

Här har vi fotograferat en videoprojektor framifrån. Föga överraskande kom det mesta bruset (lila) ut från kylgallret till vänster. Den lila fläcken på bordet visar att brus även kommer ut undertill och studsar på bordet.

# Att se ljud

Alla vet att en bil, en dator eller en fabrik bullrar. Men exakt vad det är som bullrar, vilka delar av bilen som är mest ljudgenomsläppliga, exakt var knirkar det i instrumentpanelen, det är mycket svårt att ta reda på med bara öronen som hjälp. Kunde man se ljud skulle det underlätta.

Av Jörgen Städje

Ljudmätningar på industrier och utvecklingsavdelningar har hittills inskränkt sig till att man mer eller mindre empiriskt letat efter bullerkällor med öron och decibelmätare. Att mäta igenom en hel kilometerlång industribyggnad som har bullerproblem kan ta flera månader.

Alla är medvetna om att en maskin som håller på att gå sönder skramlar, men exakt var och hur skramlar det?

Vilket blad på vindkraftverket bullrar?

Var uppstår vindtjut?

Tyska GFal Tech har tagit fram en akustisk kamera som faktiskt kan se ljud och ge svar på alla dessa frågor. Elegant och enkelt dessutom.

Med GFal:s akustiska kamera kan man fotografera ljudet från en maskin genom att lägga ett akustiskt foto ovanpå en vanlig bild och se exakt var det bullrar, vilka frekvenser bullret består av och peka ut exakt vilka frekvensområden de olika maskindelarna avger. På ett par minuter.

## Inget vanligt cykelhjul

Nedslagna runt kaffebordet hos Acoutronic i Solna berättar Torbjörn Kloow om det märkliga hjul som står framför oss: en cirkulär mikrofonmatris med 48 elektretmikrofoner monterade runt periferin på en 75 centimeters ring i kolfiber.

– Det kan se ut som ett cykelhjul men är i själva verket en matris av mikrofoner arrangerade så att de kan känna riktningen till de ljud som faller in framifrån. Signalerna från mikrofonerna går in till ett datainsamlingsystem som A/D-omvandlar ljudet och utför ett antal algoritmer på det. I mitten av "cykelhjulet" sitter en USB-ansluten kamera som förser oss med en visuell, synlig bild av det som ljudkameran ser. Efter bearbetning i datainsamlingsystemet kan ljudtrycket i varje punkt, det akustiska fotot visas överlagrat på den optiska bilden på den anslutna bärbara datorn.

Anledningen till att man använder en fristående bearbetningsenhet är att ljudkortet i en pc inte klarar 48 ljudkanaler och

att en Windows-pc inte skulle hinna med att fouriertransformera data på rimlig tid. GFal:s senaste matris har 120 mikrofoner och det skulle ge pc:n ännu mer problem.

Den akustiska kameran fungerar precis som öronen, fast oändligt mycket noggrannare. När ljudvågen faller in mot matrisen korreleras fasskillnaderna och tidskillnaderna används för att bygga upp en bild av var ljudet kom ifrån. Ljud kan emellertid falla in från flera håll samtidigt och bestå av ett helt spektrum och det är där de smarta algoritmerna kommer in.

## Börja mäta

En mätning börjar alltid på samma sätt:

Mikrofonmatrisen ställs upp på specificerat avstånd från mätobjektet varefter man kör motorn, symaskinen, vindkraftverket eller raffinaderiet ett par minuter och spelar in alla 48 kanalerna.

Det digitalomvandlade ljudet lagras och kan därefter behandlas på ett flertal sätt: frekvensanalys, filtreringar, vägningskur-







vor, orderanalys, tredjedels-oktavanalys.

Den erfarna vet direkt vilket frekvensområde som är intressant och ställer in programmets bandpassfilter till att ta fram detta frekvensband. I annat fall måste man göra research och sätta sig in i mätobjektet i förväg. Med hjälp av fouriertransformering kan man åstadkomma mycket branta filter, på upp till 120 dB/oktav. Därefter framställer programmet ett akustiskt foto av den ljudbild det "hört" och visar ljudtrycket som olika färger på datorn.

Vet man inte vad som är intressant kan man göra ett spektrogram av inspelningen, alltså ett diagram som visar hela inspelningen med frekvenserna efter Y-axeln och tiden efter X-axeln. Nu är det tämligen lätt att urskilja de intressanta bitarna, till exempel dominanta frekvensband eller formationer som återkommer, till exempel skarpa kanter eller böjar en gång för varje varv vindkraftverket svänger.

Man drar upp en markeringsruta runt just det man är intresserad av, till exempel

bara en tjutande maskindel, bara en visslande backspegel, eller sekunderna när jetflygplanet flög förbi, då tar programmet ljudet från det markerade tidsavsnittet, filtrerar mellan de markerade frekvenserna och framställer ett akustiskt foto av bara detta.

### Att jobba i spektraldomänen

Men exakt vad ljudet består av, övertonerna och brustrattarna, vet vi ännu inte. Det akustiska fotot är indelat i akustiska pixlar (soxel) och genom att högerklicka på en soxel kan man visa hela spektrum för just denna, utan bandbegränsningar, i ett annat fönster.

Man kan dessutom lyssna på ljudet från varje soxel. Nu kan man tydligt se och höra vilka resonanser just denna punkt är utsatt för, om det till exempel är ett hålrum som uppvisar en grundton och övertoner, eller om det bara är brus.

Frekvenserna visas i klartext och konstruktören kan direkt på ändra konstruktio-

nen för att arbeta bort resonansen.

Antag istället att vi har några intressanta resonansstopp. Då kan vi låta programmet visa var på bilden just dessa frekvenser dominerar. Det kan underlätta om man till exempel ska tillverka avstämde absorberter.

### Varvtalsberoende visning

Programmet och A/D-omvandlaren har en ingång för varvtalsmätning. Maskiner man undersöker har en förmåga att låta olika vid olika varvtal. Kanske den eftersökta resonansen bara uppstår vid 1 356 varv per minut?

Därför kan man låta kameran fotografera vid stigande varvtal, varefter man kan titta på bilder som representerar olika varvtal och peka ut "heta" punkter och det varvtal de motsvarar.

### Line scan och filmer

Man varför inskränka sig till stillastående maskiner och industrier? Programmet är

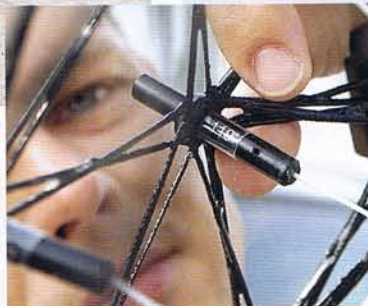




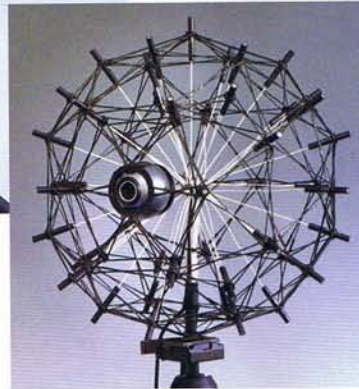
**Star 36, 3-meters hopfällbar stjärnstruktur med 36 mikrofoner, för utomhusbruk på längre avstånd, för industrier, fordonsljud m.m.**  
**Antal mikrofoner: 36**  
**Mätavstånd: 3 - 300 m**  
**Mätfrekvens: 100 Hz - 7 kHz**  
**Dynamiskt område: 35 - 130 dB**  
**Diameter: 3,4 m**



**Ring 48-75 DIF, en 75-centimeters kolfiberring med 48 mikrofoner, för inom- eller utomhusbruk på relativt korta avstånd.**  
**Antal mikrofoner: 48**  
**Mätavstånd: 0,5 - 10 m**  
**Mätfrekvens: 300 Hz - 20 kHz**  
**Dynamiskt område: 35 - 130 dB**  
**Diameter: 75 cm**



**Små elektretmikrofoner används, anslutna till MicBus-mikrofonanslutning.**



**Sphere 32, en 32-centimeters boll med 32 mikrofoner, för 3D-bruk i små utrymmen, t ex bilar för att söka knak, klickljud och vindbrus.**  
**Antal mikrofoner: 32**  
**Mätavstånd: 0,3 - 1,5 m**  
**Mätfrekvens: 1 kHz - 10 kHz**  
**Dynamiskt område: 35 - 130 dB**  
**Diameter: 32 cm**

➤ kapabelt att filma med digitalkameran medan ljudet samlas in. Efteråt ändrar man bara visningsmetoden lite och visar filmen medan man visar en serie akustiska foton ovanpå bilden. Ljudbilden kommer att röra sig med den optiska bilden och det blir uppenbart exempelvis vilken ving på vindkraftverket som bullrar mest och om den bullrar mest på väg upp eller på väg ned.

Ett helt snabbtåg får inte plats på en bild och även om det gjorde det så finge man ingen bra upplösning. Då kan man ställa kameran vid banvallen och filma medan tåget far förbi, med samma metod som ett målfoto på en travbana, även kallat Line scan.

## Reflexer

Ljud är som ljus. Det bryts och reflekteras och det får man se upp med när man fotograferar, så man inte misstolkar en reflex i en motorhuv för ett ljud. Mätningar på mindre enheter gör man därför företrädesvis i ett ekofritt rum. Utomhus är blåsten den värsta fienden eftersom den kan åstadkomma buller eller störa mätutrustning.

## CAD och 3D

GFal:s mest avancerade mikrofonmodell är sfärisk och kan uppfatta ljud från alla håll, eller i tre dimensioner om man så vill. Det tillhörande programmet kan sedan vränga

## Produkterna

Acoutronic distribuerar mätinstrument från hela världen, huvudsakligen till Norden och Baltikum. Här är några av de akustiska kamerorna från GFal Tech GmbH.

Matrisens storlek avgör den undre gränsfrekvensen, för om avståndet mellan de yttersta mikrofonerna blir mycket mindre än en våglängd blir mätningarna meningslösa. Alla enheter har en USB-kamera mitt fram för den optiska bilden.

ut bilden och mappa den på en CAD-modell av det man mätt på, till exempel insidan av en bil. Det kallas ett akustiskt 3D-foto. Då går det att se var bullret kommer in, eller vilka delar av bilen som knirkar eller var vindbruset kommer från.

Just biltillverkare har mycket strikta krav på hur deras produkt ska låta, medan myndigheterna har krav på att den inte ska låta. En bil har sitt karaktäristiska "sound", ett särskilt muller och helst ska inga andra ljud störa eller låta "plastiga". En bildorr som stängs ska låta bastant och stabil utan andra knirkanden och fönsterhissar får inte skrapa.

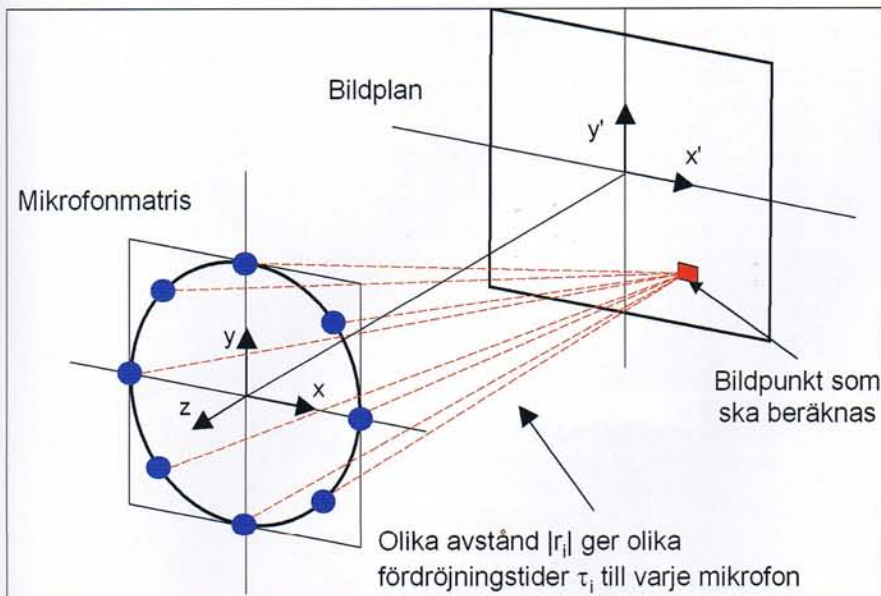


**mcdRec 721, datainsamlingsenhet och A/D-omvandlare för mikrofonerna och andra sensorer. Upp till 144 mikrofonkanaler (sampling 48 - 192 KS/s). Upplösning: 24 bitar. Inspelningsbuffert vid 192 KS/s: 43 sek. 12 digitala inkanaler (sampling upp till 6,1 MS/s). 1 Gbps Ethernet mot pc**  
**Dessutom behövs programvaran Noise-Image för visning och efterbehandling i pc.**

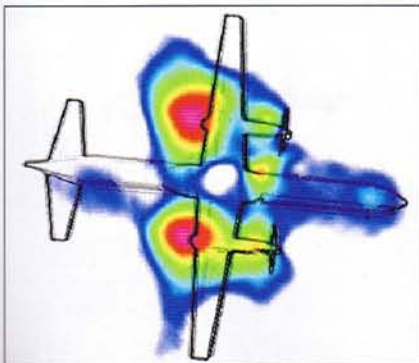
Ett fenomen som är svårt att komma åt är vindtjut runt utstickande delar i höga farter. Visst kan man ställa en bil i vindtunnel och försöka lyssna sig fram till vad det är som tjuter, men den akustiska kameran ger svaret direkt.



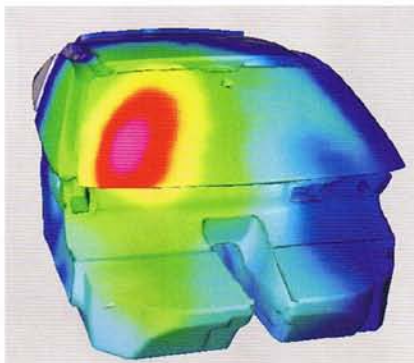
I line scan-läge kan ett helt tåg åka förbi, i detta fall ett tyskt intercitytåg. Man registrerar tåget allt eftersom det åker och visar som en enda lång bild. Du ser att det är det dragande loket och den närmsta vagnen som bullrar mest och intressant nog även strömvagnaren på motorvagnen i slutet.



Principen är enkel. Ljudet från en ljudkälla tar olika lång tid på sig att nå fram till mikrofonerna och genom att man vet var mikrofonerna finns kan man beräkna ljudkällans läge. Det blir mera komplicerat om det finns flera ljudkällor, men principen är den samma. Om frekvensen är låg och ljudet utan transienter mäter man istället fasförhållandet mellan de olika mikrofonerna. Det fungerar redan med två mikrofoner, men med 48 ökas noggrannheten och man kan mäta i höjdlängd också.



Inte helt oväntat är det motorerna som bullrar på ett flygplan. Turbinernas utblås bullrar mer än propellerna.



Bullret inuti en bil mappat på CAD-modellen av karossen, så man kan vrida och vända på den.

## Slipper höra

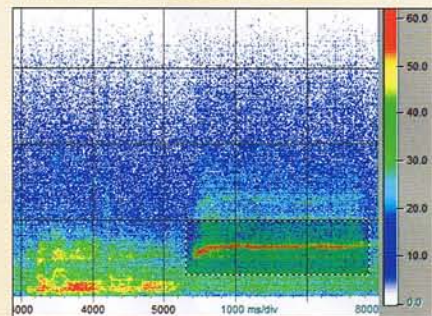
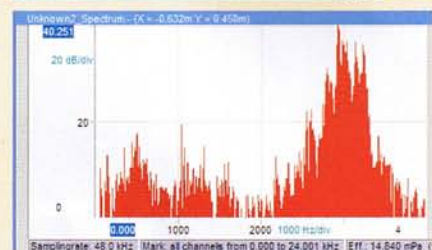
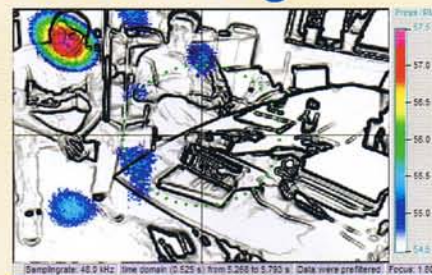
Den akustiska kameran har öppnat en ny dimension för den hörande människan. Det man tidigare sökte efter med ljus och lykta är idag uppenbart och rullar fram som lättolkade bilder på en bildskärm. Snart kan den akustiska kameran ta oss ännu längre. Forskning pågår för att kunna avgöra ljudets utstrålade effekt och därmed kunna beräkna hur långt bullerstörningarna når, allt för att den hörande människan i möjligaste mån ska slippa höra.



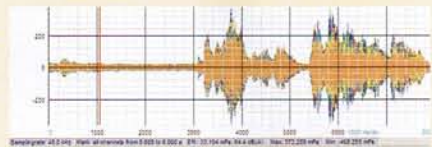
## Läs mer

Om den akustiska kameran:  
[www.acoustic-camera.com](http://www.acoustic-camera.com)  
 Acoutronic finns på  
[www.acoutronic.se](http://www.acoutronic.se)  
 GFal Tech GmbH tillverkar kameran:  
[www.gfaitech.de](http://www.gfaitech.de)  
 Läs särskilt broschyren:  
[www.acoustic-camera.com/pdfs/AC\\_Broschuere\\_2008.pdf](http://www.acoustic-camera.com/pdfs/AC_Broschuere_2008.pdf)  
 Brüel & Kjaer gör också mikrofonmatriser: [www.bksv.com](http://www.bksv.com) och sök "holography"

## En vissling



Ljudkameran ser oss församlade runt ett konferensbord och du ser diverse grejor på bordet. Den optiska bilden är i kantvisningsläge. En person visslar och du ser den höga intensiteten (lila) runt munnen. Högerklickar man på en akustisk pixel visas spektrumet där de högsta topparna i brustratten ligger runt 3 kHz. Den blågröna ljudpannkakan på golvet är en reflex. Hur hittade vi visslingens frekvenser bland projektorns muller och allt prat i rummet? Den nedersta bilden visar spektrogrammet och den lite mörkare rutan visar hur vi skurit ut en fast (röd) linje som utgör visslingen runt 3 kHz.



Fallet med visslingen i råformat. Alla de insamlade 48 kanalerna tillsammans ser ut som vilket digitaliserat ljud som helst. Zoomar man på en sekvens, bara visslingen, ser vi de olika sinusvågornas tidsförskjutningar. Vi har satt markören på mikrofon 35 och ljudtrycket är för närvarande 168 mPa.