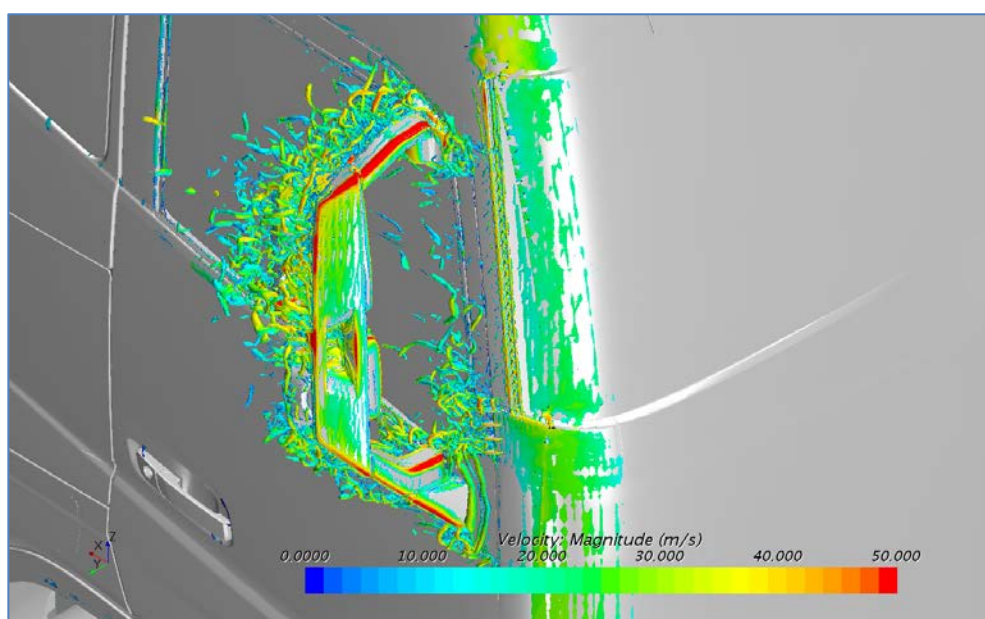


# Prediktering av extern flödesakustiks påverkan på hyttbuller

Publik rapport



Författare: Zenitha Chroner, Mikael Karlsson, Huadong Yao  
Datum: 20190125  
Projekt inom Trafiksäkerhet

**FFI** Fordonsstrategisk  
Forskning och  
Innovation

VINNOVA

Energimyndigheten

TRAFIKVERKET

FKG

VOLVO

SCANIA

VOLVO

# Innehållsförteckning

<b>1 Sammanfattning .....</b>	<b>3</b>
<b>2 Executive summary in English.....</b>	<b>3</b>
<b>3 Bakgrund.....</b>	<b>4</b>
<b>4 Syfte, forskningsfrågor och metod.....</b>	<b>4</b>
<b>5 Mål .....</b>	<b>5</b>
<b>6 Resultat och måluppfyllelse .....</b>	<b>5</b>
6.1 Mätningar .....	6
6.2 Simuleringar .....	9
6.3 Kunskaps- och resultatspridning.....	12
6.4 Publikationer.....	12
<b>7 Slutsatser och fortsatt forskning.....</b>	<b>12</b>
<b>8 Deltagande parter och kontaktpersoner.....</b>	<b>13</b>

## Kort om FFI

FFI är ett samarbete mellan staten och fordonsindustrin om att gemensamt finansiera forsknings- och innovationsaktiviteter med fokus på områdena Klimat & Miljö samt Trafiksäkerhet. Satsningen innebär verksamhet för ca 1 miljard kr per år varav de offentliga medlen utgör drygt 400 Mkr.

För närvarande finns fem delprogram; Energi & Miljö, Trafiksäkerhet och automatiserade fordon, Elektronik, mjukvara och kommunikation, Hållbar produktion och Effektiva och uppkopplade transportsystem. Läs mer på [www.vinnova.se/ffi](http://www.vinnova.se/ffi).

# 1 Sammanfattning

Vindljud är idag den största ljudkällan i lastbilar vid hastigheter på över 80 km/h. Det är viktigt för säkerheten att få ner ljudnivåerna eftersom denna typ av ljud kan orsaka trötthet och huvudvärk hos föraren. Andra ljudkällor som motorljud och väggljud har det jobbats ganska mycket med att få ner. I framtidens elektriska fordon där drivlineljuden nästan helt är borta kommer vindljuden bli alltmer framträdande.

I detta projekt har vis studerat ljudet som bildas runt en a-stolpe och backspegel på en lastbil samt tittat på olika sätt att modellera detta virtuellt. För att korrelera detta mot verkligheten har mätningar gjorts på en specialbyggd lastbil där andra ljudkällor har minimerats.

Genom att först studera en generisk geometri har en beräkningsmetodik tagits fram som inkluderar både strömningsfältet (CFD) och transporten av ljudet in i kupén (akustik). Denna metodik har sedan applicerats på en riktig geometri och resultaten har jämförts mot den uppmätta lastbilen.

Beräkningarna överensstämmer väl med det som har uppmätts. Man får dock komma ihåg att mätningarna är gjorda utomhus med riktiga vindförhållanden medan beräkningarna är gjorda under perfekta förhållanden. Modellen fångar både det bredbandiga bedraget och i det fallet där vi ser en ton i mätningarna så ser vi även detta i beräkningarna.

Slutsatser som kan dras av dessa beräkningar är att det är viktigt att ta med akustiska bidraget, antingen genom direkt modellering eller med analogier. För att fånga frekvensinnehållet krävs det tidsupplösta metoder medan enkla tidsmedelvärderade modeller kan rangordna olika koncept men saknar frekvensinnehållet.

## 2 Executive summary in English

Being a truck driver means that you spend a lot of time in the truck. It is important that the working environment is good as any other working place. The three largest contributors to interior noise are engine noise, road/tire noise, and wind noise. The engines are getting better and quieter and they continue to improve. Especially with hybrid and electric drivelines this contributor will continue to decrease. At cruising speed of 89-90 kph the wind noise is the largest source of interior noise. It can cause fatigue and head aches and that might be a safety hazard. In this study, the noise sources from a rear view mirror of a truck have been studied, both experimentally and numerically. A methodology has been established where CFD is used to compute the noise sources on the outside of the truck that consists of the pressure fluctuations (both hydrodynamic and acoustic) in the flow. These sources are then mapped into acoustic software to compute the transfer into the cab. The aim was to develop a tool box of different methodologies that can be used in different stages of a project in order to reduce the interior noise as early as possible in a project.

The results show that even fast steady state simulations can be used for a quick assessment of the interior noise, but for more in depth investigation it is necessary to perform time dependent simulations. It was also seen that it is important to include the compressibility so that the acoustic pressure contributions are included. They can be included either by directly computing the acoustic pressure fluctuations (compressible) or using analogies for the acoustic contribution.

This methodology will be used to study other areas on the truck and reduce the wind noise levels in our trucks for safer vehicles in the future.

### 3 Bakgrund

Lastbilschaufförer har hytten som sin arbetsplats och många gånger också som bostad. Att ha en bra arbetsmiljö är därför lika viktig här som alla andra arbetsplatser. Rätt klimat, bra ergonomi och rätt ljus och ljud är viktiga parametrar för en bra arbetsmiljö. De tre största bidragen till den interiöra ljudnivån inne i en lastbilshytt är motorljud, väg/däcksljud och vindjud. Dagens motorer är tystare än för 10 år sedan och utvecklingen av elektriska motorer gör att denna ljudkälla kommer att minska ännu mer i framtiden. Utvecklingen med både däck och vägbelag gör att vägljuden har minskat samt att lastbilarna blir bättre isolerade. När dessa ljudkällor minskar blir vindljudet mer framträdande och kan vara mycket irriterande och till och med farligt för föraren. Dessa ljud är ofta i de frekvensband som gör att människan lätt blir trött och får huvudvärk. Vindljud ökar med hastigheten på fordonet och vid 80-90 km/h är detta den största ljudkällan inne i hytten.

Vindljud kan antingen vara bredbandigt, dvs många olika frekvenser eller monotona med en eller några olika frekvenser. Hur människan reagerar på dessa ljud är olika men trötthet, huvudvärk och irritation kan vara konsekvenser av dessa ljud. För att öka trafiksäkerheten är det därför viktigt att minimera vindljudet på lastbilar.

Ljudkällan består av turbulenta flödesstrukturer på utsidan av lastbilen. Dessa strukturer ger upphov till både hydrodynamiska tryckvågor och aeroakustiska tryckvågor. De akustiska tryckvågorna har mycket mindre amplitud än de hydrodynamiska, men när dessa vågor träffar lastbilsytan interagerar de med strukturen på lastbilen och filtrerar bidragen från de hydrodynamiska och akustiska vågorna. Ljudnivån på insidan består av bidrag från både den hydrodynamiska tryckfluktuationerna och de akustiska och kan vara lika stora.

I detta projektet har vi använt oss av CAA (Computational Aero Acoustics) för att få en bättre förståelse på vad vindjud är och hur vi kan minimera det. Vi har använt oss av dels en generisk backspegel som ofta används i studier som denna men också tittat på riktiga backspeglar. Mätningar har gjorts på en riktig lastbil där motorljud och vägljud har minimerats.

### 4 Syfte, forskningsfrågor och metod

Syftet med projektet har varit att få en bättre förståelse för vindljudsproblematiken samt att ta fram analysverktyg för att bättre kunna modellera och analysera vindljud. Det finns en stor palett av olika metoder som kan användas med olika noggrannhet, från snabba steady-state beräkningar till långa, komplicerade beräkningar som är väl upplösta både i tid och rum. Problematiken kan delas upp i två delar:

- 1 Luftburet vindljud. CFD (Computational Fluid Dynamics) används för att simulera luftflödet med dess turbulens. Detta blir ljudkällan. Ljudet transporteras genom luften och denna transport kan beräknas direkt eller via olika analogier.
- 2 Strukturburet vindljud. När ljudvågorna på utsidan träffar strukturen på lastbilen, transporteras ljudet vidare in i hytten via strukturen.

Dessa simuleringar kan bli väldigt tidskrävande. Ett mål var därför att titta på olika beräkningsmetoder som har olika noggrannhet. För korrelation av beräkningsresultaten har fysisk provning utförts. Svårigheten med detta är att det är svårt att kontrollera omgivningen på så sätt att det motsvarar beräkningarna. Dessa prov har gjorts utomhus med låga men varierande vindar. I beräkningarna antas en helt vindfri miljö. Det är också svårt att separera en ljudkälla från en annan och isolera det studerade området. Testobjektet har åtgärder som skall minimera både vägljud, motorljud och vindjud från andra delar av lastbilen men det är omöjligt att helt eliminera dessa vilket gör att andra ljudkällor förutom vindljudet kommer med i de fysiska mätningarna. En svårighet är också att hitta parametrar som passar både i prov och beräkning för jämförelse. Det

självklara är att jämföra ljudnivån i hytten men önskningsvärt vore ytterligare parametrar att jämföra. I denna studie har ljudnivåerna inne i hytten jämförts men då krävs en bra modell på hur ljudet transporteras i strukturen.

## 5 Mål

Fem mål sattes upp:

1. Definiera generiska geometrier för CAA
2. Finna lämpliga metoder baserat på generiska geometrier
3. Definera lastbilsgeometrier att applicera metoderna på
4. Jämföra beräkningar med experiment
5. Rapportera projektet med en rapport

## 6 Resultat och måluppfyllelse

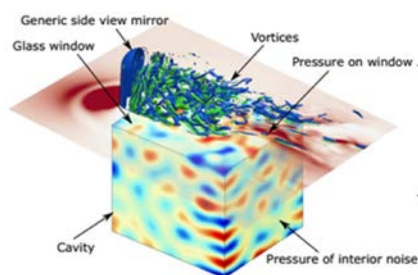
### 1. Generisk backspegel (Mål 1&2)

Genom att studera en generisk backspegel (Figur 1) kunde olika beräkningsmetoder utvärderas. Fokus på denna del var att ta fram en metod som fungerar samt studera parametrar som kan vara betydelsefulla såsom kompressibilitet, randvillkor och storlek på beräkningsdomän. CFD-beräkningarna kopplades med strukturberäkning för att få fram ljudnivå i en fiktiv hytt. De metoder som ansågs bäst var

- Compressible DES – Wave number decomposition
- Incompressible DES - Lighthill analogy

I Compressible DES så tilläts densiteten att variera och därför beräknas även akustiska tryckvågor. Nackdelen med Compressible DES är att man lätt kan få reflektioner av akustiska vågor på ränderna vilket gör att trycket byggs upp på ett orealistiskt sätt. Med Incompressible DES så antas att densiteten är konstant och den akustiska delen måste simuleras med hjälp av analogier.

En viktig slutsats av denna del var att både de hydrodynamiska fluktuationerna och de akustiska bidrar till ljudnivåerna inne i hytten. För låga frekvenser är de hydrodynamiska vågorna dominerande medan för de högre frekvenserna blir de akustiska bidragen betydelsefulla.



Figur 1. En förenklad spegelmodell med en kubisk hyttvolym.

### 2. Lastbilssbackspegel (Mål 3&4)

I nästa steg användes en riktig lastbilssbackspegel där både mätningar och beräkning genomfördes. Tre olika konfigurationer sattes upp som både mättes och beräknades med olika metoder. Dessa resultat diskuteras i nästa stycken.

## 6.1 Mätningar

### 6.1.1 Mätupställning

Det existerar väldigt få experimentiella referensfall i den tillgängliga litteraturen. Det är helt enkelt svårt och framförallt dyrt att genomföra. Idealt bör testet göras i en "akustisk" vindtunnel. Det finns väldigt få av dessa i världen som kan husera en lastbil – kostnad och tillgänglighet är därför ett uppenbart hinder. Som alternativ har Volvo utvecklat en metod där man kan mäta på en vanlig provbana. En hytt har placerat på ett specialchassi (modifierat busschassi), se Figur 2. På så sätt reduceras ljudet från drivlinan kraftigt. Man har kvar problem med buller från däcken, men annars dominerar nu vindbrus ljudbilden i hytten. Naturligtvis är proven nu väderberoende. Inte minst måste man noggrant hålla reda på vindförhållandena; det skapade ljudet varierar tydligt med vindriktning. Fordonet körs sen ett antal varv på provbanan och därefter sorteras datan efter vindförhållandena och de som anses vara bra nog används för medelvärdesbildning.



Figur 2. Provobjektet (här utan spegel monterad). Drivlinan är i bak på fordonet. Hytten är tejpad för att undvika övriga vindbruskällor förutom speglarna. Vindmätaren sitter på stången som sticker upp från hytten. Högtalaren används här för att testa ljudreduktion genom dörren (inte del av standardtestet).

För det här specifika provet där vi bara är intresserade av ljud skapat av speglarna har hytten anpassats med en extra dämpad och försluten dörr på passagerarsidan. Dessutom har skarvar och håligheter tejpats för att undvika övriga vindbruskällor.

Tre olika konfigurationer testades

1. **Ingen spegel.** Ger bakgrundsivån och det som skulle kunna uppnås om man t.ex. har kameror istället för speglar.
2. **Dummy.** En enkelt stålrör som följer samma form som spegeln. Har använts som referensfall då den skapar en tydlig ton med känd frekvens. Kan användas för att kalibrera metoden och ger en tydlig utmaning till beräkningsmodellerna om de fångar den rätta fysiken i problemet.
3. **Produktionsspegel.** Dagens spegel

Ljudmätningarna görs på (ytmikrofoner) och innanför rutan på passagerarsidan samt vid förarens och passagerarens öron. Mikrofonpositionerna kan ses i Figur 3. På insidan av glaset mäts även vibrationsnivåerna i motsvarande positioner med accelerometrar. När vi provar standardspegeln sitter det även en ytmikrofon på den.



**Figur 3. Mikrofonpositioner. Det är ett stort gitter (pos 1,6,7,8 & 9), samt ett mindre kring mikrofon 1 (pos 1, 2, 3, 4 & 5).**

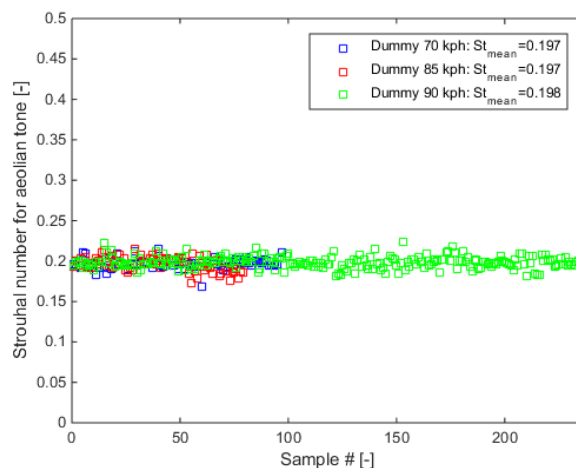
För varje konfiguration utförs prover vid ett antal hastigheter: 70, 80, 85 & 90 km/h. Detta ger möjligheter att se hur ljudalstringen påverkas av flödes hastigheten, vilken i sin tur ger information vilken typ av källor det är.

### 6.1.2 Resultat

Först testar vi referensfallet med cylindern som skall ge en ren ton. Enligt teorin skall Strouhaltonen fås vid:

$$St = \frac{fd}{U} = 0.198$$

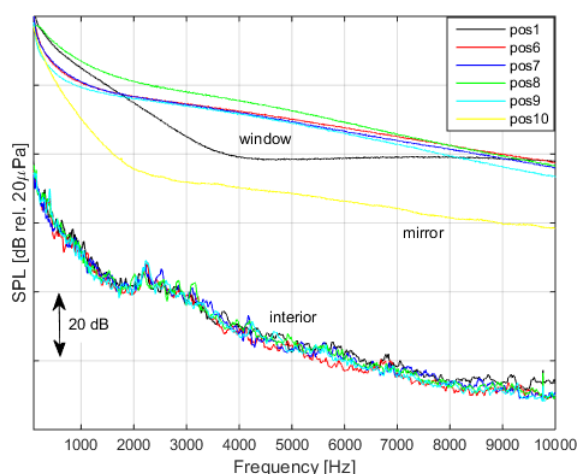
Där  $f$  är frekvensen,  $d$ =diametern på stängen samt  $U$  flödes hastigheten. Så för de olika hastigheterna vi kört förväntar vi oss att frekvensen på den uppmätta tonen ändras så  $St$  är konstant. Som kan ses i Figur 4 så stämmer det väldigt väl. Vi har delat upp datan i ensekundsblock och plottar  $St$  för tonen i varje block.



**Figur 4. Strouhantal för alla accepterade block av data från körningar vid tre olika hastigheter.**

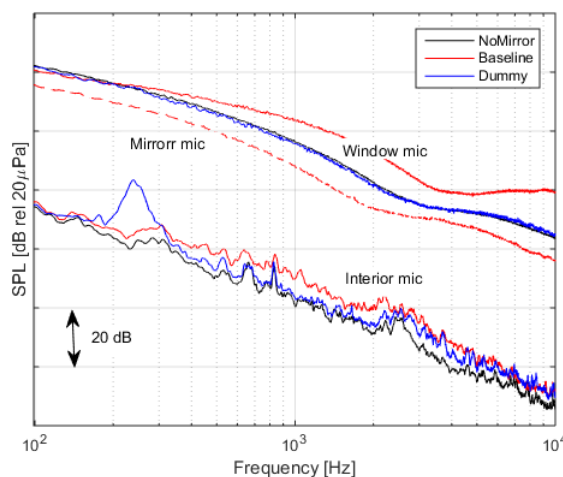


Något som har diskuterats inom forskningsfältet de senaste åren är vad som faktiskt bidrar till ljudet inne i fordonet. Konsensus är att tryckfluktationerna man mäter på utsidan på rutan visserligen har hög amplitud men eftersom de till stor del är hydrodynamiska (i motsats till akustiska) är de dåliga på excitera rutan. Det som kan överföras är ljud som skapas i strömningsfältet, men som breder ut sig som en ljudvåg. Våra mätningar bekräftar denna teori, i Figur 5 ser man att amplituden på ytmikrofonerna är hög och varierar kraftigt mellan de olika positionerna. Helt naturligt eftersom de ligger i olika "zoner" i flödet. Men tittar man på interiörmickarna i samma positioner så är responsen i princip identisk. Det vill säga det som har lyckats excitera rutan är ljudvågor, men man ser inte dem i responsen på ytan då de maskeras av det hydrodynamiska bidraget.



**Figur 5. Yt och interiörrespons på de olika mickpositionerna i det stora gittret. Testfallet är standardspeglen vid 85 km/h**

Slutligen det som blir det största bidraget till själva projektet – jämförelsen mellan de tre olika testfallen som ses i Figur 6. Som förväntat är fallet utan spegel tystast, lägger man till cylindern får man i princip samma ljud som utan spegel förutom vid den skapade tonen som tydligt sticker ut i spektrat. Slutligen med den riktiga spegeln får man istället ett mer bredbandigt bidrag över i princip hela frekvensspannet. De här resultaten är de viktigaste jämförelserna vi kommer göra mot beräknad data i projektet.



**Figur 6. Yt och interiörrespons vid mickfonposition 1 för alla de tre testfallen.**

Resultaten, med mer detaljer har sammanfattats i en publikation [7]



## 6.2 Simuleringar

Den enklaste modellering består av **RANS** (Reynolds Averaged Navier Stokes)-**SNGR** (Stochastic Noise Generation). RANS är en metod där ett tidsmedelvärderad strömingsfält beräknas. Denna beräkningsmetod är väldigt snabbt då tidsrymden inte behöver lösas upp. Nackdelen är att tidsvariationerna på de turbulenta strukturerna inte beräknas. Dessa strukturer simuleras m.h.a turbulens modellering. I SNGR metoden används de turbulenta storheterna för att estimeras ljudkällor. Nackdelen med denna metod är att inget ljudkällornas frekvensinnehåll kan inte uppskattas.

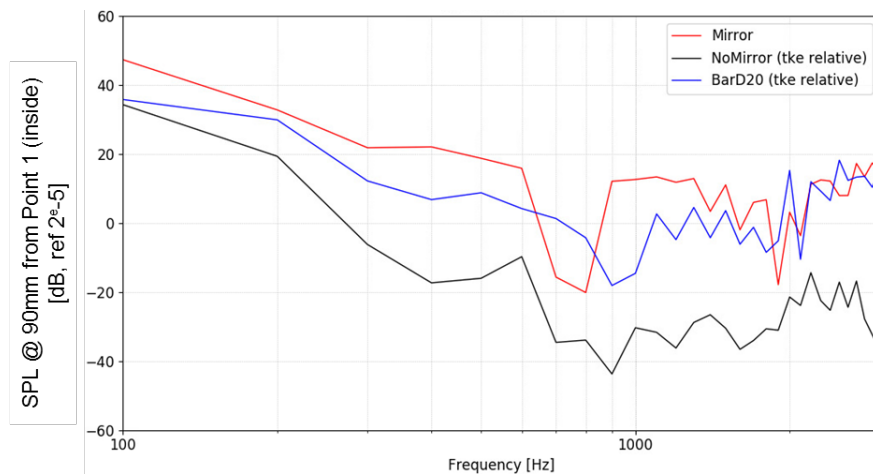
Nästa steg är att göra en tidsupplöst CFD-beräkning och vi har valt DES (Detached Eddy Simulation). Denna metod är mer tidskrävande då även tiden måste diskretiseras. För att få med frekvenser upp till 10 kHz krävs ett tidssteg på  $2 \times 10^{-5}$  s. För en Compressible DES används Wave Number Decomposition för att räkna ljudnivåerna i hytten. För beräkningarna har en förenklad lastbil använts, dels för att göra beräkningen snabbare och dels för att kunna koncentrera beräkningarna till det intressanta området. Modellen visas i Figur 7.



Figur 7. Förenklad lastbilsmodell för simuleringar.

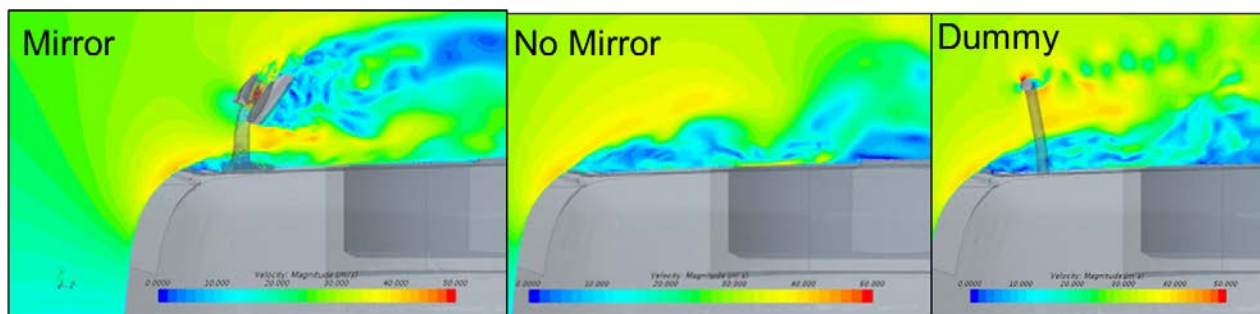
### 6.2.1 Jämförelse

Eftersom RANS inte ger flödesfältet tidsupplöst, får vi heller ingen information om frekvensinnehållet. SNGR återskapar ett frekvensinnehåll baserat på de turbulenta storheterna i flödet. I Figur 8 är resultatet i form av Sound Pressure Level (SPL) för de tre olika konfigurationerna inne i hytten. Rangordningen blir densamma som i test, dvs konfigurationen med spegel genererar mest ljud och helt utan speglar genererar minst ljud. Dummy-spegeln hamnar mittemellan men tonen som uppstod i provet syns inte alls. Även om denna metod inte ger absoluta värden för ljudnivån, är det en bra metod om man snabbt vill utvärdera många olika koncept. Detta tillsammans med att visuellt titta på flödet kan ge mycket värdefull information

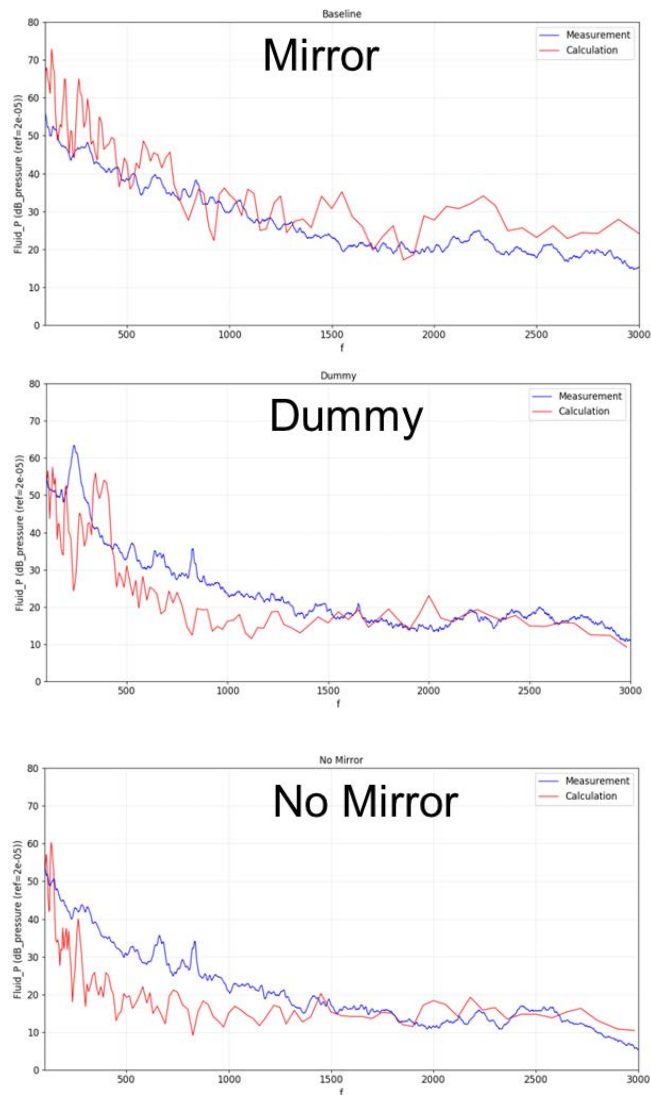


Figur 8. Interiörrespons för SNGR-metoden.

Nästa metod att utvärderas består av en tidsupplöst DES för strömningsdelen och Wave Number Decomposition för ljudtransportdelen. Strömningsbilden i detta område är väldigt fluktuerande och i Figur 9 visas hastighetsfältet i ett snitt genom backspeglin. För dummy-speglin syns von Karman virvelgatan som är karaktäristiskt för flöde runt en cylinder. I Figur 10 jämförs ljudnivån inne i hytten mot mätdata. Trenderna och rangordningen överensstämmer bra mellan mätningarna och beräkningarna. För fallet med dummy-spegel syns även en pik om än lite förflyttad i frekvensbandet. Detta kan bero på att diametern på stålramen inte var identiska eller att hastigheten framför stålramen inte är vad vi förväntar oss- Små ändringar i dessa parametrar flyttar tonen i frekvensbandet.



Figur 9. Hastighetsfält runt a-stolpen för tre olika konfigurationer.



**Figur 10. Interiörrespons för Wave number decomposition-metoden för tre olika konfigurationer.**

Att göra simuleringar på en förenklad geometri har sina fördelar; andra ljudkällor sorteras bort och beräkningarna blir mindre dataresurskrävande. Nackdelarna är att förenklingen kan göra att du inte får det flödesfält som du skulle ha haft på en riktig lastbilsgeometri. Därför måste vi försäkra oss om att flödet är vad det skulle ha varit för en hel lastbil i det studerade området.

Transferfunktionerna som används i beräkningen av ljudtransporten in till hytten måste hanteras varsamt, speciellt vid jämförelse mot fysiskt prov. Stor del av ljudet transporteras via tätningar och om inte denna tätning är helt tät så är det svårt att få överenskommelse mellan prov och beräkning.

### 6.3 Kunskaps- och resultatspridning

Hur har/planeras projektresultatet att användas och spridas?	Markera med X	Kommentar
Öka kunskapen inom området	x	Vi har ökad förståelse i hur ljud uppstår, hur vi mäter och hur vi simulerar ljud.
Föras vidare till andra avancerade tekniska utvecklingsprojekt	x	Vi har nu metoder och riktlinjer att använda i tidiga faser av ett projekt för att kunna hitta eventuella källor till hyttbuller.
Föras vidare till produktutvecklingsprojekt	x	NA
Introduceras på marknaden		NA
Användas i utredningar/regelverk/tillståndsärenden/ politiska beslut		

### 6.4 Publikationer

1. H.-D. Yao, and L. Davidson. Generation of interior cavity noise due to window vibration excited by turbulent flows past a generic side-view mirror. *Physics of Fluids*, 30: 036104, 2018.
2. H.-D. Yao, L. Davidson, and L.-E. Eriksson. Noise radiated by low-Reynolds number flows past a hemisphere at  $Ma=0.3$ . *Physics of Fluids*, 29(7):076102, 2017.
3. H.-D. Yao, L. Davidson, and Z. Chroner. Investigation of Interior Noise from Generic Side-View Mirror Using Incompressible and Compressible Solvers of DES and LES. In *WCXTM18: SAE World Congress Experience*. SAE 2018-01-0735, 2018.
4. H.-D. Yao, L. Davidson, and Z. Chroner. Simplifications Applied for Simulation of Turbulence Induced by a Side View Mirror of a Full-Scale Truck Using DES. In *WCXTM18: SAE World Congress Experience*. SAE 2018-01-0708, 2018.
5. H.-D. Yao and L. Davidson. Aero-Vibro Acoustics of Interior Noise from Structural Vibration Excited by Flows past A Quarter-Sphere cylinder Body: A General Model for Vehicle Mirrors. (under review in a journal)
6. B. Mazeaud, Z. Chroner, M. Karlsson, H.-D. Yao, and Y. Detandt, Application of SNGR Model to Compute Aeroacoustics of Heavy Duty Side Mirrors, AIAA conference, 2019.
7. Karlsson, M., Larsson, R., Ågren, T., and Chroner, Z., "Aeroacoustics of Heavy Duty Truck Side Mirrors - An Experimental Study," SAE Technical Paper 2018-01-1516, 2018, <https://doi.org/10.4271/2018-01-1516>.

## 7 Slutsatser och fortsatt forskning

Att modellera hur vindljud tar sig in i en lastbilshytt innebär att många komplexa fysiska fenomen måste inkluderas. Ljudkällan består av turbulenta strömningsstrukturer på utsidan av lastbilen som skapar både hydrodynamiska och akustiska tryckvågor. Dessa tryckvågor samverkar med lastbilens geometriska struktur och beroende på hur denna struktur ser ut, tar sig olika ljud in i hytten. I detta projekt har både mätningar och beräkningar utförts. Då mätningarna har utförts utomhus med varierande förhållande har gjort det svårt att få en direkt jämförelse. Alternativet hade varit att göra mätningar i vindtunnel, men då uppstår andra problem såsom andra ljud från själva vindtunneln plus att det finns inte många vindtunnlar i världen stora nog för en lastbil.

Att simulera flödet kring en lastbil på så sätt så att både de hydrodynamiska och akustiska vågorna löses upp, kräver tid och stor datorkapacitet. Vi har därför tittat på olika beräkningsmetodiker som kan användas vid olika skeden av projekt. Enklare beräkningsmetoder såsom RANS är snabba och kan ge en snabb bedömning och rangordning av olika koncept.

Att lösa upp flödet i både tid och rum kräver mer tid och dataresurser. I detta projektet har en förenklad lastbilsmodell använts där området av intresse har lösts upp i både tid och rum. Fördelen är att andra ljudkällor inte kommer med och att beräkningsmodellen blir mindre. Denna metodik kan användas på fler områden av lastbilen.

Beräkningarna har visat att för låga frekvenser är det hydrodynamiska bidragen dominerande men för höga frekvenser blir de akustiska bidragen av betydelse. Beräkningarna har också visat att både bredbandigt och toner kan fångas upp av beräkningarna.

## **8 Deltagande parter och kontaktpersoner**

Zenitha Chroner – Volvo GTT  
Huadong Yao – Chalmers Tekniska Högskola  
Lars Davidsson – Chalmers Tekniska Högskola  
Mikael Karlsson – Volvo GTT  
Benoit Mezaud – Volvo GTT  
Anders Hedlund – Volvo GTT