av resonatorer, areasprång samt system som samverkar som ett klassiskt massa-fjäder system. Resistiva system omvandlar akustisk energi till värme. Detta kan ske genom olika typer av flödesmotstånd, t.ex. resistiva material som ull eller genom en tryckförlust.

För låga frekvenser är reaktiva system ofta de mest effektiva, tyvärr är den typen av lösningar ofta smalbandiga och frekvenserna som den akustiska energin ligger vid varierar med varvtal. En möjlig lösning är därför att gå mot system som aktivt anpassar sig efter motorns varvtal. Sådana koncept kan antingen vara fullt aktiva, genom någon sorts antikälla, eller semiaktiva; en passiv egenskap förändras aktivt. Inom projektet har två möjliga koncept studerats, ett som är ett reaktivt system som fungerar genom utsläckning av ljudvågor genom fasförskjutning samt en ny typ av resonator. Båda har en passiv egenskap som med enkla medel kan förändras aktivt.

3.3 Herschel-Quincke

Ett Herschel-Quincke rör är parallellkopplade rör av olika längd som ger utsläckning vid frekvenser där de är ur fas. Detta är en klassisk lösning som dock sällan används. Inom projektet har detta systems egenskaper med och utan flöde utretts. I Figur 3.2 ses den geometri som studerats samt resultat med och utan flöde. Med flöde i systemet reduceras dämpningen men man kan också få dämpning vid nya frekvenser. Detta förklaras av tredje ekvationen i dämpningsvillkor 1 (se nedan) som förändras tydligt med medelflöde.



Figur 3.2. Testobjekt samt resultat med och utan medelströmning, Herschel-Quincke. Dämpningsvillkor 1 ger topparna vid hela multipler av den dimensionslösa frekvensen, medans villkor 2 ger de omkringliggande topparna.

$$\text{Dämpningsvillkor 1} \quad \begin{cases} k_1 L_1 = m * \pi, & m = 1, 2, 3, \dots \\ k_2 L_2 = n * \pi, & n = 1, 2, 3, \dots \\ \cos(k_1 L_1) \cos(k_2 L_2) - \cos(k_2 L_2 M_2 - k_1 L_1 M_1) \neq 0 \end{cases}$$

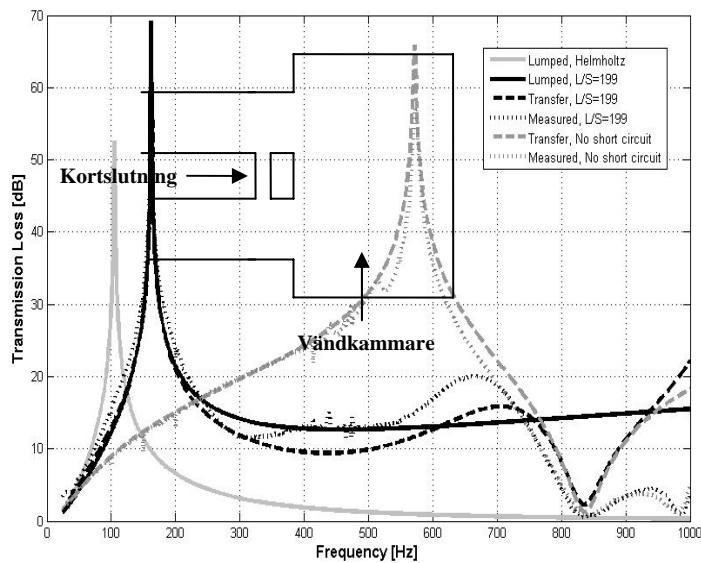
$$\text{Dämpningsvillkor 2} \quad \frac{1}{Z_1 e^{-ik_1 M_1 L_1} \sin(k_1 L_1)} + \frac{1}{Z_2 e^{-ik_2 M_2 L_2} \sin(k_2 L_2)} = 0$$

Där k är vågtalet, L längden på rören, M är Machtalet samt Z den karakteristiska impedansen. Rör 1 är det kortare av de två. Ytterligare detaljer kan studeras i Referens 3.1.

3.4 Vändkammarresonator

Flödesvändkammare är vanliga elements i en ljuddämpare. Genom att kortsluta in- och ut-loppspipan till vändkammaren erhåller man en resonator som genom små manipulationer av kortslutningen kan varieras kraftigt i frekvens. Följaktligen en lösning som är väl lämpad att anpassa för semi-aktiv kontroll. En förenklad geometri samt resultat när man varierar längden på kortslutningspipan visas i Figur 3.3. De två extremerna man kan röra sig mellan är dels en Helmholtzresonator som ger dämpning vid 100 Hz i detta fallet till motsvarande expansionskammare vars maximala dämpning

ligger vid 570 Hz. Ytterligare beskrivning av detta koncept inkluderande dess påverkan av medelströmning fås i Referens 3.2.

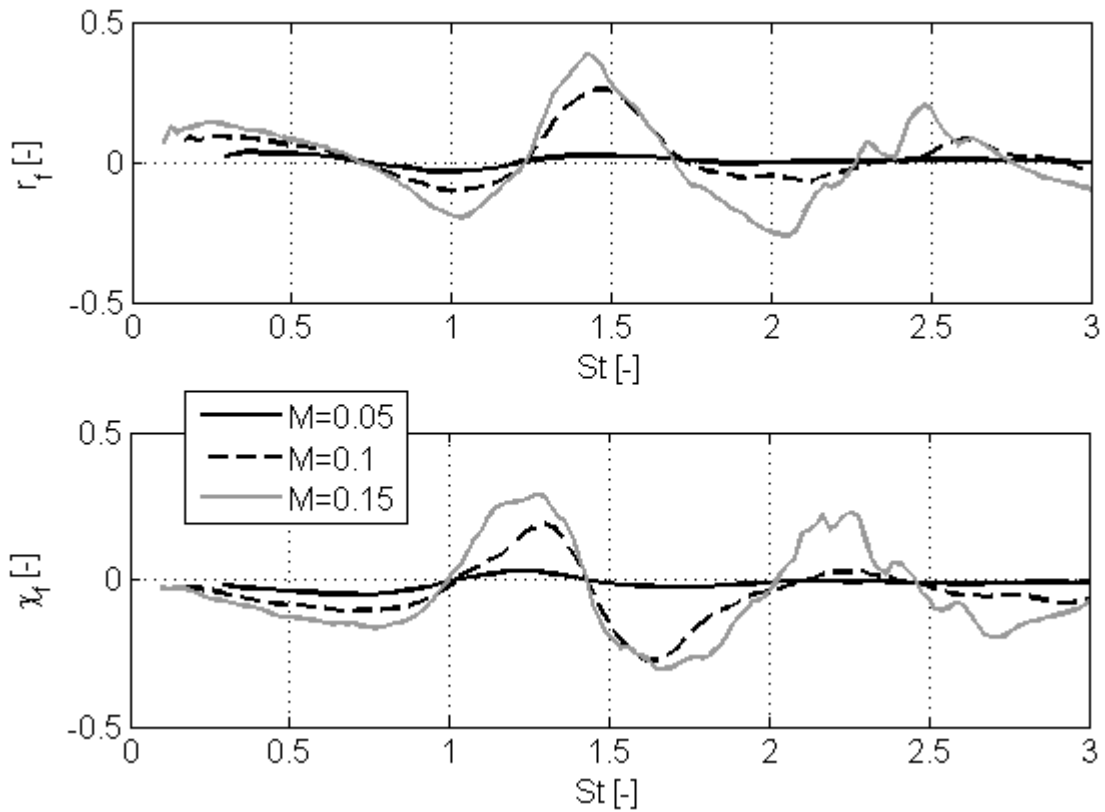


Figur 3.3. Schematisk konfiguration av vändkammarresonatorn samt simulerade och uppmätta resultat för olika konfigurationer.

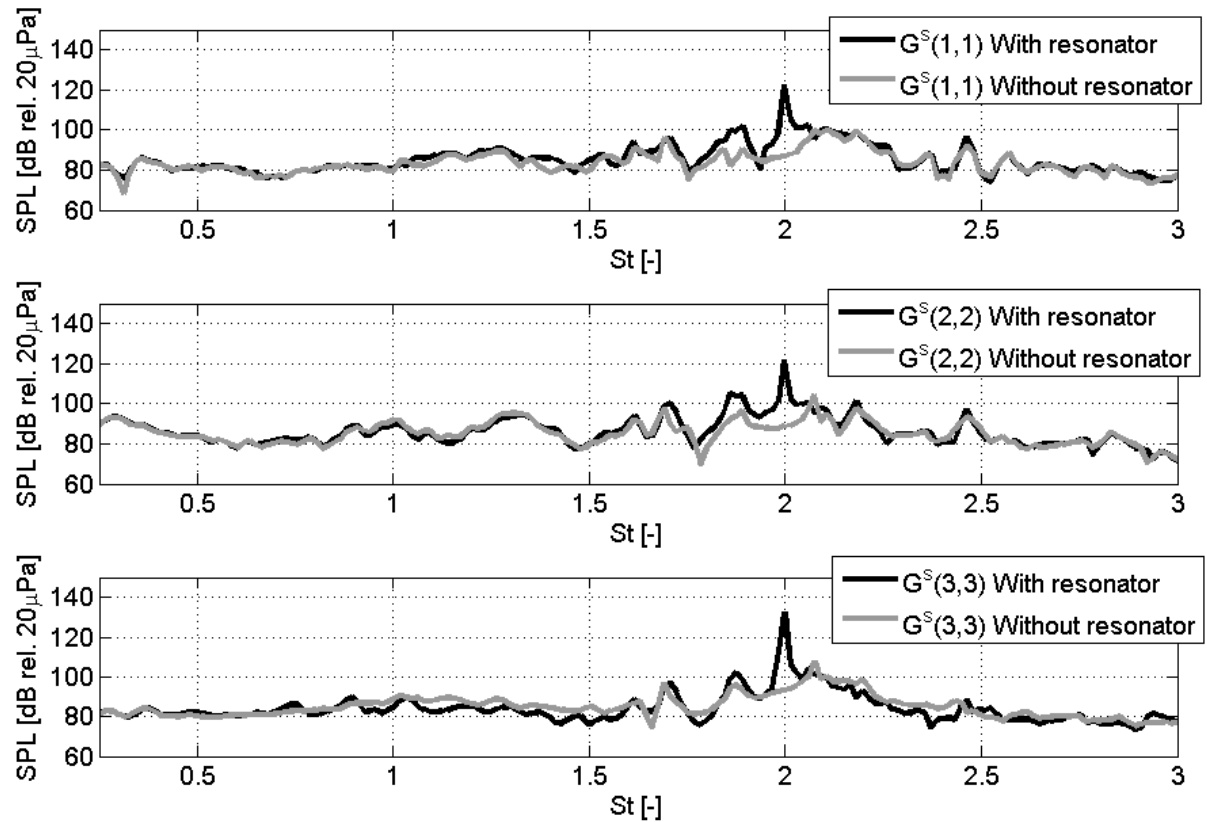
3.5 Strömningsakustik i förgreningar

En frågeställning vilken är viktig för båda ovanstående koncept samt naturligtvis generellt är hur medelströmning påverkar akustiken vid förgreningar. Medelströmningen kan ha flera effekter: dels kommer utbredningshastigheten förändras dels kan det ske ett utbyte av energi mellan de två fälten. Vanligtvis sker en övergång från akustikfältet till strömningsfältet, vilket ses som en förlust. Dock kan även det motsatta inträffa, ett vanligt exempel på detta är en vissla. Inom projektet har en ny mät-samt analysmetod tagits fram för att studera effekterna på akustikfältet p.g.a. olika medelströmningskonfigurationer. Detta har applicerats på en T-korsning (ett cylindriskt rör till vilket ett annat ansluts vinkelrätt). I Figur 3.4 ser man hur impedans förändras när man har medelströmning i huvudröret men inte i sidogrenen. Detta fall brukar kallas strykande strömning. Övre grafen är resistansen, vilket kan relateras till förluster i systemet. Om denna är negativ indikerar det ljudgenerering. För att verifiera detta mättes även de aktiva egenskaperna upp (d.v.s. faktiska ljudet som skapats). Ett gynnsamt fall för vissling skapades vid ett Strouhal-tal som motsvarande två vilket från resultaten från resistansen borde vara ett potentiellt område för vissling. Som ses i Figur 3.5 skapades en ton som utbreder sig i alla tre riktningar från T-korsningen.

Fallet med strykande strömning är relevant i många applikationer. En annan intressant fall som t.ex. kommer till användning i vändkammarresonatorn är när medelströmningen dels går i huvudkanalen men även in eller ut ur sidogrenen. Beroende på konfiguration av genomströmningen så stör man effekten av strykande strömning i olika grad. All denna information är viktig för att kunna konstruera system som fungerar som önskat utan några oönskade sidoeffekter som visslor. Ytterligare information om detta finns i Referens 3.3.



Figur 3.4. Resistans och reaktans vid olika Machtal. Strykande Strömning. $St=fd/U_c$. Där f är frekvens, d är diameter på mynningen och U_c är hastigheten för virvlar över mynningen.



Figur 3.5. Ljudnivå på utgående våg inne i de tre rören ut från T-korsningen. Svart kurva, med en resonator, grå utan.

3.6 Referenser

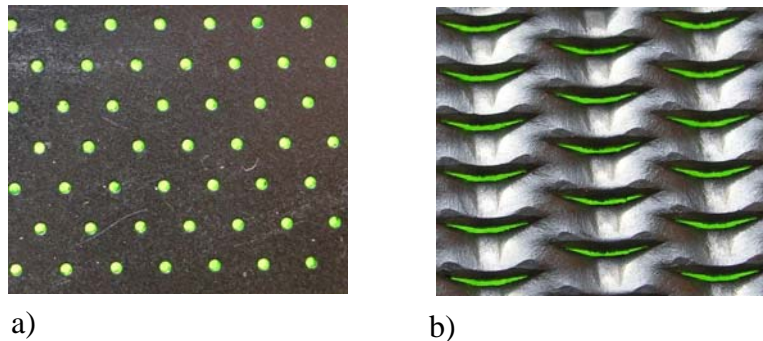
- [3.1] M. Karlsson, R. Glav, M. Åbom, "The Herschel-Quincke Tube: The attenuation condition and their sensitivity to mean flow", *Journal of the Acoustical Society of America* 124 (2) 723-732, 2008.
- [3.2] M. Karlsson, R. Glav, The Flow Reversal Resonator, SAE paper 2007-01-2203, 2007.
- [3.3] M. Karlsson, M. Åbom, Aeroacoustics of T-junctions: an experimental investigation. Submitted to *Journal of Sound and Vibration*, 2009.

4. Nya lösningar för luftljuddämpning utan fibrer baserade på mikro-perforerade plåtar

Mats Åbom, KTH

4.1 Bakgrund

Denna del av projektet har studerat hur mikro-perforerade plåtar kan nyttjas för fordonstekniska tillämpningar. En mikro-perforerad plåt (MPP) är en perforerad plåt med hål som typiskt är av storleksordningen 1/10 mm och med perforeringsgrader kring 1 %. Tanken med bakom detta är att skapa en yta som har en akustisk resistans ("vågmotstånd") som är samma som i den omgivande luften, vilket ger en god dämpning av ljudvågor. Traditionellt har mikro-perforerade plåtar, som först föreslogs av en kinesisk forskare Maa [4.1], nyttjats i form av s.k. panelabsorbenter som reglerar efterklangen i ett rum. En MPP i metall är dock robust, tål värme samt kan integreras i en existerande konstruktion vilket möjliggör att ljuddämpning kan byggas in i en konstruktion. Detta är av speciellt intresse för fordonstillämpningar där viktbesparing är av intresse. Ett exempel på detta är möjligheten att bygga s.k. dissipative ljuddämpare med hjälp av mikro-perforerade plåtar istället för att nyttja mineralull eller glasull. Vidare kan man tänka sig att nyttja en MPP, eftersom den p.g.a sin låga perforeringsgrad har ett hög strömningsmotstånd, som en ljuddämpande ledskena i kanaler med strömning eller i fläktar. För många av dessa nya tillämpningar kommer en MPP att utsättas för strömning, höga temperaturer och höga ljudtryck, t.ex. för tillämpningen på ljuddämpare för bilar där ljudtrycksnivåer upp till 140-160 dB kan förväntas. Det är därför viktigt att börja med att utreda hur de akustiska egenskaperna ("impedansen") hos en MPP påverkas av ovannämnda faktorer.



Figur 4.1. Foto på två typer av MPP. a) En MPP plåt med runda hål från en kinesisk tillverkare; b) En MPP plåt från det svenska företaget Sontech med slitsformiga hål som åstadkomms via pressning med ett särskilt verktyg.

4.2 Studium av impedans hos mikro-perforerade plåtar

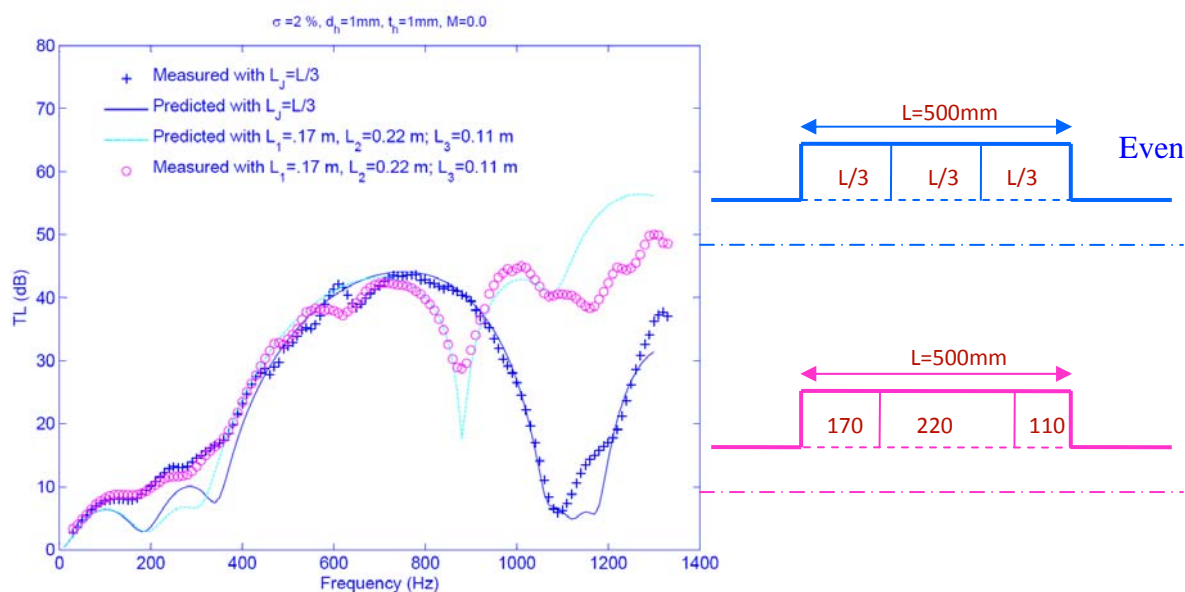
Två grundtyper av plåtar har studerats, se figur 4.1. Inverkan av strömning av geometri (hålform) samt höga amplituder studerades först och empiriska formler för de mikro-perforerade plåtar som tillverkas av en av projektets partners (Sontech) togs fram [4.1]. För att studera inverkan av strömning fick en ny mätmetodik utvecklas samt en speciell testrigg byggas. Detta arbete samt resultaten finns presenterat i Referens [4.2].

4.3 Studium av nya tillämpningar

Under projektet har följande nya tillämpningar av mikro-perforerade plåtar studerats:

- i) ledskenor för att dämpa tonalt ljud från turbo-kompressorer [4.3]
- ii) ljudabsorbent i inlopp för kylfläktar på tåg [4.4]
- iii) dissipativa ljuddämpare [4.1 & 4.5]

Vidare har en förstudie gjorts av möjligheten att integrera en mikro-perforerad plåt i en värmeväxlare för att förbättra dess ljudabsorption och ljuddämpning [4.6].



Figur 4.2. Exempel på beräknad och uppmätt ljuddämpning (TL i dB) för den nya dissipative ljuddämparen. Dämparen består av ett koncentriskt MPP rör placerat i en expansionskammare med längden L som är uppdelad i 3 fack. Två fall jämförs och det undre fallet med ojämn delning mellan facken ger den bästa dämpningen eftersom de minima som inträffar då en halv våglängd svarar mot $L/3$ elimineras.

4.4 Referenser

- [4.1] Y. Guo, S. Allam and M. Åbom (2008). "Micro-perforated plates for vehicle applications", Proc. Inter-Noise 2008, Shanghai, China.
- [4.2] S. Allam and M. Åbom (2008), "Experimental characterization of acoustic liners with extended reaction", 14:th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Vancouver, Canada.
- [4.3] P. Malm (2005), "Absorbing sound in ducts using micro-perforated panels", MSc thesis KTH.
- [4.4] A. Frid et al. (2007), "Cooling fans in railway vehicles – application of noise control measures to a roof mounted engine cooler", Paper presented at Fan Noise 2007, Lyon, France.
- [4.5] Anna Färm (2008), "Mufflers based on micro-perforated plates", MSc thesis KTH. TRITA-AVE 2008:03.
- [4.6] Y. Jiang (2009). "Noise from train cooling fans", Licentiate thesis, KTH, TRITA-AVE 2009:03.