

ORIENTERING FRA MILJØSTYRELSENS REFERENCELABORATORIUM FOR STØJMÅLINGER

MÅLING AF HØRBARE TONER I STØJ

Orientering nr. 13

Torben Holm Pedersen/OC/JJ/td

1991-05-03

PRAKTISKE ANVISNINGER TIL UDFØRELSE AF TONEANALYSER,
- OGSÅ TIL BRUG I DE "SVÆRE" TILFÆLDE

- Tolkning af frekvensanalyser
- Toneniveau for toner med varierende amplitude og/eller frekvens
- Definition af kriteriekurven
- Smalle støjbånd
- Appendix med praktiske anvisninger til frekvensanalyse
- Spørgsmål og svar:
Hvilket niveau skal måleudstyret vise ved akustisk kalibrering

1. INDLEDNING

Den metode, der i dag benyttes til objektiv analyse af hørbarheden af toner i støj, blev første gang offentliggjort på et Nordisk Akustisk Møde (NAM) i 1978 [1]. Metoden blev derefter brugt af et stigende antal laboratorier til støtte for de subjektive vurderinger. Metoden blev i Miljøstyrelsens vejledning

nr. 6/1984: "Måling af ekstern støj fra virksomheder" [2] den officielle metode i Danmark og er i samme udformning anerkendt som fælles nordisk metode.

Formålet med denne udgave af "Orientering fra Referencelaboratoriet" er at give en sammenfatning af de erfaringer, der er gjort gennem årene, specielt med henblik på anvendelsen af metoden med den analysatortype, der til dette formål er næsten enerådende i dag: FFT-analysatoren. Erfaringsmaterialet stammer dels fra de sammenlignende målinger, dels fra de analyser, Referencelaboratoriet er blevet bekendt med ved kontakten til laboratorierne, fra oplevelser i forbindelse med undervisning og endelig fra Lydteknisk Instituts egne målinger.

Rækkefølgen af emnerne i denne "Orientering" følger Miljøstyrelsens vejledning nr. 6/1984: "Måling af ekstern støj fra virksomheder" [2], Afsnit 7: "Korrektion for indhold af toner". Derfor er det en fordel, hvis man er bekendt med målemetoden, eller at man har vejledningen ved hånden.

2. GENERELT

Formålet med en objektiv målemetode for toners hørbarhed er at skabe et ensartet grundlag for administrationen af det 5 dB tillæg, der skal gives til det målte L_{Aeq} , hvis støjen fra en virksomhed indeholder tydeligt hørbare toner. Det er hensigten med målemetoden, at den skal stemme overens med gennemsnittet af mange subjektive vurderinger.

Da der forekommer store afvigelser mellem forskellige personers subjektive vurderinger af hørbarheden af den samme tone (på grund af forskellig "følsomhed" for toner i støj), vil nogen opleve uoverensstemmelser mellem objektive målinger og subjektive vurderinger. Erfaringerne indtil nu tyder dog på, at der i gennemsnit for toner over et stort frekvens- og niveauområde er god overensstemmelse mellem objektive analyser og subjektive vurderinger.

Det er i almindelighed god praksis at udføre objektiv toneanalyse i forbindelse med støjmålinger. Også i tilfælde hvor måleteknikeren måske ikke er i tvivl om, hvorvidt støjen indeholder tydeligt hørbare toner, kan en toneanalyse give væsentlig information om støjens karakter og eventuelle toner, man måske ikke subjektivt er opmærksom på i første omgang. Specielt i sager, hvor der er gennemført dæmpning af støj med toner, er en objektiv toneanalyse overbevisende dokumentation for om støjdæmpningen er lykkedes.

Som en generel bemærkning, skal det i øvrigt anføres, at selv om én tydeligt hørbar tone (eller tonekompleks) er tilstrækkeligt til at udløse et 5 dB tillæg, bør alle toner, som for den pågældende virksomhed kan udløse 5 dB tillægget, nævnes i rapporten over støjmålingen.

3. FREKVENSANALYSE

For objektivt at kunne vurdere tonernes hørbarhed skal der udføres en frekvensanalyse. Enhver frekvensanalysator med tilstrækkelig opløsning kan anvendes. Analysen er ikke i sig selv en del af målemetoden, men da der i praksis har vist sig forskellige problemer ved udførelsen af frekvensanalyserne, er det i appendixet omtalt, hvorledes frekvensanalyserne mest hensigtsmæssigt udføres i praksis.

Analyserne udføres normalt ud fra båndoptagelser foretaget med lineær frekvensvægtning. For toner med frekvens over ca. 400-500 Hz kan man i nødstilfælde bruge A-vægtede båndoptagelser, uden at det får væsentlig indflydelse på resultatet.

I det følgende antages det, at der foreligger en frekvensanalyse udført efter appendixets anvisninger.

3.1 Tolkning af frekvensanalysen

Heldigvis er de fleste analyser normale i den forstand, at toner og støj er stationære, at der kun er en eller nogle få to-

ner inden for et kritisk bånd, og at støjen inden for dette forløber nogenlunde jævnt. I sådanne tilfælde kan analysen gennemføres efter vejledningen [2] uden problemer.

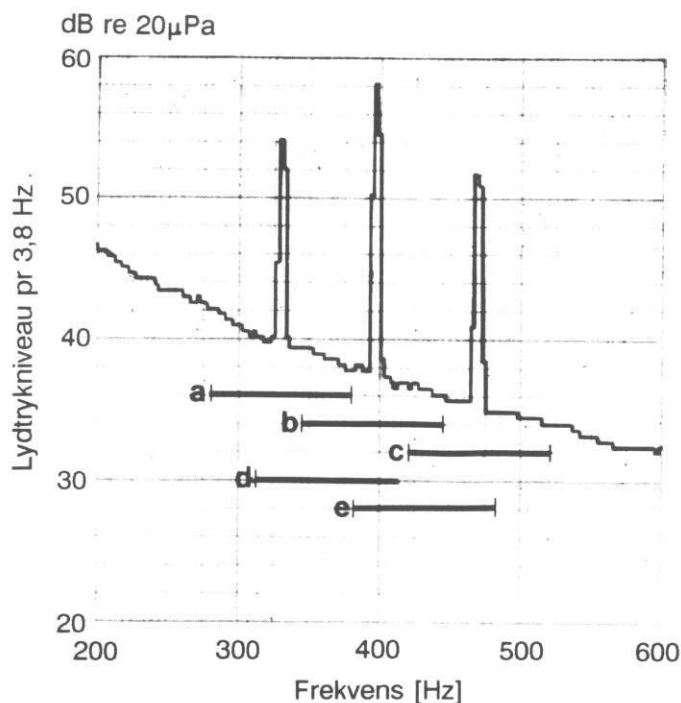
Placering af det kritiske bånd

Når der kun forekommer en enkelt tone i et kritisk bånd, placeres dette symmetrisk omkring tonen, dog således at hvis tonen er lavfrekvent, lægges det laveste kritiske bånd fra 20-120 Hz.

Det fremgår af vejledningen [2], at hvis der er flere toner, skal det kritiske bånd placeres, så det omfatter så mange toner som muligt. Hensigten er, at det kritiske bånd placeres således, at flest muligt af de tydeligste toner (de der stikker højest op over støjen på analysen) falder inden for det kritiske bånd. Idet det erindres, at ΔL_{ts} betegner forskellen mellem toneniveau og støjniveau i et kritisk bånd, kan dette også udtrykkes på følgende måde:

Hvis der forekommer flere toner i nærheden af hinanden, placeres det kritiske bånd således, at ΔL_{ts} maksimeres.

Dette er illustreret på Figur 1, som er eksempel 2 fra den 3. sammenlignende støjmåling.



Figur 1 Betydningen af korrekt placering af det kritiske bånd. I eksemplet er der fem muligheder. Placering e er den korrekte, jf. teksten.

Det kritiske bånd kan enten placeres symmetrisk om én af tonerne, angivet som a, b og c, eller omfattende to toner, vist som d og e. Da placering e giver 1,7 dB højere værdi af ΔL_{ts} end placering d er det placering e, der er den korrekte.

Aflæsning af toneniveau

Selv toner, der er stationære både i niveau og frekvens, vil oftest optræde som et antal nabolinier i spektret. Når dette er tilfældet, skal der ved aflæsning af toneniveauet, korrigeres for "Picket Fence"-effekten, jf. appendixet.

Fastlæggelse af støjniveau

Inden støjmålingen foretages, bør man gøre sig nogle overvejelser om oprindelsen af den støj, som kan maskere eventuelle toner.

Hvis både toner og den maskerende støj kommer fra virksomheden, foretages støjmåling og båndoptagelse af de relevante drifts-

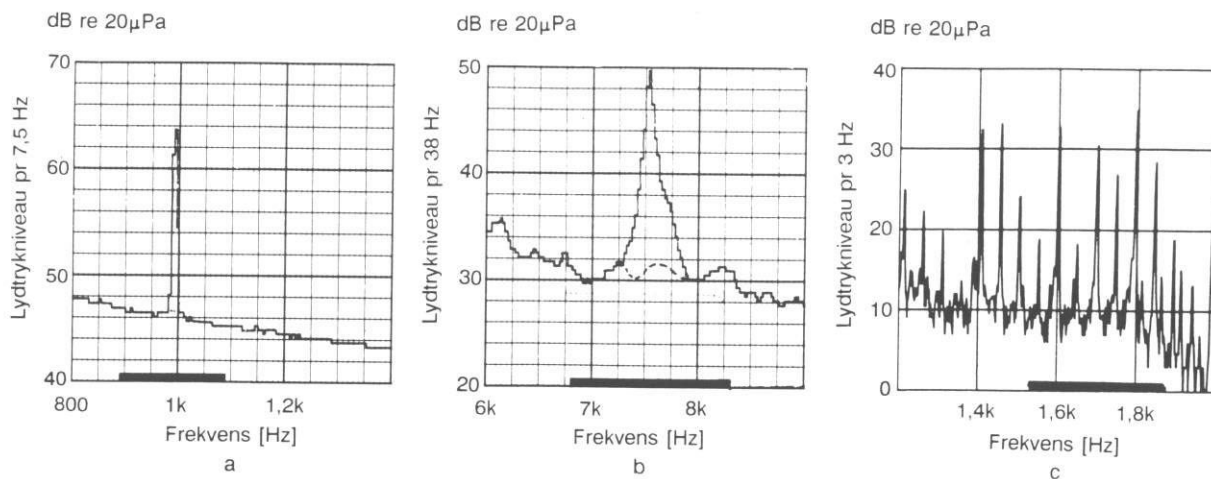
tilstande som normalt, d.v.s. med mindst mulig indflydelse fra baggrundsstøjen. Toneanalysen udføres så efterfølgende ud fra båndoptagelsen.

Hvis en væsentlig del af den maskerende støj derimod udgøres af baggrundsstøjen, er sagen lidt anderledes. I dette tilfælde bør målingen af tonernes hørbarhed foretages på de tidspunkter i virksomhedens normale driftstid, hvor den stationære del af baggrundsstøjen er lavest mulig.

Modsat måling af f.eks. L_{Aeq} af virksomhedsstøjen skal man altså ikke i forbindelse med toneanalysen nødvendigvis forsøge at "rense" målingen for al baggrundsstøj. Begrundelsen for dette er, at man ønsker en belysning af, om eventuelle toner høres i en sådan grad, at de skal udløse et 5 dB tillæg. Denne vurdering bør derfor ske under repræsentative forhold. Dette kan specielt få betydning, hvis man af måletekniske grunde arrangerer målinger om natten af virksomheder, der normalt kun er i drift om dagen.

Når dette er sagt, skal vi vende os til en tolkning af den udførte frekvensanalyse:

Når støjspektret forløber jævnt som illustreret på Figur 2a, er der ingen problemer med at fastlægge middelstøjniveauet.



Figur 2 Eksempler på fastlæggelse af middelstøjniveauet i et kritisk bånd —. Skøn af støjspektrets forløb er vist med punkteret streg.

I eksempel 2b dækker tonen en stor del af det kritiske bånd. Det vurderes, at hele maksimum skyldes tonen. Middelstøjniveauet må derfor fastlægges på basis af et skøn over støjspektrets forløb med udgangspunkt i "naboområderne" til tonen. Der ses bort fra eventuelle maksima, som skyldes tilstedeværelsen af toner.

Analysen i eksempel 2c er udført med en båndbredde, der er væsentligt smallere end den i vejledningen [2] krævede. Analysen viser så mange og tætliggende toner, at støjspektret vil gemme sig helt i tonespektret, hvis analysen ikke er udført med ekstra stor opløsning. Da det er væsentligt, at tonekomponenter ikke regnes med til den maskerende støj, illustrerer dette eksempel, at det i visse tilfælde kan være nødvendigt at benytte mindre analysebåndbredder end de, der ifølge vejledningens Tabel 7.1 normalt er tilstrækkelige.

Amplitudemodulerede toner

Ved amplitudemodulerede toner forstås her toner, hvis niveauvariation er en karakteristisk egenskab, som skyldes støjkil-

den. Amplitudevariationer som skyldes meteorologiske forhold, skal i lighed med måling af L_{Aeq} håndteres ved at bruge lange integrationstider.

Det skal indskydes, at hvis toneniveauet varierer på grund af forskellige driftstilstande, skal sagen behandles ved at opdele støjen i perioder svarende til disse. Der skal så kun gives 5 dB tonetillæg for de perioder, hvor tonen er tydeligt hørbar, jf Miljøstyrelsens vejledning nr. 5/1984 [3], Afsnit 9.8.

Amplitudemodulerede toner (f.eks. stødtonefænomener) eller toner, hvis lydtrykniveau fluktuerer, mens lydtrykniveauet af den øvrige støj i det aktuelle kritiske bånd er konstant, er omtalt i vejledningen [2] Afsnit 7.3. Det er her angivet, at toneniveauet sættes lig med det højest forekommende lydtrykniveau af tonen, målt med tidskonstant F (FAST).

Der skal knyttes to bemærkninger til dette:

- Selv om det ikke fremgår eksplicit, bør maksimalværdien fastsættes efter samme metode, som anvendes til bestemmelse af L_{pAmax} , dvs. ved midling af mindst fem forekomster af maksimalniveauet.
- På en FFT-analysator er det kun muligt med tilnærmelse at måle med tidskonstanten F. Den bedst mulige tilnærmelse er angivet i appendixet.

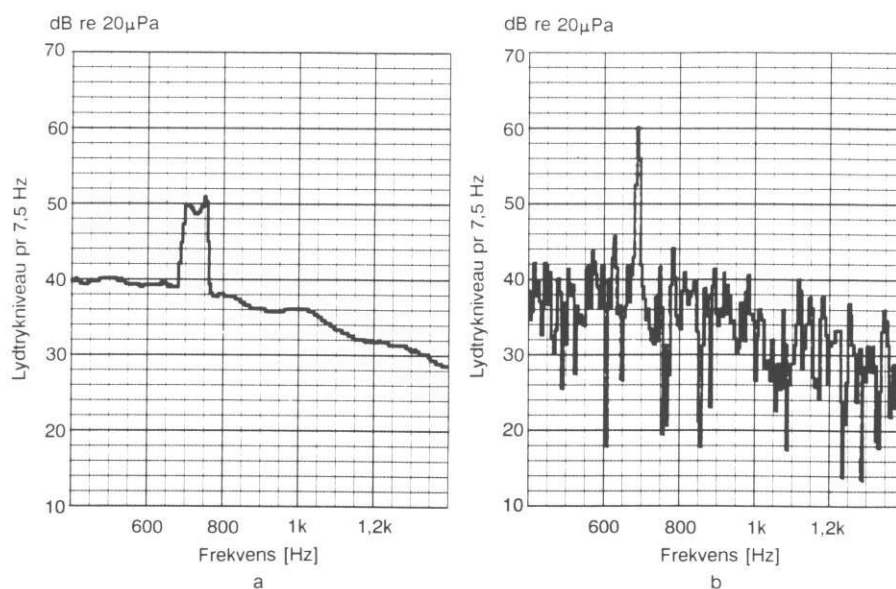
Sammenfattende kan anføres, at toner med konstant amplitude måles med lang integrationstid medens toner, der på grund af støjkilden har varierende niveau, analyseres med tidsvægtning F.

Toner med varierende frekvens

Hvis den samme tone optræder på mange linier i spektret, kan det være tegn på, at tonen varierer i frekvens. Når det er tilfældet, er der principielt to måder, analysen kan foretages på:

Hvis tonen har konstant niveau, kan der bruges lang integrationstid (midling af mange spektre). Herved vil tonens frekvens variere i løbet af analysen, og tonen vil vise sig som en "ud-

tværet top" i spektret, se Figur 3. Eksemplet på figuren stammer fra 7. sammenlignende støjmåling.



Figur 3 Analyse af en tone med varierende frekvens, a: med lang integrationstid, tonen optræder som et bredt maksimum. b: med kort integrationstid, støjniveauet er svært at bestemme nøjagtigt.

Hvis tonens niveau er konstant, kan toneniveauet bestemmes ud fra Figur 3a ved energiaddition af maksimaets linier med fradrag for det overlap der er mellem de effektive båndbredder (1,8 dB ved Hanning-vægtning, jf. appendixet).

En bedre metode er imidlertid at bestemme tonens niveau med så få midlinger, at tonefrekvensen ikke når at ændre sig væsentligt i midlingstiden, idet denne metode også er anvendelig for toner, der både varierer i niveau og frekvens. Det skal erindres, at niveauet af toner, der varierer i amplitude, skal fastlægges som den størst forekommende værdi med tidsvægtning F.

Figur 3b viser samme støjeksempel som Figur 3a, men denne gang med en midlingstid svarende til F. Kun tonens niveau kan fastlægges ved denne analyse. Støjniveauet i det omliggende kritiske bånd findes af analysen på Figur 3a, idet ubestemtheden ved aflæsning på Figur 3b er uacceptabelt stor.

4. KRITERIEKURVEN

Når tone- og støjniveau er fastlagt i de aktuelle kritiske bånd, trækkes støjniveauet fra toneniveauet, og man har ΔL_{ts} , som ved hjælp af kriteriekurven - se vejledningens [2] Figur 7.1 - afgør, om der skal gives et 5 dB tillæg til det målte L_{Aeq} .

Ikke sjældent hænder det, at ΔL_{ts} ligger tæt på kriteriekurven, og det har derfor været et ønske at få defineret denne nærmere.

Kriteriekurven er givet ved udtrykket

$$\Delta L_{ts, \text{kriterie}} = 4,5 - \log (1 + (f/502)^{2,5}) \quad [\text{dB}]$$

hvor f er tonens frekvens i Hz. Hvis der er flere toner, benyttes centerfrekvensen af det aktuelle kritiske bånd.

Værdier efter ovenstående formeludtryk er givet i Tabel 1.

Frekvens, Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000
Kriterium, dB	4,5	4,5	4,5	4,5	4,4	4,4	4,3	4,2	4,1	3,9	3,7
Frekvens, kHz	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5
Kriterium, dB	3,5	3,2	3,0	2,7	2,5	2,2	2,0	1,8	1,5	1,3	1,0

Tabel 1 Kriteriekurven for ΔL_{ts}

5. MÅLEUBESTEMTHED

Selv om kriteriekurven nu er defineret med stor nøjagtighed, må man ikke se bort fra, at der til bestemmelsen af ΔL_{ts} er knyttet en vis måleubestemthed. De sammenlignende støjmålinger viser, at alene den analysebetingede ubestemthed mellem forskellige laboratoriers analysepraksis giver en spredning på 0,6-1 dB.

Når metoden er udformet som den er med én kriteriekurve der udløser et 5 dB-tillæg, kan selv meget små ubestemtheder få en

uhensigtsmæssig "ON/OFF"-effekt, når ΔL_{ts} ligger i nærheden af kriteriekurven.

Det må derfor anbefales, at der særskilt gøres opmærksom på måleubestemtheden på ΔL_{ts} , når denne kan få afgørende indflydelse på tildelingen af tonetillægget.

6. GRÆNSETILFÆLDE

6.1 Smalle støjbånd

Af og til forekommer det, at lyde, der opfattes som toner i virkeligheden ikke er toner, men snarere smalle støjbånd.

Som den objektive målemetode er beskrevet i vejledningen [2], handler den strengt taget kun om toner. Hverken ved subjektiv vurdering eller FFT-analyse er det dog muligt at skelne en tone med varierende amplitude fra et meget smalt støjbånd. Det vil derfor være rimeligt at behandle smalle støjbånd på samme måde som toner med varierende amplitude.

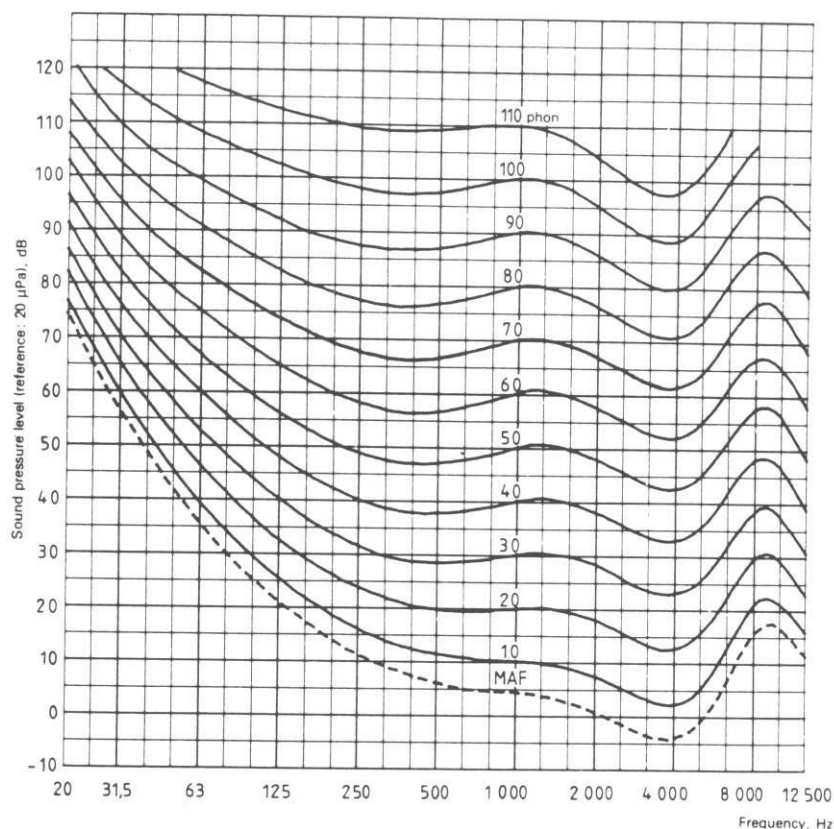
Hvis man som et eksperiment forestiller sig, at man gradvist øger båndbredden af et smalt støjbånd, vil den subjektive opfattelse gradvist ændre sig fra at være en tonefornemmelse, til at støjbåndet bare opfattes som en spektral "farvning" af den øvrige støj, og dermed som et fænomen der ikke har med toner at gøre.

Referencelaboratoriet vurderer, at hvis smalbåndsstøjen har en bredde (3 dB båndbredde, d.v.s. Frekvensområdet mellem punkter med et niveau på 3 dB under smalbåndsstøjens maksimum) på mindre end 10% af båndbredden af det kritiske bånd, hvori den forekommer, vil det være rimeligt at vurdere fænomenet på samme måde som toner med varierende amplitude.

6.2 Lave frekvenser

Når der forekommer toner ved lave frekvenser, skal man være opmærksom på om toneniveauet ligger over høretærsklen. Hvis tone-

niveauet ikke er højere end høretærsklen, er det fejlagtigt at kalde det "tydeligt hørbart". Toneniveauet skal også i denne forbindelse opfattes som "RMS"-summen af alle toner inden for et kritisk bånd. Høretærsklen er vist på Figur 4.



Figur 4 Høretærskel (MAF) for toner ifølge ISO 226, 1987 (4).

7. AUTOMATISERING AF TONEANALYSEN

Hvis man råder over en computer med mulighed for tilslutning af FFT-analysatoren (normalt via et IEEE-interface), er der mulighed for at hente de målte spektre over i computeren og viderebehandle dem der.

Mest oplagt er det at erstatte den visuelle midling af støjniveauet i et kritisk bånd med en beregning af dette ud fra den foreliggende analyse. Det kan endvidere være en lettelse at benytte den i Afsnit 4 omtalte formel for kriteriekuven ved sammenligning af tone- og støjniveau.

Det kan nævnes, at Lydteknisk Institut er ved at udarbejde et PC-program til automatisk toneanalyse ud fra de målte spektre.

8. REFERENCER

- [1] Proceedings, Nordisk Akustisk Møde, 1978: "Forslag til objektiv målemetode for hørbare toner i støj". Torben Holm Pedersen, Lydteknisk Laboratorium.
- [2] Vejledning fra Miljøstyrelsen nr. 6/1984: "Måling af ekstern støj fra virksomheder". November 1984.
- [3] Vejledning fra Miljøstyrelsen nr. 5/1984: "Ekstern støj fra virksomheder". November 1984
- [4] International Standard, ISO 226, 1987: "Normal equal loudness level contours".
- [5] Technical Review No 3, 1987: "Windows to FFT Analysis" (Part 1). Brüel & Kjær.
- [6] Technical Review No 4, 1987: "Windows to FFT Analysis" (Part 2). Brüel & Kjær.

SPØRGSMÅL OG SVAR

Hvilket niveau skal måleudstyret vise ved akustisk kalibrering?

De mikrofoner der normalt anvendes til støjmålinger, er såkaldte "frifeltsmikrofoner". Denne mikrofontype har en tilnærmelsesvis ret frekvensgang i et plant lydfelt, når mikrofonens membran er vinkelret på lydfeltets udbredelsesretning, dvs. når mikrofonen "peger mod lydkilden".

Frifeltsmikrofoners følsomhed for lydtryk, der optræder i små lukkede hulrum (trykfølsomheden), - som f.eks. lydtrykket i en kalibrator eller pistonfon, er derimod afhængigt af frekvensen. Trykfølsomheden aftager ved frekvenser over ca. 500 Hz.

1000 Hz akustiske kalibrаторer

Når en lydtrykmåler eller et målesystem med en ½" frifeltsmikrofon kalibreres med en kalibrator med frekvensen 1000 Hz (som f.eks. Brüel & Kjær 4230), skal mikrofonen justeres til at vise et lydtrykniveau, der er 0,2 dB lavere end kalibratorens faktiske lydtrykniveau, idet mikrofonens trykfølsomhed er ca. 0,2 dB lavere end frifeltsfølsomheden ved denne frekvens.

For 1" frifeltsmikrofoner er den tilsvarende korrektion -0,4 dB.

I forbindelse med ekstern støj kan trykmikrofoner finde anvendelse til målinger i diffuse lydfelter (indendørs). Ved kalibrering af trykmikrofoner anvendes kalibratorens lydtrykniveau uden korrektioner.

Kalibratorens nominelle lydtrykniveau (f.eks. 94,0 dB re 20 µPa for Brüel & Kjær 4230) kan anvendes som udgangspunkt, men kalibreringsnøjagtigheden kan forbedres, hvis det individuelle lydtrykniveau benyttes. Dette er påtrykt kalibreringsmærkaten, hvis kalibratoren er blevet kalibreret hos Lydteknisk Institut.

Eksempel: Mærkatene på en kalibrator angiver, at dens lydtrykniveau er på 94,1 dB. Når denne kalibrator anvendes på udstyr forsynet med en ½" frifeltsmikrofon, skal udstyret justeres til at vise $94,1 - 0,2 = 93,9$ dB ved kalibreringen.

Pistonfoner, Bruel & Kjør type 4220 og 4228

Pistonfonernes frekvens er ca. 250 Hz. Ifølge ovenstående skal der altså ikke korrigeres for forskel i mikrofonens trykfølsomhed og frifeltfølsomhed, idet forskellen ved 250 Hz tilnærmelsesvis er 0 dB. Derimod skal måleudstyret stilles til "lineær" frekvensvægtning ved kalibreringen, da A-vægtningsfilteret dæmper $8,6 \pm 1$ dB ved 250 Hz, og der skal tillige korrigeres for det atmosfæriske tryk.

Pistonfonens lydtryk er proportionalt med det atmosfæriske tryk, og dens nominelle lydtrykniveau er angivet ved 1 atmosfære. Derfor skal det nominelle niveau korrigeres før man har pistonfonens reelle lydtrykniveau ved det aktuelle atmosfæriske tryk. Korrektionen kan aflæses direkte på det til pistonfonen hørende barometer eller beregnes, jf. apparatets brugsanvisning.

Også for pistonfoner kan kalibreringsnøjagtigheden forbedres, hvis det individuelle lydtrykniveau benyttes frem for det nominelle.

Appendix

Udførelse af frekvensanalyse

Resumé

Frekvensanalyse med FFT-analysator

Kalibrering: Øvre frekvensgrænse vælges til ca. det dobbelte af kalibratorens frekvens. Brug eksponentiel midling og 8-16 spektre. Husk at korrigere for "Picket Fence"-effekt.

Analyse: Først orienterende analyse med forskellige øvre grænsefrekvenser og lineær midling med 16-32 spektre.

Ved den egentlige analyse vælges øvre grænsefrekvens sådan, at de interessante toner ligger i spektrets øverste 2/3. Brug normalt 200-500 spektre og Hanning-vægtning.

Hvis der er tale om tidsmæssige variationer, analyseres disse med eksponentiel midling af 2 spektre og øvre grænsefrekvenser på 2, 5, 10 eller 20 kHz.

Husk at korrigere for "Picket Fence"-effekt ved aflæsning af toneniveauer. Ved beregning af støjniveauer huskes at den effektive analysebåndbredde er 1,5 gange linieafstanden.

A.1 Frekvensanalysator

Frekvensanalysen kan i praksis udføres på en hvilken som helst frekvensanalysator, der giver tilstrækkelig frekvensopløsning til, at toner nær "medhørstærsklen" (dvs. høretærsklen for toner på støjbaggrund) kan skelnes fra støjen. I vejledningens Tabel 7.1 er angivet de største effektive båndbredder, det anbefales at bruge til analysen. Som det fremgår af tabellen, kan man enten bruge konstant relativ båndbredde (i %), eller man kan bruge konstant absolut båndbredde (i Hz).

Analysatorer med konstant relativ båndbredde er i praksis enten analoge analysatorer med båndbredden angivet i % eller digitale analysatorer, der udfører analysen parallelt i en række bånd af f.eks. 1/24 oktavs bredde. (1/24 oktav svarer til en båndbredde på ca. 3% hvilket i følge vejledningen kun giver tilstrækkelig opløsning op til 2 kHz).

Analysatorer, der bruges til analyser med konstant absolut båndbredde til nærværende formål, er udelukkende digitale FFT (Fast Fourier Transform) analysatorer. Ved normal brug giver disse i praksis altid tilstrækkelig opløsning.

Med enkelte undtagelser er det i dag FFT-analysatorer der, anvendes til toneanalyser og fremstillingen i det følgende vil koncentrere sig om denne analysatortype.

A.2 Indstilling af FFT-analysatoren

Langt størstedelen af analyserne bliver udført ud fra båndoptagelser af støjen fra den aktuelle virksomhed. Fordelen ved at analysere ud fra båndoptagelser er, at man herved kan udvælge passager med de ønskede driftsbetingelser og/eller lav baggrundsstøj. I det følgende antages det at analysen udføres ud fra en båndoptagelse.

A.2.1 Kalibrering

Først kalibreres analysatoren. Selv om kalibreringen ikke har betydning for afgørelsen af tonernes hørbarhed, skal alle analyser, der optræder i rapporter over "Miljømålinger - ekstern støj" være kalibrerede af hensyn til værdien som dokumentation.

Ved kalibreringen vælges mest hensigtsmæssigt en øvre grænsefrekvens, som er ca. det dobbelte af frekvensen af kalibreringstonen.

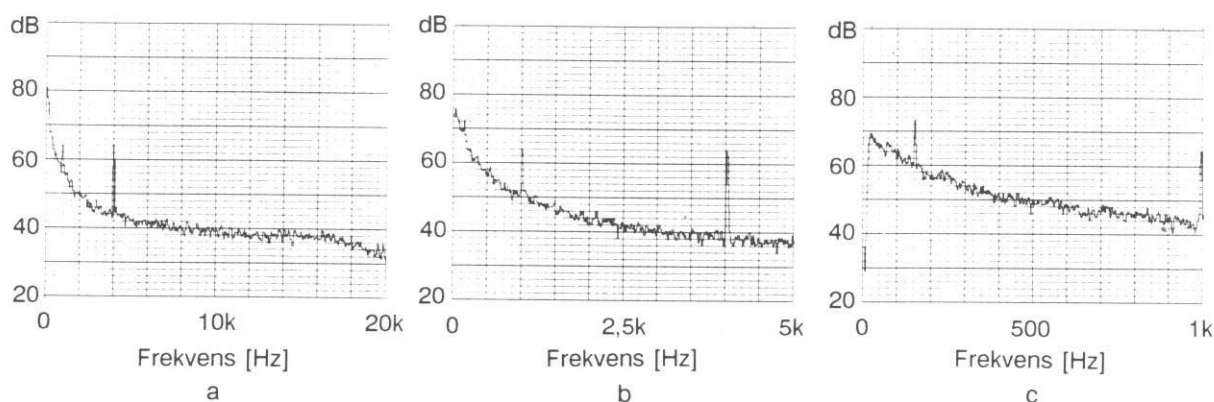
Analysatoren indstilles nemmest til kalibreringsniveauet ved at man i første omgang vælger eksponentiel midling med 8-16 spektrere. Husk at sætte en eventuel "display-vælger" til at vise det midlede (averaged) spektrum. Når dette er gjort, kontrolleres indstillingen ved en analyse med lineær midling over 20-30 sekunder af et område på båndet, hvor kalibreringstonen er stabil.

Husk at tage hensyn til bidrag fra nabolinier til kalibratorfrekvensen ("Picket Fence"-effekt, se Afsnit A 2.6). Dette er

også nærmere beskrevet i analysatorens manual og afhænger af den valgte vinduesfunktion (se afsnittet vedrørende dette). Korrektionsværdier for Hanning vindue er givet i Tabel A.1, side 24.

A.2.2 øvre grænsefrekvens

For at få overblik over indholdet af toner i hele frekvensområdet 20-20000 Hz bør der indledningsvis udføres et antal orienterende analyser, f.eks. med øvre grænsefrekvenser på henholdsvis 20 kHz, 5 kHz og 1 kHz, se Figur A.1. Man bør arbejde med midlende spektre, men midlingstiden kan være kort, f.eks. 16-32 spektre, da analysen jo kun er orienterende.



Figur A.1 Eksempel på 3 orienterende analyser af samme støj. Eksemplet stammer fra 3. sammenlignende støjmåling. Alle analyser er det midlede spektrum af 16 spektre. Øvre grænsefrekvenser er a: 20 kHz, b: 5 kHz, c: 1 kHz.

Ud fra disse orienterende analyser udvælges de mest relevante frekvensområder til de endelige analyser.

Når eventuelle toner er lokaliseret ved de orienterende analyser, bør det i øvrigt - med kort tidskonstant (tilnærmet F) - undersøges, om toner eller støj fluktuerer.

Analysatorens effektive båndbredde afhænger primært af den valgte øvre grænsefrekvens for analysen. Formelt vil det være tilstrækkeligt ved den egentlige analyse at vælge øvre grænse-

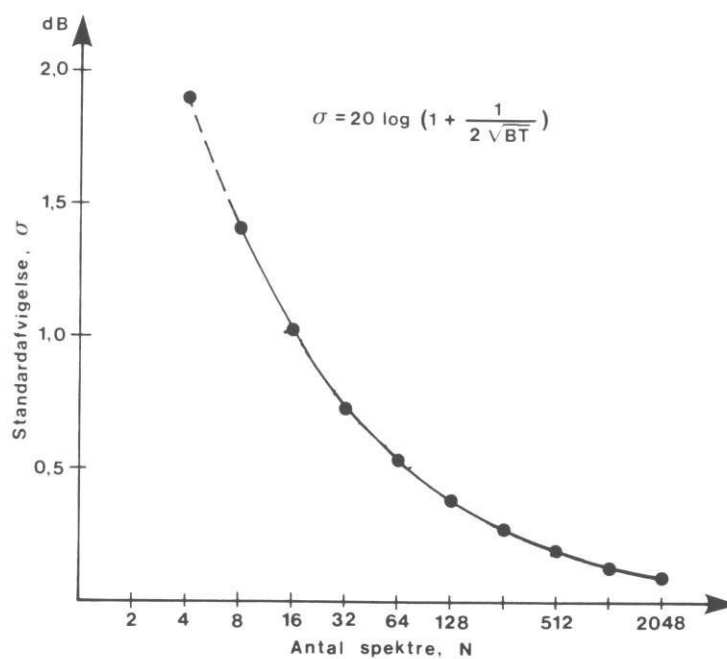
frekvens, så den effektive analysebåndbredde overholder kravene i vejledningens [2] Tabel 7.1.

Det kan dog anbefales at vælge den øvre grænsefrekvens således, at det aktuelle kritiske bånd falder inden for de øvre 2/3 af det spektrum, som er resultatet af analysen. Dette vil give den bedste opløsning (hvilket er en fordel ved flere tætliggende toner) og den mest overskuelige analyse. Kravet til den effektive båndbredde vil altid være opfyldt ved denne fremgangsmåde.

A 2.3 Analysetid (antal spektre)

Hvilken analysetid der skal vælges afhænger såvel af analysetekniske forhold og som af støjens tidsmæssige variation. Kun de analysetekniske forhold skal omtales på dette sted.

Ved analyse af et støjsignal (her betragtet som et teknisk fænomen, dvs. støj uden toner) er der en vis usikkerhed på bestemmelsen af RMS-værdien, der jo er grundlaget for lydtrykniveauet. Usikkerheden afhænger af analysebåndbredden B og af midlingstiden T . For en FFT-analyse kan ubestemtheden findes af Figur A.2.



Figur A.2 Standardafvigelsen for niveauet af de enkelte linier i et støjspektrum som er bestemt ved en FFT analyse der er midlet over N spektre (linenær midling).

Ud fra en betragtning om, at den apparaturbetingede ubestemthed bør ligge væsentligt under de øvrige ubestemtheder ved en støj-måling, ses af figuren, at det vil være rimeligt at midle 200- 500 spektre, svarende til en standardafvigelse på 0,3 - 0,2 dB.

Ovenstående gælder kun for støjsignaler. Den analysebetingede måleubestemthed for toner er væsentligt mindre. Allerede efter 20 perioder af tonen er den teoretiske ubestemthed mindre end 0,2 dB. Toner, der er beliggende i det resulterende spektrums øvre del, er allerede i det første spektrum repræsenteret med over 100 perioder. Det betyder, at den analysebetingede ubestemthed på toneniveauet, bestemt med et enkelt spektrum er, langt mindre end de ubestemtheder, der hidrører fra kalibrering o.l.

Tidsvægtning F (Fast)

Som omtalt kan toneniveauet bestemmes sikkert selv med en kort integrationstid. Det fremgår af vejledningen, at toner med

fluktuerende niveau skal analyseres med tidskonstant F (Fast). En FFT-analyse kan ikke udføres med en tidsvægtning, der fuldstændig svarer til F ifølge IEC norm 651.

Den bedste tilnærmelse til F fås ved at benytte Hanning-vægtning, eksponentiel midling af to spektre og en øvre grænsefrekvens (Full Scale Frequency) på 2, 5, 10 eller 20 kHz. Vælges 1 kHz grænsefrekvens, benyttes øjebliksspektret (dvs. ingen midling). Lavere øvre grænsefrekvens end 1 kHz bør ikke benyttes, idet midlingstiden bliver for lang i forhold til F .

I denne sammenhæng er analysatorens "real time"-frekvens væsentlig. Hvis denne er lavere end analysens øvre grænsefrekvens, vil der være "huller" i det analyserede signal, dvs. kortere eller længere perioder, hvor analysatoren ikke er "opmærksom" på signalet. Hvis analysatorens "real time"-frekvens er større end 1 kHz, er det dog ikke noget praktisk problem for de signaler der er aktuelle i forbindelse med toneanalyser, men hvis "real time"-frekvensen er væsentligt under 1 kHz, kan der forekomme betydende fejl ved analyse af fænomener, der varierer med tiden.

A 2.4 Effektiv analysebåndbredde

Man kan forestille sig, at linierne i FFT-spektret afbilder udgangsniveauet fra en række smalbåndsfiltre. Disse filtre er placeret med en vis frekvensafstand, også kaldet frekvensopløsningen eller linieafstanden, Δf .

Hvert filter har en båndbredde. Hvis der var tale om "almindelige" elektriske filtre kunne båndbredden være helt uafhængig af den linieafstand, man havde valgt. Ved FFT-analyse afhænger "filterbåndbredden" af linieafstanden og det valgte tidsvindue, men kun for et rektangulært tidsvindue er båndbredde identisk med linieafstand.

Når der i denne sammenhæng tales om et filters båndbredde er det vigtigt at bemærke, at det er filtrets effektive båndbred-

de, der tæller. Båndbredde kan også angives på andre måder (f.eks. 3 dB-båndbredden), men de benyttes ikke i denne sammenhæng.

Som nævnt har valget af tidsvindue (se næste afsnit) indflydelse på den effektive båndbredde. Ved analyser for hørbare toner benyttes sædvanligvis Hanning-vinduet, som giver en effektiv båndbredde på 1,5 gange linieafstanden. Hvis man råder over en analysator med "flat top"-vindue kan dette i visse situationer (især ved kalibrering) have sine fordele, idet man slipper for korrektion for "Picket Fence"-effekt. Den effektive båndbredde for dette vindue er 3,77 gange linieafstanden.

A 2.5 Tidsvinduer

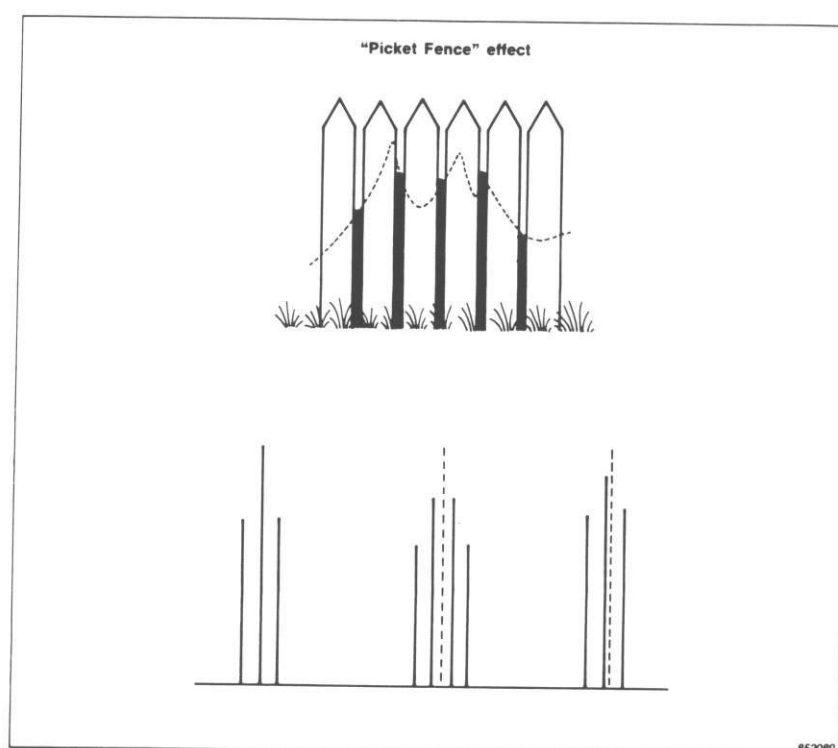
En FFT-analysator beregner hvert spektrum ud fra et tidsbegrænset stykke af det virkelige signal (en "record"). Dette stykke betragtes af analysatoren som en periode af et periodisk signal. D.v.s. at starten og slutningen af dette signalstykke kommer til at ligge lige ved siden af hinanden. For ikke at forskelle i start- og slutamplitude skal påvirke analyseresultat i for stort omfang, bruger man ved analyse af kontinuerede signaler sædvanligvis en vægtning af data, således at start og slutamplituden bliver nul - og dermed ens. Denne vægtningsfunktion kaldes et tidsvindue.

De mest udbredte analysatorer har et Hanning-vindue, som giver den ønskede undertrykkelse af start- og slutamplituderne og et rektangulært ("lin") vindue, som lader alle data være uændrede. Som allerede nævnt bruges Hanning vinduet i forbindelse med toneanalyser.

Hvis man opfatter FFT-analysatoren som en række parallelle filtre, kan man sige, at tidsvinduet har indflydelse på formen af filtrenes frekvenskarakteristik og dermed deres effektive båndbredde.

A 2.6 "Picket Fence"-effekt

De fleste signaler vi støder på har i virkeligheden kontinuerte spektre. Når vi har udført vores FFT-analyse, bliver disse spektre repræsenteret ved en række linier. Det kan sammenlignes med, at man betragter et bjerglandskab gennem et stakit, heraf navnet "Picket Fence"-effect ("stakiteffekt"). Dette er illustreret på Figur A.3. Denne effekt medfører at signalets frekvens og amplitude kun tilnærmelsesvis kan aflæses direkte på et FFT-spektrum.



Figur A.3 Illustration af "Picket Fence"-effekten. Af den øverste del af figuren fremgår, at kun et begrænset antal værdier af et kontinuert spektrum kan ses på analysatorens liniespektrum. Figurens nederste del viser, hvorledes en tone (punkteret linie) vil ses på liniespektret, alt efter hvorledes dens frekvens er i forhold til liniefrekvenserne. Fra Brüel & Kjær, Technical Review nr. 4, 1987 [6].

Det er i vidt omfang muligt, - og med hensyn til niveauet af (kalibrerings)toner som regel nødvendigt - at korrigere for denne effekt. Kun hvis tonefrekvensen er identisk med frekvensen af en af analysatorens linier, er "fejlen" nul.

Korrektionsværdierne fremgår af Tabel A.1, som stammer fra Brüel & Kjær, Technical Review nr. 4, 1987, som sammen med nr. 3 [5] samme år giver en udmærket og mere uddybende forklaring af de her omtalte fænomener.

ΔdB	ΔL	Δf	ΔdB	ΔL	Δf
0.0	1.42	0.50	3.0	0.33	0.24
0.2	1.33	0.48	3.2	0.29	0.23
0.4	1.23	0.47	3.4	0.25	0.21
0.6	1.14	0.45	3.6	0.21	0.19
0.8	1.05	0.43	3.8	0.18	0.18
1.0	0.97	0.41	4.0	0.14	0.16
1.2	0.89	0.40	4.2	0.12	0.14
1.4	0.81	0.38	4.4	0.09	0.13
1.6	0.74	0.36	4.6	0.07	0.11
1.8	0.67	0.35	4.8	0.05	0.10
2.0	0.61	0.33	5.0	0.04	0.08
2.2	0.55	0.31	5.2	0.02	0.06
2.4	0.49	0.29	5.4	0.01	0.05
2.6	0.43	0.28	5.6	0.01	0.03
2.8	0.38	0.26	5.8	0.00	0.02
			6.0	0.00	0.00

T01548GBC

Tabel A.1 Amplitude og frekvenskompensation for "Picket Fence"-effekten, når der bruges Hanning-vindue.

Tabellens indgangsparameter, $\Delta \text{ dB}$, er niveauforskellen mellem de to højeste linier for den aktuelle tone. Tonens niveau findes som niveauet af den højeste linie plus ΔL . Tonens nøjagtige frekvens, som dog ikke er relevant ved bestemmelse af hørbarheden, kan findes som frekvensen af den højeste linie korrigeret med Δf , i retning mod den næsthøjeste linie.