

SBI-publik

Måling af lydisololation og efterklangstid i praksis



Erfaringer og resultater

SBI-MEDDELELSE 82 · STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT 1990

SBI-fuld

Målinger af lydisolations og efterklangstid i praksis

Erfaringer og resultater

JØRGEN KRISTENSEN

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT

27 JULI 1992

Ex 1
00059 P



SBI-MEDDELELSE 82 · STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT 1990

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT

26 APR. 1990

SBI-meddelelser er rapporteringer, delrapporteringer og beretninger om forundersøgelser, konferencer, symposier m.v.

SBI-publikationer. Statens Byggeforskningsinstituts publikationer findes i følgende serier: Anvisninger, Rapporter, Meddelelser, Byplanlægning, Landbrugsbyggeri og Beton. Salg sker gennem boghandelen eller direkte fra SBI. Instituttets årsberetning og publikationsliste er gratis og kan rekvireres fra SBI.

SBI-abonnement. Instituttets publikationer kan også fås ved at tegne et abonnement. Det sikrer samtidig løbende orientering om alle nye udgivelser. Information om abonnenternes omfang og vilkår fås hos SBI.

ISBN 87-563-0759-4.
ISSN 0107-4180.
Pris: Kr. 68,00 inkl. 22 pct. moms.
Oplag: 600.
Renskrivning: Mona L. Jantzen.
Tryk: SBI, Hørsholm.

Statens Byggeforskningsinstitut.
Postboks 119, 2970 Hørsholm. Telefon 42865533.

Eftertryk i uddrag er tilladt, men kun med kildeangivelsen:
SBI-meddelelse 82: Målinger af lydisolation og efterklangstid i praksis. Erfaringer og resultater. 1990.

Indhold

FORORD.....	4
INDLEDNING OG KONKLUSION.....	5
Måling af lyd.....	5
Konklusion.....	6
TIDLIGERE UNDERSØGELSER.....	7
Undersøgelser af måleusikkerhed.....	7
Undersøgelse af en vægs lydisolation målt med forskellige højttalerkabinetter.....	9
Faldhøjdens betydning for bankemaskinens støjafgivelse.....	17
UNDERSØGELSE AF HØJTTALERE OG MÅLEPROCEDURER.....	21
Måling af reduktionstal for samme væg med to forskellige højttalertyper.....	21
Konklusion af undersøgelsen.....	24
Måling af efterklangstid.....	25
Måling af efterklangstid med to kabinettyper.....	26
Konklusion af undersøgelsen.....	28
Måling af efterklangstid i større rum.....	28
Undersøgelse af procedure for måling af efterklangstid i et større rum	28
Konklusion af undersøgelsen.....	30
SUMMARY	31
LITTERATUR.....	32

 Forord

Gennem de mere end 20 år Byggeriets Akustiske Målestation (BAM) har udført rekvireret teknisk prøvning inden for fagområdet akustik, har det været nødvendigt at udføre undersøgelser af det benyttede udstyr og de anvendte prøvningsmetoder for at sikre en målepræcision, som ikke er ringere end den, der opnås i de omliggende lande, som vi almindeligvis sammenligner os med. Med indførelse af autorisationsordningen gennem Statens Tekniske Prøvenævn blev sammålinger mellem autorisationsholdere en pligt for disse. Da erfaringerne fra nogle af de undersøgelser, SBI-BAM har foretaget, kan have interesse for andre, har SBI udgivet dem i denne SBI-meddelelse med resultater og konklusioner af de senest foretagne undersøgelser af måleprocedurer.

Ved målingerne har medvirket teknisk assistent Nina Herløv og ingeniør Leonard Juul Petersen. Desuden har civilingeniør Erling Sandermann Olsen medvirket såvel ved nogle af målingerne som ved den generelle diskussion af resultaterne.

STATENS BYGGEFORSKNINGSINSTITUT

Byggeriets Akustiske Målestation, december 1989

Jørgen Kristensen

 Indledning og konklusion

Måling af lyd

Den grundlæggende fysiske teori for lyd har været kendt i mere end hundrede år. Derimod har muligheden for at måle lyd med en rimelig nøjagtighed ikke eksisteret i stort mere end 50 år. Det antages ofte, at lyd er relativt let at måle, men praksis viser noget andet. Til trods for, at der findes specificerede målemetoder, så er forskellen mellem resultater målt under nogenlunde ens konditioner stadig temmelig stor.

Allerede i begyndelsen af halvtredserne begyndte man at standardisere akustiske målemetoder, i nogle tilfælde også målerum, hvilket efterhånden medførte mere ensartede måleresultater. Men først i de senere år er man gået videre og har undersøgt måleprocedurens indvirkning på måleresultater. Dette har medført en forøget målepræcision, men også mere omfattende måleprocedurer. Det gælder både for målinger udført i laboratorium og for feltmålinger.

Da Byggeriets Akustiske Målestation (BAM) begyndte sin virksomhed ved SBI i 1967, benyttede man en procedure, der ved måling af luftlydisolation foreskrev en højttalerplacering i senderum og tre mikrofonpositioner i henholdsvis sende- og modtagerum og ved måling af trinlydniveau to bankemaskinepositioner og tre mikrofonpositioner. Ved måling af efterklangstiden til brug ved korrektion for modtagerummets akustiske tilstand blev i begge tilfælde benyttet én højttalerposition og tre mikrofonpositioner i modtagerummet. I 1989 benyttedes en måleprocedure, der ved luftlydisolationsmålinger foreskriver brug af mindst to højttalerpositioner og mindst to cirkulære mikrofonbaner i både sende- og modtagerum, samt to højttalerpositioner og to mikrofonbaner ved efterklangstidsmålinger til korrektion for modtagerummenes akustiske tilstand. Mikrofonen monteres for enden af en roterende bom monteret på et stativ. Højden af den beskrevne cirkels centrum og banekurvens hældning og hældningsretning er justerbar. Ved måling af trinlydniveau benyttedes mindst tre positioner af bankemaskine og i større rum op til syv positioner.

Ved normal efterklangstidsmåling blev der i 1967 anvendt tre mikrofonpositioner og én højttalerposition. I 1989 benyttedes mindst tre højttalerpositioner og for hver højttalerposition fem mikrofonpositioner og i hvert punkt måles to efterklangsforløb. I større rum anvendes fem højttalerpositioner og ti mikrofonpositioner. De ret omfattende og tidskrævende procedurer er begrundet dels i resultaterne af sammålinger mellem autoriserede laboratorier, dels i resultaterne af tidligere undersøgelser. De nye undersøgelser har bl.a. haft til formål at belyse muligheden for at simplificere de benyttede måleprocedurer uden at sætte den opnåede grad af præcision over styr.

Konklusion

Lydkilder bør generelt ikke placeres tæt inde i rumhjørner ved måling af bygningsdeles reduktionstal.

Måling af reduktionstal kan udføres med samme præcision med et kuffertformet kabinet som med et dodekaederformet kabinet.

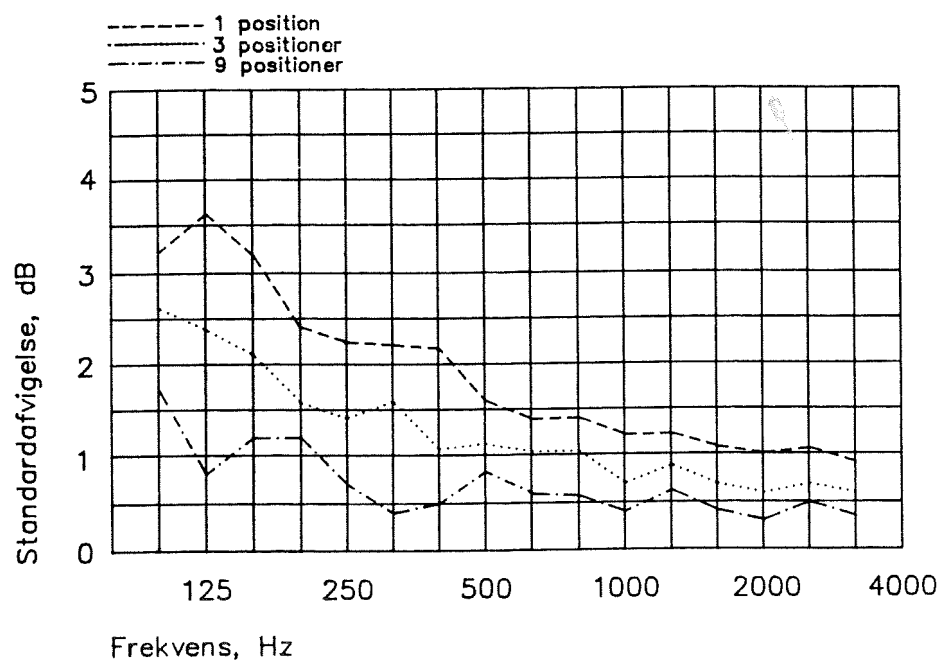
Ved målinger, hvor det ikke drejer sig om at bestemme specifikke forhold i ét lydfelt, men om at bestemme et estimat for en størrelse, der skal være middel af forhold i vilkårlige lydfelter, bør der benyttes samme antal positioner for lydkilde (bankemaskine, højttaler) som for lydmodtager (mikrofon).

----- Tidligere undersøgelser -----

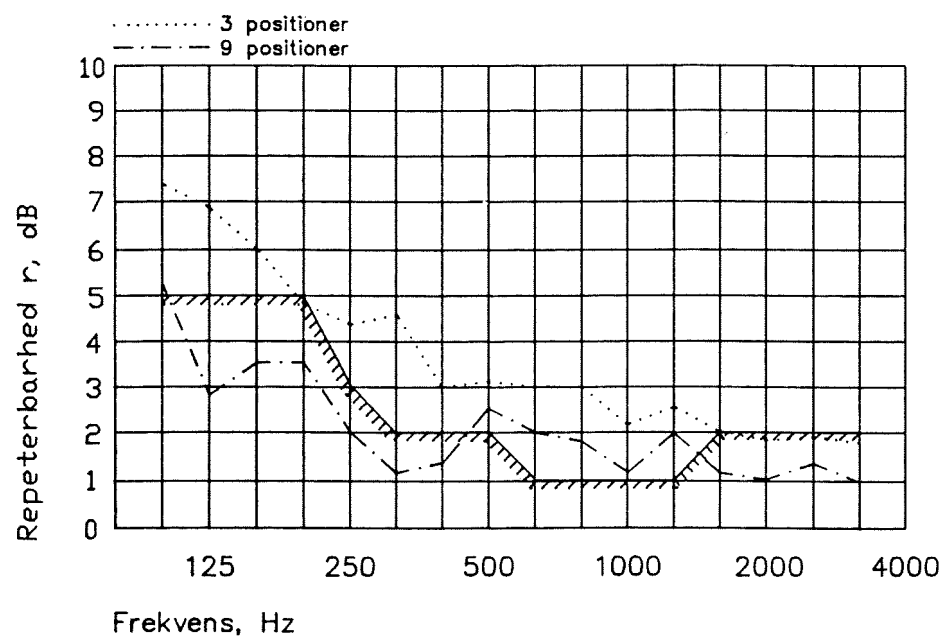
Der er foretaget mange undersøgelser af repeterbarhed og reproducerbarhed under laboratoriebetingselser med henblik på at opnå ensartede resultater for samme type af måling i laboratorier. Derimod er der i litteraturen kun omtalt få undersøgelser af feltmålingers reproducerbarhed. Undersøgelser af nogle højttalerkabineters retningskarakteristik er foretaget af (Dämmig og Fischer, 1978), men det er ikke påvist, at brug af en lyd giver med for eksempel en kuglekarakteristik er en nødvendig og tilstrækkelig betingelse for at opnå en god lydfordeling og ensartede måleresultater.

Undersøgelse af måleusikkerhed

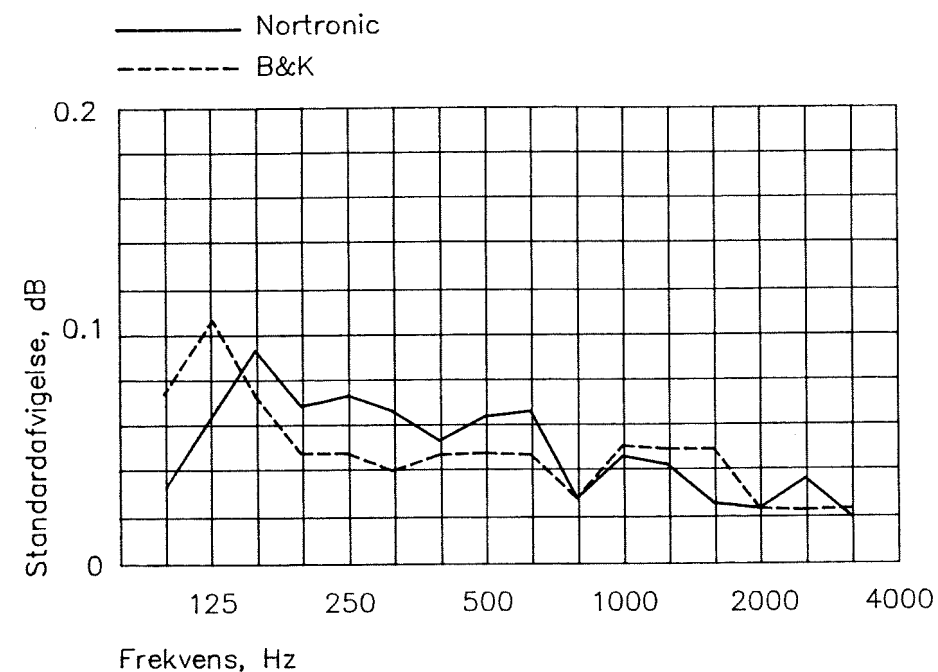
I 1977 udførte BAM en undersøgelse af lydisoleringen mellem to rum med henblik på bestemmelse af måleusikkerhed (Kjær, 1977). Repeterbarheden og standardafvigelse som funktion af frekvensen ved måling af reduktionstal er vist i figur 1 og 2. Undersøgelserne er udført med udstyr fra Brüel og Kjær og Nortronic. Målingerne er udført mellem to rum, der hver har et volumen på 43 m^3 og et gulvareal på $16,5 \text{ m}^2$. Efterklangstiden i rummene er ca. 1,0 sekund i frekvensområdet 100-3150 Hz. Væggen mellem rummene består af 160 mm lecabeton udført af etagehøje elementer og med dimensionen 2,6 m x 4,0 m. Rummene er ikke velegnede til præcisionsmålinger, men de har den fordel, at de volumenmæssigt har stor lighed med forhold i praksis. Et resultat fra undersøgelsen viser, at væggenes reduktionstal R'_w målt af syv personer med samme udstyr, alle erfarne med hensyn til udførelse af disse målinger, var 41 dB i middel og med en spredning på $\pm 2 \text{ dB}$. Et andet resultat fra undersøgelsen var, at brug af to højttalerkabinetter med korrelerede signaler, dvs. begge forsynet med signal fra samme forstærker, i middel gav samme resultat som ved brug af ét højttalerkabinet, men standardafvigelsen var noget større. I figur 3 er vist standardafvigelsen for efterklangstiden som funktion af frekvensen målt i samme position med to forskellige målekæder. Målingerne er udført af samme person.



Figur 1. Standardafvigelser af reduktionstal baseret på henholdsvis 1, 3 og 9 mikrofonpositioner.



Figur 2. Repeterbarhed for reduktionsmålinger, når R' er bestemt af henholds- vis 3 og 9 mikrofonpositioner, sammenlignet med vejledende grænser for repe- terbarhed for laboratoriemålinger (DS/ISO 140 del 2, 1979).



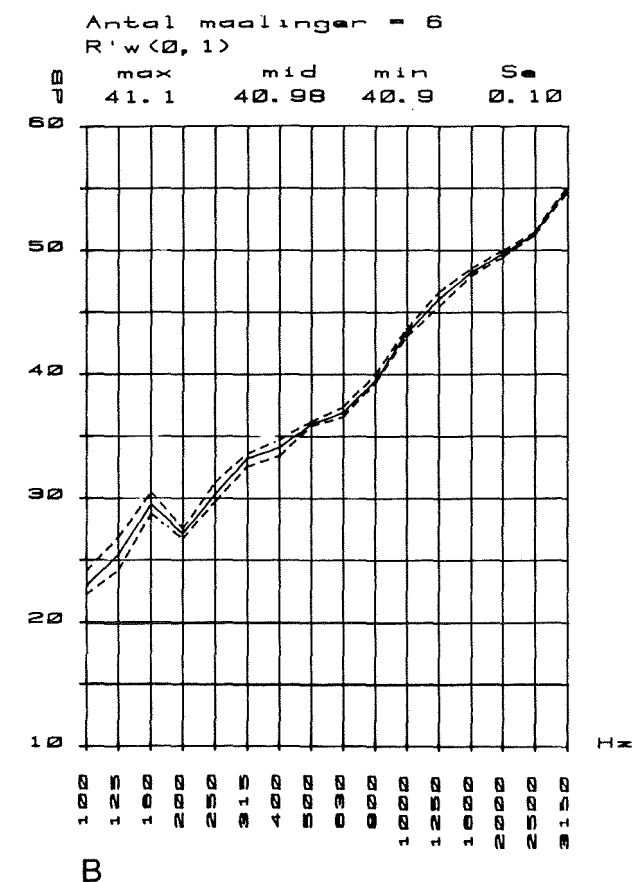
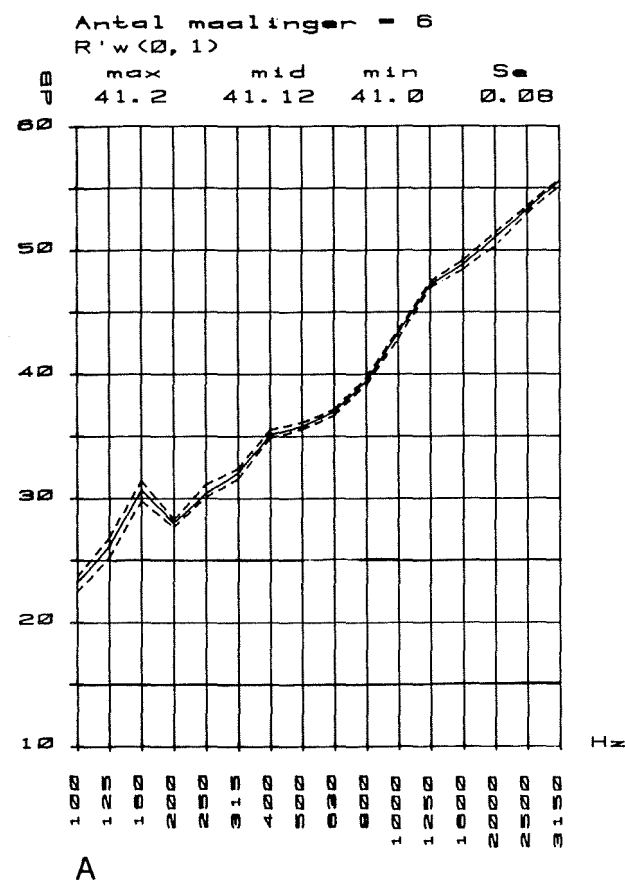
Figur 3. Standardafvigelsen af efterklangstider målt 27 gange i samme posi- tion i modtagerum.

Undersøgelse af en vægs lydisolations målt med forskellige højttalerkabinetter

En undersøgelse (Kristensen og Petersen, 1983) foretaget i de omtalte rum med forskellige udformninger af det benyttede højttalerkabinet viste, at BAM's standardkabinet, der på måletidspunktet bestod af en kuffertlignende kasse med to højttalerenheder, gav afvigende resultater, når hældningen i forhold til lodlinien var henholdsvis 0° , 30° og 45° , mens dette var mindre udtalt med et bokskabinet. Da man af hensyn til håndterbarheden af højttalerkabinet- tet ved feltmålinger ønskede at reducere både kabinettets størrelse og vægt, blev undersøgelsen udvidet til også at omfatte en 1/2 kuffert, dvs. den ene halvdel af kabinettet, hvilket i realiteten var en baffel med en kant. Denne lyd giver med én højttaler og dermed den halve vægt virkede nøjagtigt som kuf- ferthøjttaleren med to højttalere. Det viste sig, at der med en kegleformet diffusor foran hver højttaler kunne opnås ensartede resultater, også når ka- binettets hældning i forhold til lodlinien var 0° , 30° og 45° . Det viste sig desuden at måleretningen var uden betydning for resultatet, når der blev an- vendt en måleprocedure med successiv anvendelse af to højttalerpositioner og to mikrofonbaner i både sende- og modtagerum.

Re- peterbarheden, dvs. overensstemmelsen mellem resultater af gentagne må- llinger udført under identiske betingelser med korte tidsintervaller af samme

person og med samme udstyr og måleprocedure, er stort set tilfredsstillende, når måleproceduren kun foreskriver brug af én højttalerplacering og samtidig angiver placeringen. Figur 4 A, B og C viser resultater af målinger med ét højttalerkabinet placeret i tre forskellige positioner. Da BAM's måleprocedure ikke foreskriver en fikseret højttalerposition, kan enhver af de anvendte positioner for højttalerkabinettet benyttes og reproducerbarheden er derfor ikke tilfredsstillende.



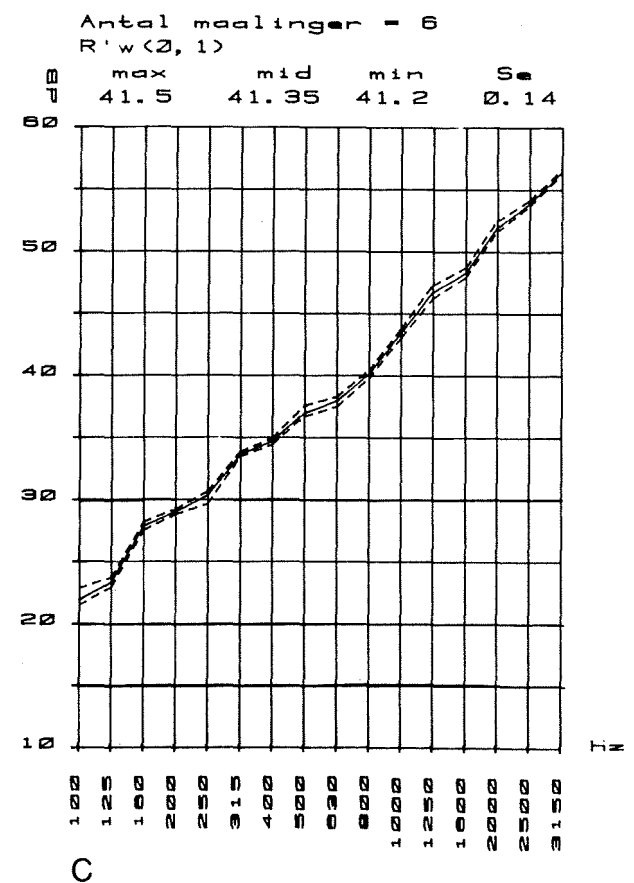
Figur 4. Middelreduktionstal med tilhørende variationsbredde som funktion affrekvensen målt med kuffertkabinet placeret i rumhjørner modsat den adskillende væg og ved midte af sidevæg. Der er udført seks gentagne målinger i hver kabinetposition, og kabinet samt mikrofon er udtaget af rummene mellem hver måling og genindsat på nogenlunde samme plads.

Over diagrammerne er anført de vægtede reduktionstal med én decimal og middelværdier med to decimaler, henholdsvis den maksimale værdi, middelværdien, den minimale værdi og standardafvigelsen for en enkelt måling.

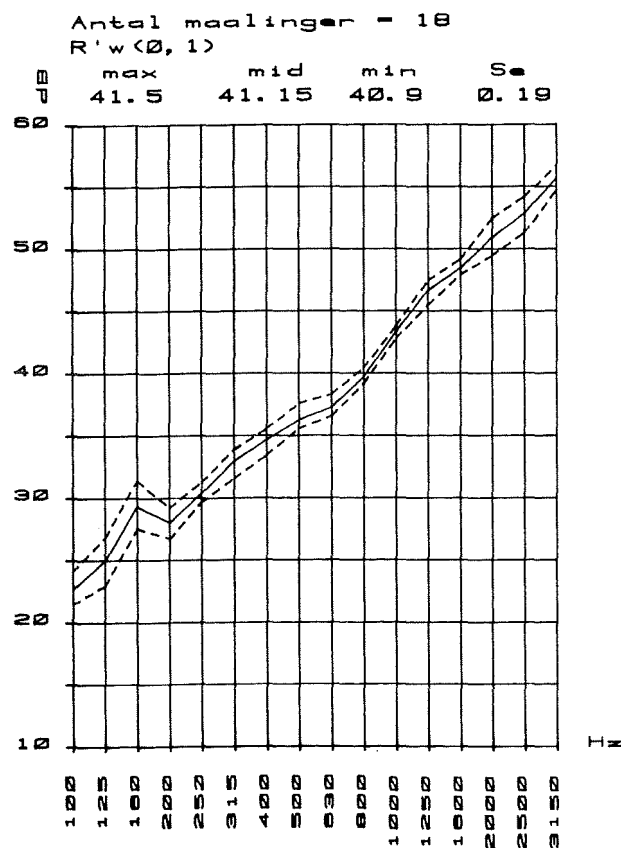
A: Rumhjørne, kabinettets hældning i forhold til lodlinie 30°

B: Rumhjørne, opret kabinet.

C: Sidevæg, opret kabinet.

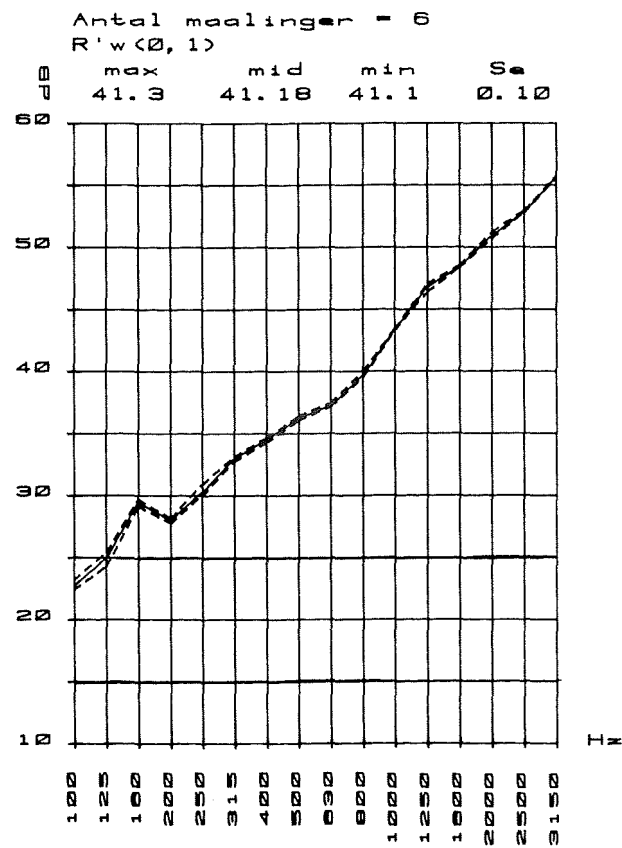


I figur 5 ses resultatet af samtlige atten målinger vist i figur 4 A til C. Det bemærkes, at resultaternes spredningsområde er øget betydeligt. En mere omfattende måleprocedure med flere målepositioner er derfor nødvendig for at opnå et tilfredsstillende måleresultat.

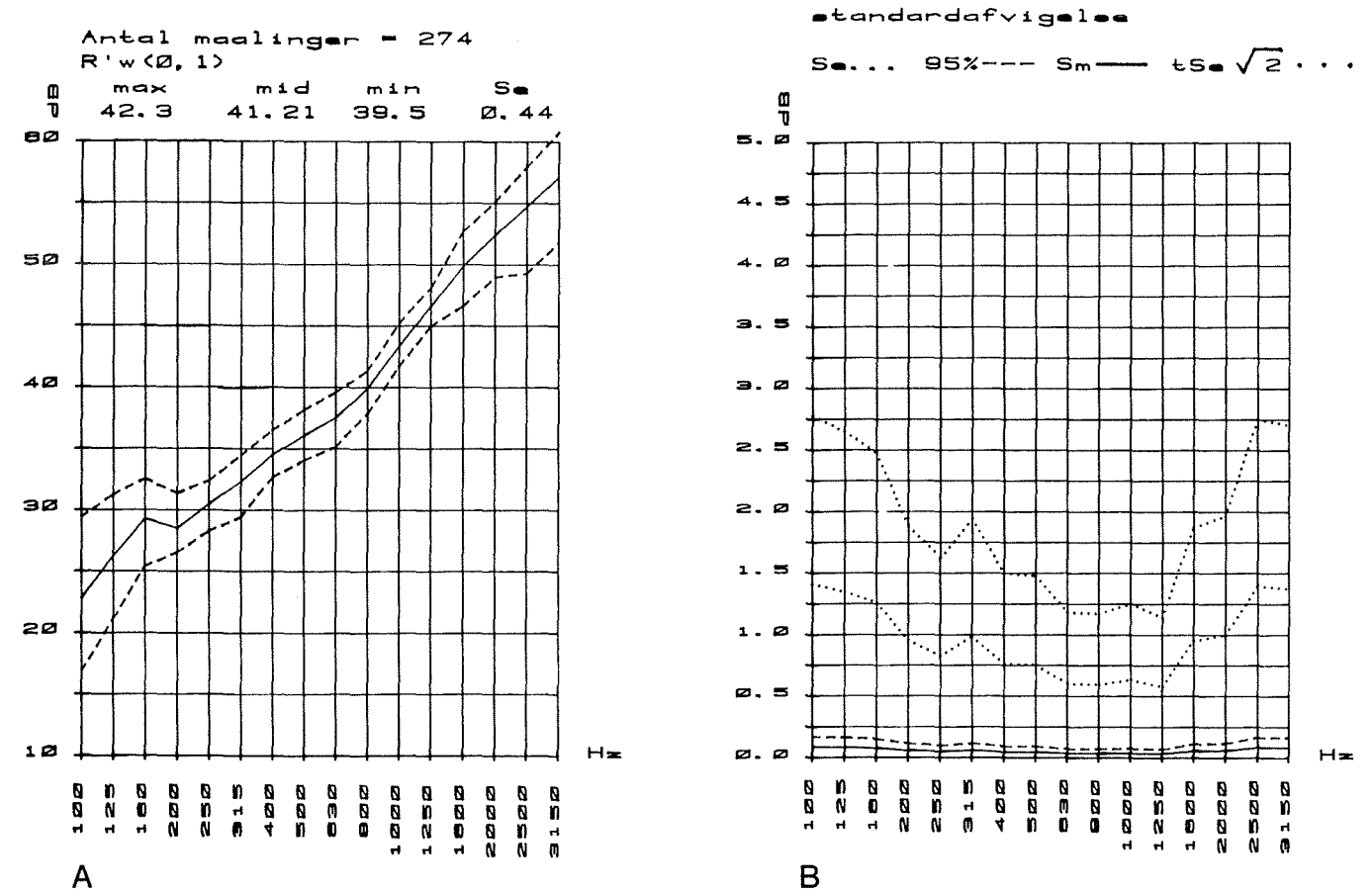


Figur 5. Middelreduktionstal med tilhørende variationsbredde beregnet af de atten målinger omtalt i figur 4.

I figur 6 ses resultatet af repeterbarheden for en måleprocedure med tre positioner af højttalerkabinetet. Det vil sige, at måling 1 i måleserierne fra henholdsvis 4 A, 4 B og 4 C er betragtet som én måling og tilsvarende med de øvrige fem. Derved fås repeterbarheden for seks målinger med en væsentlig udvidet måleprocedure, idet hver måling har tre højttalerpositioner. Denne måleprocedure giver reduktionstallet en tilfredsstillende reproducerbarhed. I figur 7 ses resultatet for samtlige 274 målinger af reduktionstal og i figur 8 af efterklangstid.

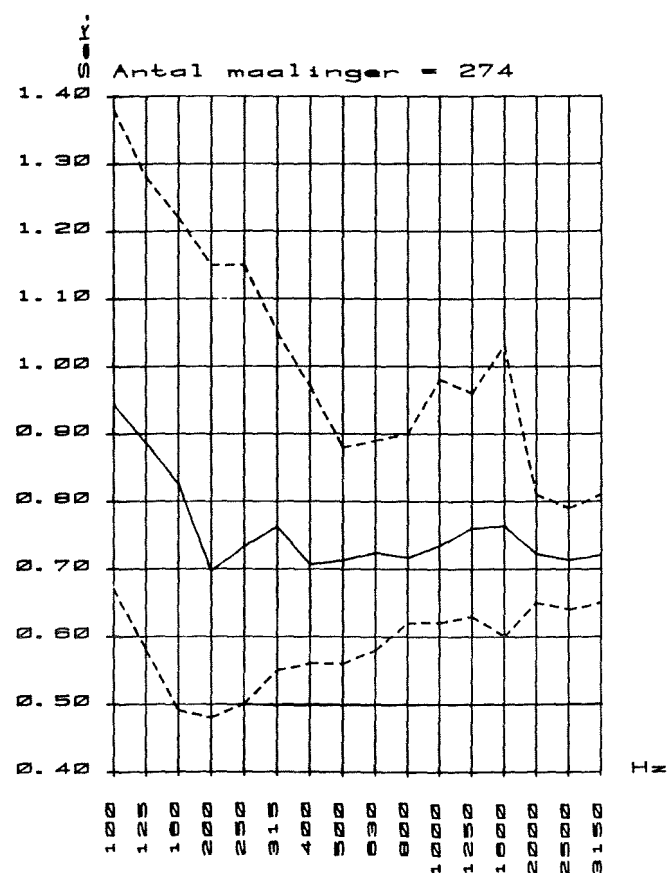


Figur 6. Middelreduktionstal med tilhørende variationsbredde beregnet for seks gentagne målinger, hver måleprocedure består af måling i tre højttalerpositioner, dvs. i alt svarende til de atten målinger omtalt i figur 4.



Figur 7. Reduktionstal og standardafvigelse beregnet som funktion af frekvens på basis af 274 enkeltmålinger.
A: Middelreduktionstal med tilhørende variationsbredde for måleresultaterne.
B: Standardafvigelsen s for en enkelt måling af reduktionstallet og standardafvigelsen s_m for reduktionstallets middelværdi, $s_m = \frac{s}{\sqrt{274}}$, samt 95% konfidensintervallet for sidstnævnte. Desuden er anført reproducerbarheden R for målingerne, beregnet af $R \approx ts$, hvor $t \approx 1,96$.

En sammenligning mellem resultater fra målinger med forskellige lydgivere placeret nær et hjørne er vist i tabel 1, hvoraf det fremgår, at de lydgivere, bokskabinet, trekantbaffel og mekanisk støjgenerator, der kan placeres helt inde i hjørnet, giver lidt lavere reduktionstal end de øvrige, hvilket skyldes



Figur 8. Middelefterklangstiden med tilhørende variationsbredde som funktion af frekvensen beregnet for alle 274 målinger.

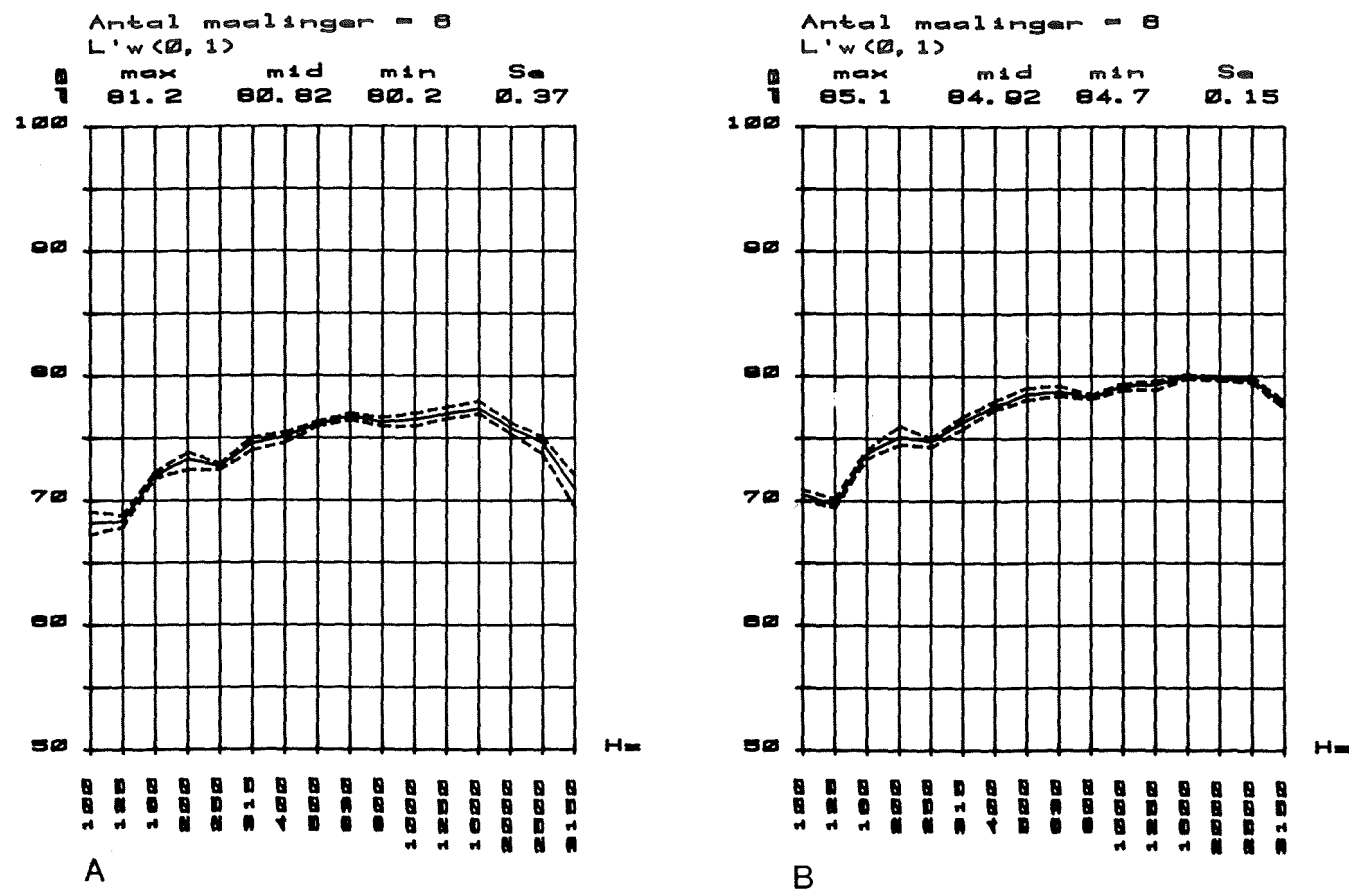
Tabel 1. Vægtet reduktionstal med måling med forskellige lydgivere.

Antal målinger	Gentagne målinger med lydkilde i rumhjørne	R'_w mid dB
6	Kassekabinet med diffusor, hældning 30°	40.8
6	Trekantbaffel med diffusor	40.9
6	Mekanisk generator B&K	40.8
6	Kuffertkabinet (2 højttalere) med diffusor, hældning 30°	41.3
6	Kuffertkabinet (1 højttaler) med diffusor, hældning 30°	41.1
6	Nyt kuffertkabinet (1 højttaler) med diffusor, hældning 30°	41.4
6	Kassekabinet 1 m fra hjørne med diffusor, hældning 30°	41.1
3	Kassekabinet vendt mod rumhjørne uden diffusor, hældning 30°	41.6

Tabel 2. Vægtet reduktionstal ved måling med lydgivere uden og med diffusorer.

Kabinettype og -placering	Antal målinger uden diffusor	R'_w mid dB	Antal målinger med diffusor	R'_w mid dB
2 kuffertkabinetter	13	41.3		
Kuffertkabinet i rumhjørne	48	41.1	47	41.5
Kassekabinet i rumhjørne	24	40.8	20	40.8
kuffertkabinet i rumhjørne	8	41.2	22	41.6
Kuffertkabinet ved sidevæg	18	41.5	17	41.3
Trekantbaffel i rumhjørne	6	40.7	6	40.9
Samtlige målinger	117	41.1	112	41.3

flanketransmission via den nærliggende flankerende væg. En undersøgelse heraf har vist, at indvirkningen under de givne målebetingelser har maksimum ved 160 Hz og aftager mod højere frekvenser. Den maksimale indvirkning på det vægtede reduktionstal er omkring 1,0 dB. Det vægtede reduktionstal R'_w for væggen bestemmes hovedsagelig af frekvensområdet 200-1600 Hz.



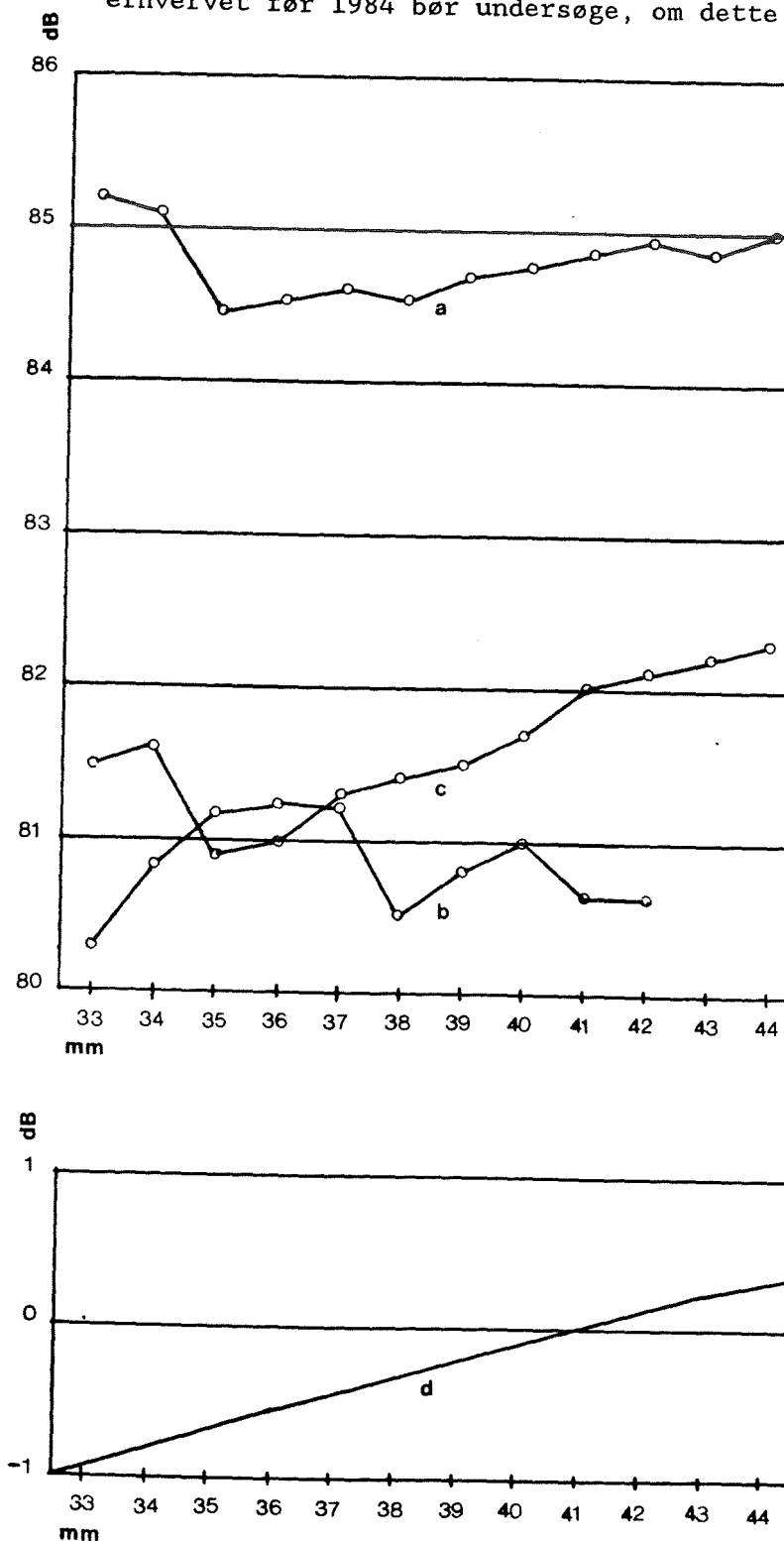
Figur 9. Middeltrinlydniveauet med tilhørende variationsbredde som funktion af frekvensen målt med seks gentagne målinger med en måleprocedure, hvor der benyttes tre bankemaskinepositioner for hver måling. Bankemaskine og mikrofon er udtaget af rummene mellem hver måling og genindsat på nogenlunde samme plads.

A: Dækket belagt med linoleum.
B: Dækket uden belægning.

I tabel 2 ses resultaterne af målinger med og uden diffusorer. Virkningen af diffusorerne er ikke særlig stor og synes især at fremkomme ved positioner i rumhjørner og hovedsagelig ved montering på kuffertkabinetterne.

Faldhøjdens betydning for bankemaskinens støjafgivelse

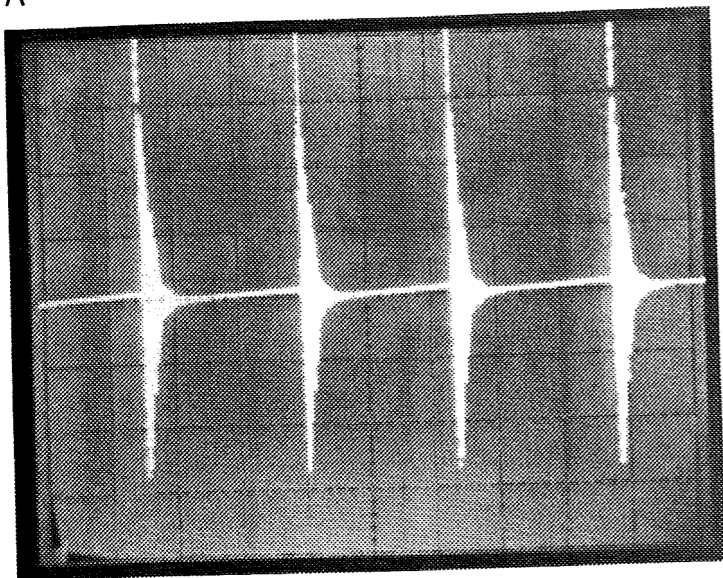
Undersøgelsen omfattede også trinlydniveauet, hvor bankemaskinen blev placeret på dækket over de tidligere omtalte rum. Dækket består af 160 mm lecabeton, hvor en del af dækket er belagt med linoleum. I figur 9 A og B ses resultater være mindst 44 mm frit fald til rådighed. Indehavere af maskiner, der er erhvervet før 1984 bør undersøge, om dette gælder for deres bankemaskiner.



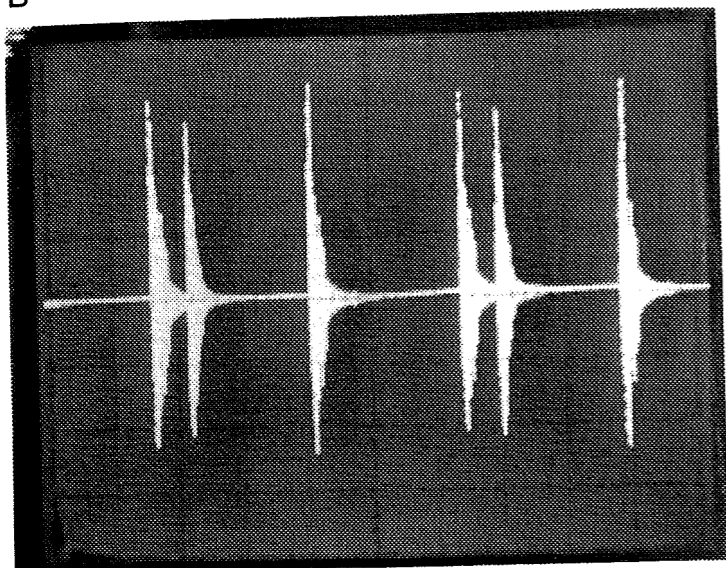
Figur 10. Vægtet trinlydniveau $L'_{n,w}$ som funktion af faldhøjden. Resultater angives ved middelværdien af tre målinger for hver faldhøjde, og resultatet angives med en decimal.
a: Dæk uden belægning.
b: Dæk med linoleumsbelægning.
c: Måling i én position på et udvalgt jævnt areal med linoleumsbelægning, målt efter 15 minutters aktivering med bankemaskinen.
d: Forventet forløb af trinlydniveau baseret på forholdet mellem tilført energi ved den aktuelle faldhøjde og faldhøjden 41 mm.

Hvis ikke der er mulighed for et fald på 44 mm, bør der søges hjælp hos fabrikant eller forhandler. Det er også vigtigt, at faldhøjden er korrekt indstillet, og at styret er rent og uden fedt eller ruheder, der kan reducere faldhastigheden. Gummilaget på hammerens fangkrave bør pudres med talkum for at reducere hamrens mulighed for vedhæftning til gummiet, hvilket kan ændre tidspunktet for starten af det frie fald. I figur 10 er vist, hvorledes trinlydniveauet $L'_{n,w}$ aftager med aftagende faldhøjde. Den større energioverførsel ved lave faldhøjder virker som et paradoks, men de skyldes, at der forekommer dobbeltslag. Dette er vist i figur 11, hvor lydimpulser fra bankemaskinens hamres fald på en 50 mm tyk, afrettet stålplade er målt med et accelerometer og registreret på et oscilloskop.

A

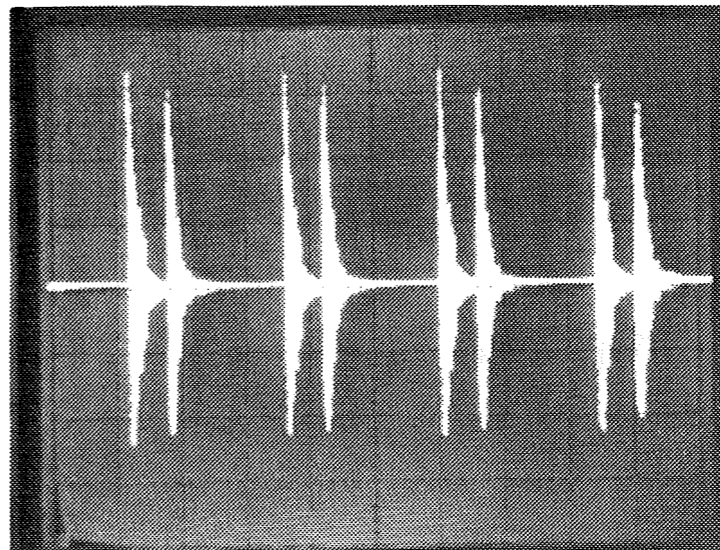


B

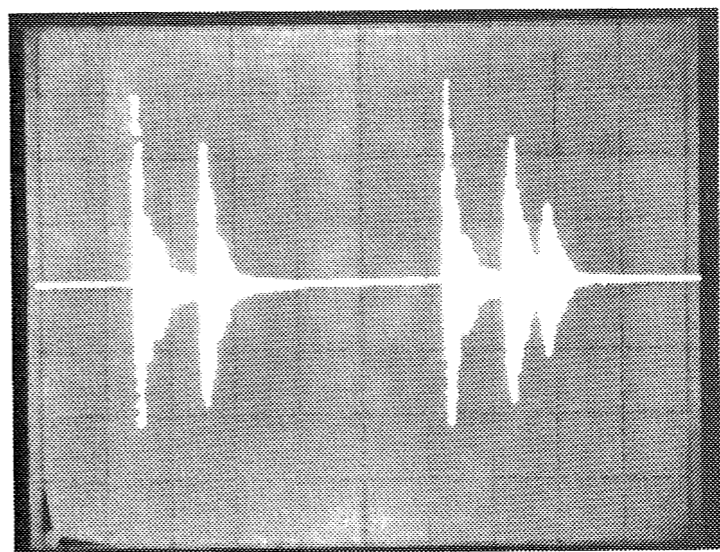


Figur 11. Bankemaskine på 50 mm tyk stålplade. Periode mellem de enkelte hamres fald: 500 ms.
Tidsakse: 1 dekade 200 ms.
A: Normalt slag. Faldhøjde 41 mm.
B: Overgangsperiode mellem enkelt og dobbeltslag. Faldhøjde 34 mm.
(fortsættes)

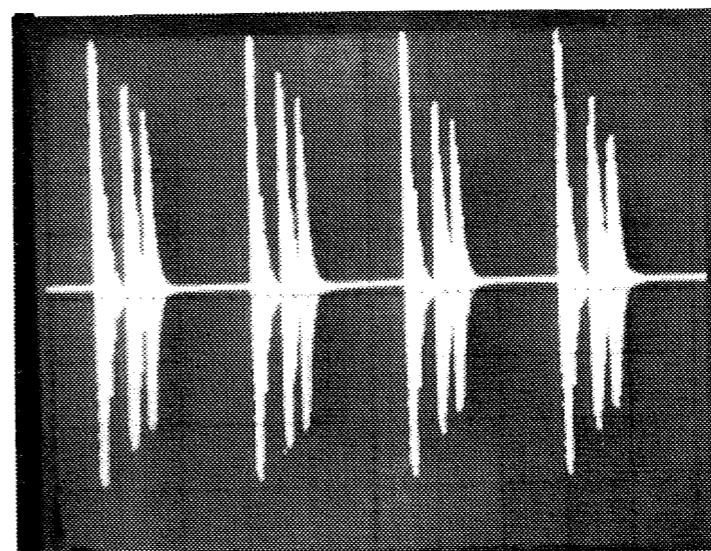
C



D



E

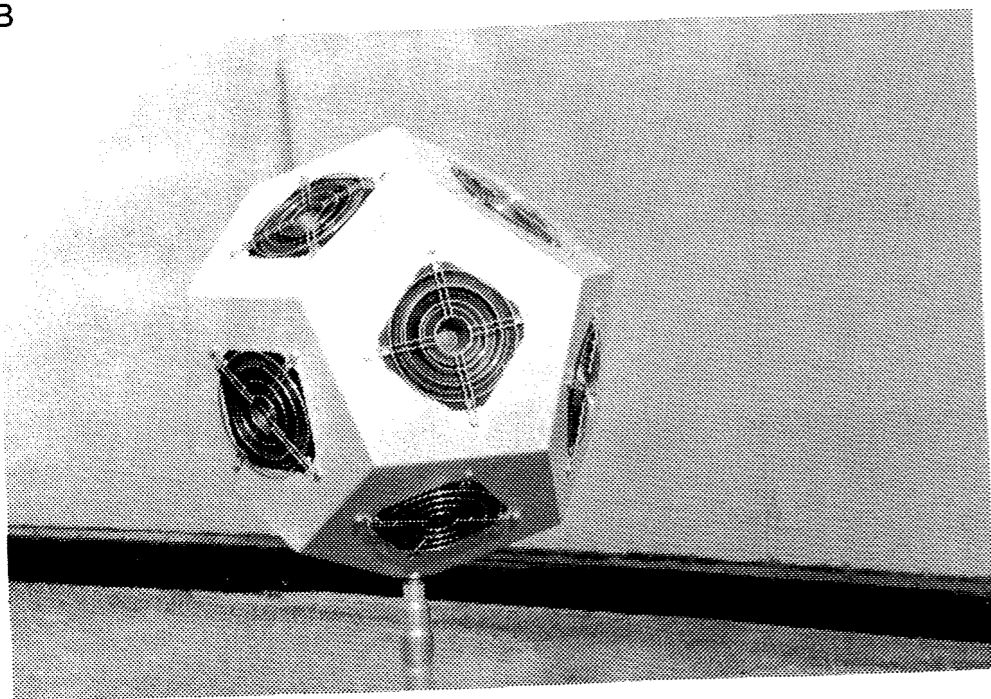


Figur 11 (fortsat). Bankemaskine på 50 mm tyk stålplade. Periode mellem de enkelte hamres fald: 500 ms.
Tidsakse: C og E 1 dekade 200 ms, D 1 dekade 100 ms.
C: Dobbeltslag. Faldhøjde 33 mm.
D: Overgangsperiode mellem dobbeltslag og tre slag. Faldhøjde 28 mm.
E: Tre slag. Faldhøjde 27 mm.

A



B



Figur 12. Højttalerkabinetter.
 A: Kuffertformet kabinet med påsat kegleformet diffusor.
 B: Dodekaederformet kabinet.

 Undersøgelse af højttalere og måleprocedurer

Jysk Teknologisk foretager i øjeblikket sammen med nogle tyske laboratorier en undersøgelse af højttalerplaceringens betydning for måleresultatet. Resultatet af denne kan meget vel blive et krav om (via EN-standarder), at der i fremtiden skal benyttes dodekaeder-formede kabinetter ved alle autoriserede målinger. BAM har derfor udført en undersøgelse af en vægs reduktionstal målt med henholdsvis et kuffertformet og et dodekaederformet kabinet, se figur 12 A og B.

Måling af reduktionstal for samme væg med to forskellige højttalertyper

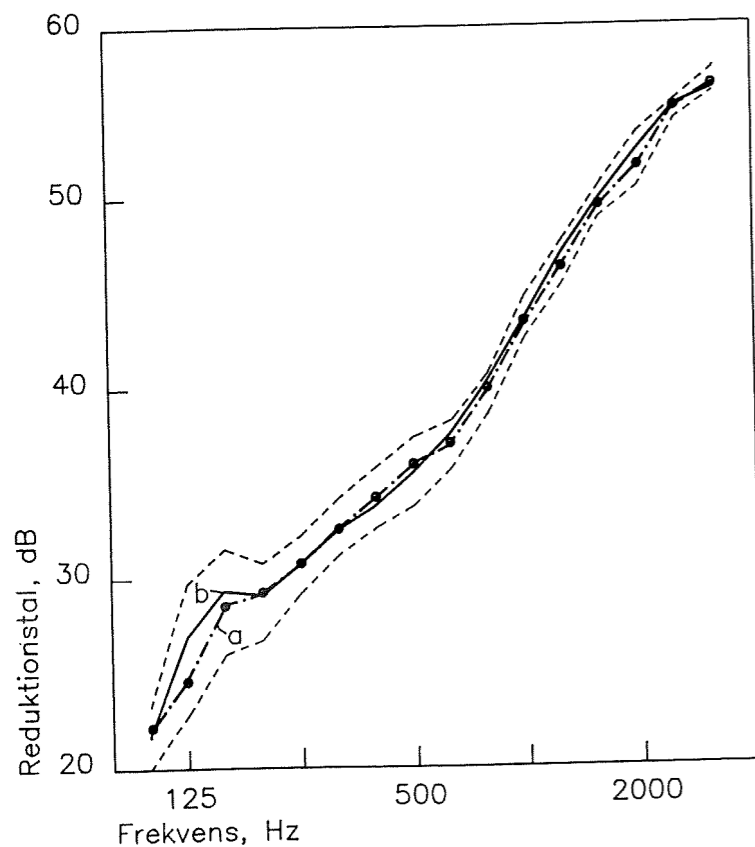
Der er udført målinger af reduktionstal for samme væg med to typer af højttalerkabinetter henholdsvis laboratoriets standardhøjttaler, en oplukkelig kasse med én højttalerenhed og en dodekaederformet kasse med tolv højttalerenheder.

Der er benyttet fire positioner for hver højttalertype, men ikke de samme positioner for de to typer, idet standardhøjttaleren er beregnet til at stå på gulvet, mens dodekaederen bør placeres et stykke over gulv.

Der er benyttet to positioner for stativet med den roterende mikrofonbom. Dvs. at der er målt lydtrykniveau i to cirkelbaner i såvel senderum som modtagerum.

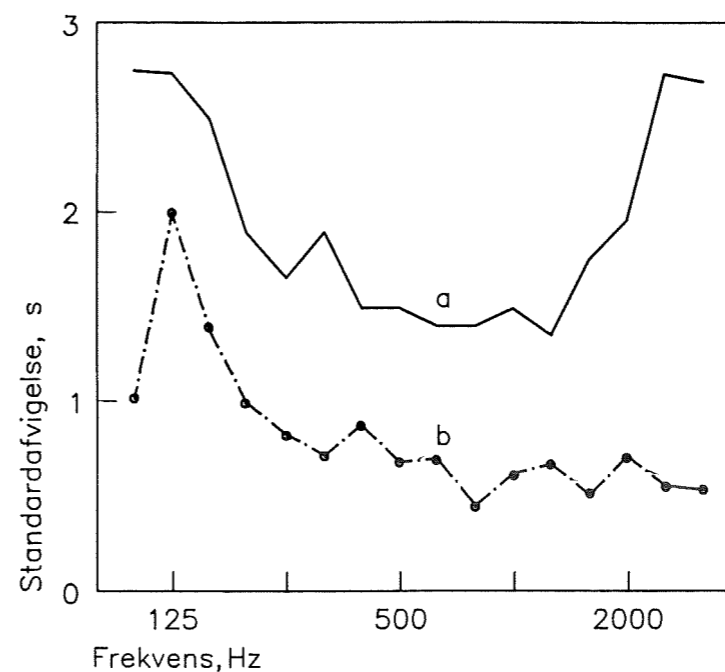
Der er således udført ialt seksten enkeltmålinger med hver af de to højttalertyper. Ved en enkeltmåling forstås én højttalerposition og én position af mikrofonbane i henholdsvis sende- og modtagerum samt en efterklangstidsmåling. Ved variation mellem mikrofonbanerne kan der opnås fire forskellige målinger med hver højttalerposition.

Resultaterne af målingerne som funktion af frekvensen, figur 13, viser, at der ikke er stor forskel på middelværdierne af de to sæt af målinger. En nærmere analyse viser, at kun middelværdierne ved 125 Hz ikke kan anses for at være ens.



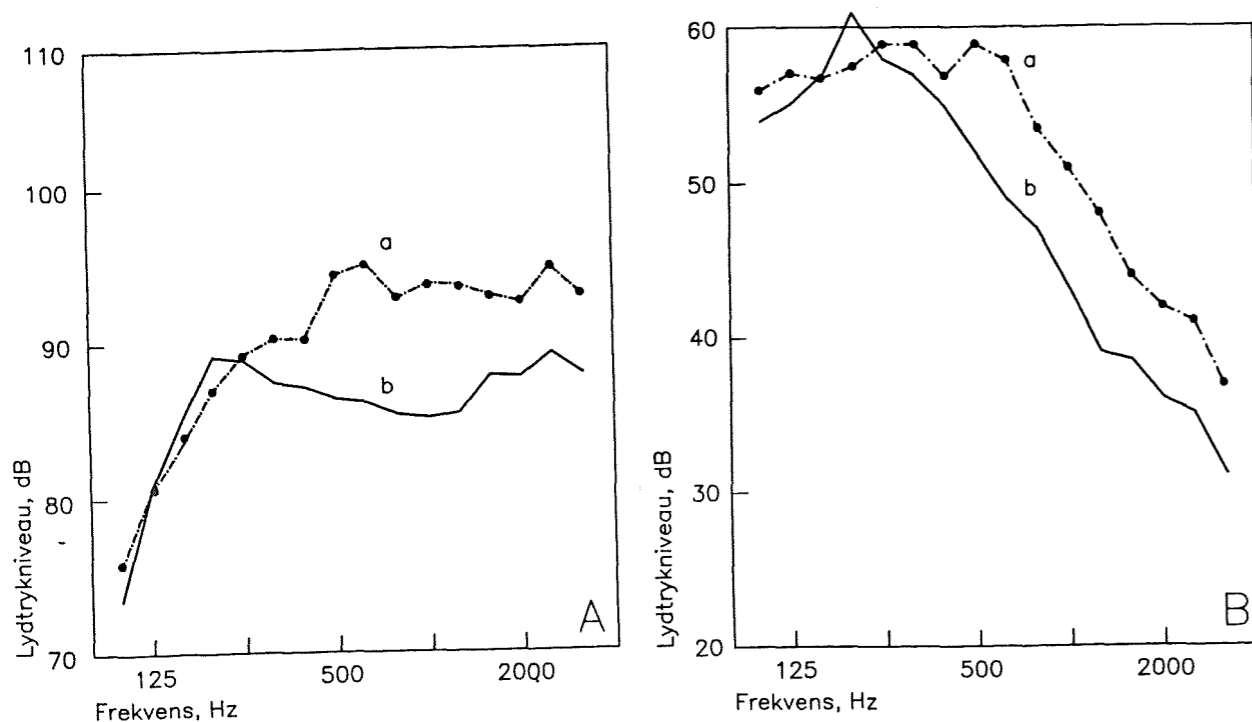
Figur 13. Middelreduktionstal målt med henholdsvis kabinet a og b og den til målingerne hørende samlede variationsbredde for begge måleserier. Der er udført 16 målinger som funktion af frekvensen med hvert af de to kabinetter.
a: Kuffertkabinet.
b: Dodekaederkabinet.

Sammenlignes resultatet af den tidligere undersøgelse af lydisolationen, omfattende 274 enkeltmålinger udført med forskellige procedurer og varianter af standardhøjtaleren samt enkelte bokshøjtalere, se figur 7, med resultatet af den nye undersøgelse, finder man kun ubetydelige afvigelser mellem middelreduktionstallene. For standardafvigelserne, figur 14, er der betydelige forskelle ved høje frekvenser. Sammenligning mellem resultaterne af den vægtede lydisolations viser, at resultaterne er ens. Når dette kan være tilfældet, skyldes det, at den vægtede værdi i det foreliggende tilfælde overvejende bestemmes af lydisolationen i frekvensområdet 200 til 1600 Hz.



Figur 14. Standardafvigelsen som funktion af frekvensen for 274 målinger med forskellige lydgivere og opstillinger, se henholdsvis figur 12 samt tabellerne 1 og 2.
a: Standardafvigelsen for måleresultaterne vist i figur 7.
b: Standardafvigelsen for måleresultaterne vist i figur 13.

Sammenlignes middelværdierne af lydtrykniveauerne i senderum og modtagerum for de to højtalertyper figur 15 A og B ses, at der er nogen forskel på frekvensforløbene. BAM's standardhøjtaler kan ikke anvendes ved væsentlig højere frekvenser end 3150 Hz. I praksis er dette uden betydning, fordi lydisolationen i frekvensområdet 100-3150 i tilstrækkelig grad beskriver lydisolationen ved høje frekvenser, mens den i reglen ikke gør det ved lave frekvenser. Den dodekaederformede lyd giver ved højere frekvenser en bedre fordelt lydudstråling end standardhøjtaleren, hvilket dog ikke kan aflæses af resultaterne i figur 15.



Figur 15. Lydtrykniveauet som funktion af frekvensen målt i senderum A og modtagerum B.

a: Kuffertkabinet.
b: Dodekaederkabinet.

Konklusion af undersøgelsen

Der er ikke forskel mellem resultaterne af lydisolationen målt med de to højttalertyper.

Stort set ligger den vægtede lydisolations for alle de ca. 300 målinger inden for middelværdien ± 1 dB. Sammenlignes resultaterne for de enkelte højttalertyper, der er benyttet i de to undersøgelser, viser det sig, at resultaterne for højttalertyper placeret helt inde i et hjørne, dvs. højttaler i trekantbaffel og højttaler i lukket kabinet, generelt giver lidt lavere værdier for den vægtede lydisolations end højttalertyperne dodekaederkabinet og kuffertkabinet, der ikke kan placeres helt inde i et hjørne.

Det hævdes ofte, at vægges lydisolations aftager med tiden, men denne påstand er næppe sandsynlig, med mindre der forekommer revner i bygningsdelene eller i deres indbyrdes samlinger. Mellem den første og anden undersøgelse af vægges lydisolations, er der gået seks år, og der er hverken konstateret revner i bygningsdele eller ændring i vægges lydisolations.

Resultaterne giver ikke anledning til at ændre måleproceduren, der foreskriver mindst to positioner for højttalerkabinet og én position for mikrofonbane i både sende- og modtagerum for hver højttalerposition. Målingerne skal i princippet udføres som to målinger af reduktionstallet, hver med én højttalerposition og resultatet er middelværdien af de to målinger.

Måling af efterklangstid

Fremgangsmåden ved måling af efterklangstid har i høj grad været præget af måleinstrumentudviklingen. Det førte til, at man anvendte flere mikrofonpositioner end lyd giverpositioner. I de ældre ISO-rekommandationer blev normalt anført, at minimum var tre mikrofonpositioner, men intet om antallet af højttalerpositioner. Efterklangsprocessen blev frembragt ved, at der via en højttaler blev udsendt et støjsignal, som blev afbrudt. Måling af efterklangstiden foregik i mange år ved at lydtrykniveauet i efterklangsprocessen blev målt med en mikrofon, og det målte signal via en forstærker registreret med en niveauskriver. Signalet i efterklangsprocessen blev nedskrevet på en papirrulle, der med konstant hastighed passerede en skrivestift, som angav lydtrykniveauet. Skrivestiften frembragte på grund af det aftagende lydtrykniveau og det fremløbende papir en hældende kurve, hvoraf efterklangstiden kunne aflæses med en skabelon. Arbejdet med aflæsning af skriverstrimler med lydtrykniveauets forløb som funktion af tiden var stort, så det er forståeligt, at det var nødvendigt med en vis begrænsning af arbejdsomfanget.

Udvikling inden for akustisk måleudstyr har imidlertid medført, at det nu er muligt at måle efterklangstiden samtidig i en række filtre, der tilsammen dækker et frekvensbånd med en ønsket bredde. Ligesom det er muligt at få måleudstyr, der successivt beregner efterklangstiden. Det sidste har rejst en række spørgsmål med hensyn til efterklangstidens definition.

Efterklangstiden kan aflæses af det enkelte efterklangsforløb eller beregnes ved en regressionsanalyse af sammenhørende værdier af tid og lydtrykniveau i efterklangsprocessen. Middelværdien af flere gentagne bestemmelser af efterklangstiden beregnes af resultaterne for de enkelte efterklangsforløb.

Efterklangstiden kan imidlertid også beregnes ved successiv addition af efterklangsforløbet i de enkelte efterklangsprocesser. Sidstnævnte metode baseres enten på simpel addition af dB-værdier eller på addition af lydtrykkenes kvadrater og beregning af decibelværdien af summen af kvadraterne. Metoden forudsætter brug af ret avanceret måleudstyr.

Der kan synes rimelig grund til at anvende den sidstnævnte fremgangsmåde i forbindelse med korrektionsværdier til brug ved beregning af lydfelter i rum.

Derimod er der næppe tvivl om, at mange vil fastholde den oprindelige definition ved måling af efterklangstid i rum, hvor der af hensyn til hørefunktionen stilles krav til efterklangstiden.

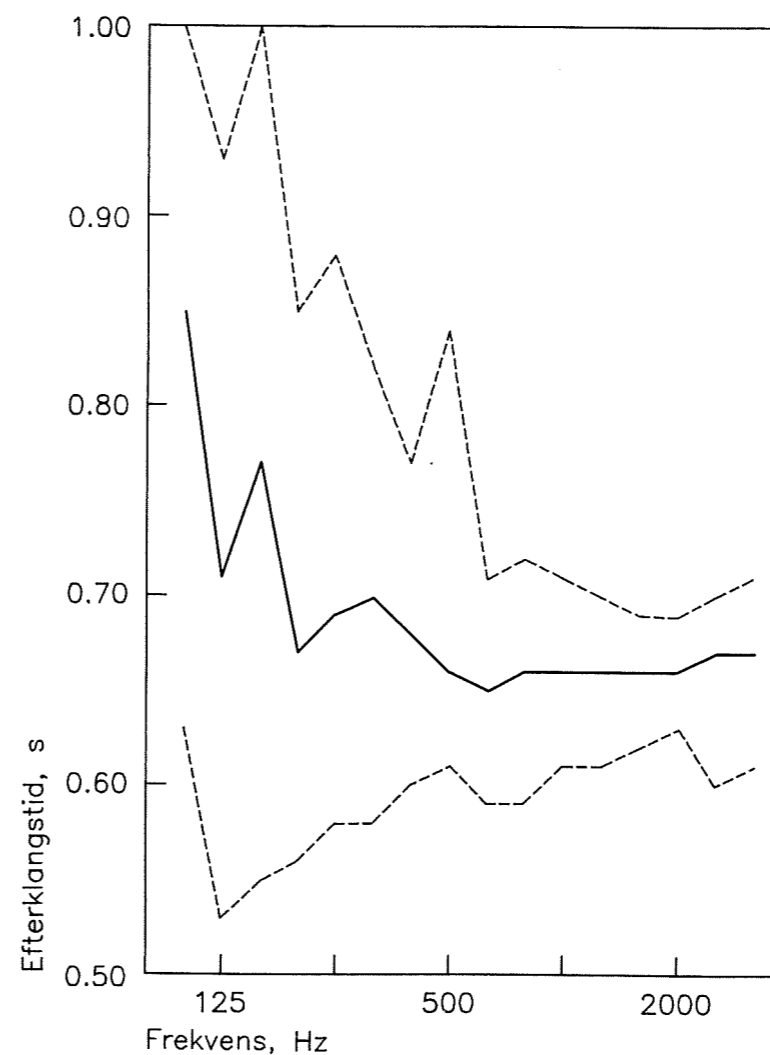
Ved måling af efterklangstid har det i nogle år været god latin at benytte én eventuelt to højttalerpositioner og for hver højttalerposition mindst tre mikrofonpositioner ved høje frekvenser og helst seks ved lave frekvenser. Ved måling af efterklangstiden per 1/3 oktav i frekvensområdet 100-3150 Hz giver dette mindst 2 (højttalerpositioner) x 3 (mikrofonpositioner) x 16 (1/3 oktaver i frekvensområdet 100-3150 Hz) x 2 (antal gentagelser i hver måleposition ved hver målefrekvens) = 192 efterklangsforløb til bestemmelse af efterklangstiden.

Det er ved at blive almindelig målepraksis at anvende såkaldte parallelanalytatorer, dvs. analytatorer, der samtidig aflæser en række kanaler, hvor hver kanal f.eks. kan indeholde et 1/3 oktav bånd. Herved forenkles målearbejdet betydeligt, idet alle de ønskede frekvensbånd, her seksten 1/3 oktav bånd, aflæses samtidig. Det kræver imidlertid, at lydtrykniveauet i støjsignalet enkelte frekvensbånd er nogenlunde ens i de aktuelle 1/3 oktavfiltre, hvilket kan være vanskeligt at opnå. Desuden skal signalstøjforholdet i de enkelte frekvensbånd være rimelig stort, dvs. ikke gerne under 40 dB i noget benyttet filter. Disse betingelser medfører, at signalniveauet skal være højt i et bredt frekvensområde, hvilket stiller betydelige krav til lyd giver-systemet. I de ældre parallelanalytatorer er dynamikområdet, dvs. størrelsen af det maksimalt mulige signalstøjforhold ofte for begrænset og det korteste samplingsinterval for stort, dvs. tiden mellem udlæsninger af to værdier er for lang, hvilket begrænser metodens anvendelse ved måling af korte efterklangstider. Det er imidlertid muligt at måle væsentlig kortere efterklangstider ved brug af en metode, hvor efterklangstiden bestemmes ved måling af den omvendte efterklangsproces. I princippet optages efterklangsprocessen på f.eks. et magnetbånd, og efterklangstiden måles, mens båndet afspilles bagfra (Jacobsen og Rindel, 1987). Herved kan den nedre grænse for målbarheden af efterklangstiden reduceres til cirka en fjerdedel i forhold til den konventionelle målemetode.

Måling af efterklangstid med to kabinettyper

Der er benyttet fire positioner for hver kabinettype, men ikke den samme position for de to kabinettyper, idet den ene, BAM's standardkabinet, normalt står på gulvet, mens det anden, dodekaederkabinettet, er løftet fra gulvet. Ingen af typerne kan anbringes helt inde i hjørnet.

Der er benyttet to baner for mikrofonen, som er således beliggende, at bærernes punkter kan betragtes som ikke korrelerede. For hver mikrofonbane er foretaget to målinger med samme højttalerkabinet, således at der for hver kabinettype er foretaget 4 x 2 x 2 målinger. Resultaterne viste, at der ikke er nogen signifikant forskel på de målte efterklangstider med de to kabinettyper. Efterklangstidens middelværdi er vist i figur 16.



Figur 16. Middelrefterklangstid med tilhørende variationsbredde som funktion af frekvensen målt i et lille rum, volumen 43 m³. Den nedre grænse for variationsbredden ved 100 og 125 Hz svarer nogenlunde til grænsen for målbarheden af efterklangstid med den benyttede metode.

Efterklangstiden er bestemt på grundlag af efterklangsprocessen under de første ca. 20 dB sækning af lydtrykniveauet, dvs. lydtrykniveauet som funktion af tiden bestemt inden for niveauintervallet, der begynder 2 til 3 dB efter afbrydelse af støjkilde og slutter 20 dB lavere.

Konklusion af undersøgelsen

Der er inden for det bygningsakustiske frekvensområde ingen forskel mellem resultaterne af efterklangstidsmålingerne med de to højttalerkabinettyper.

Måling af efterklangstid i større rum

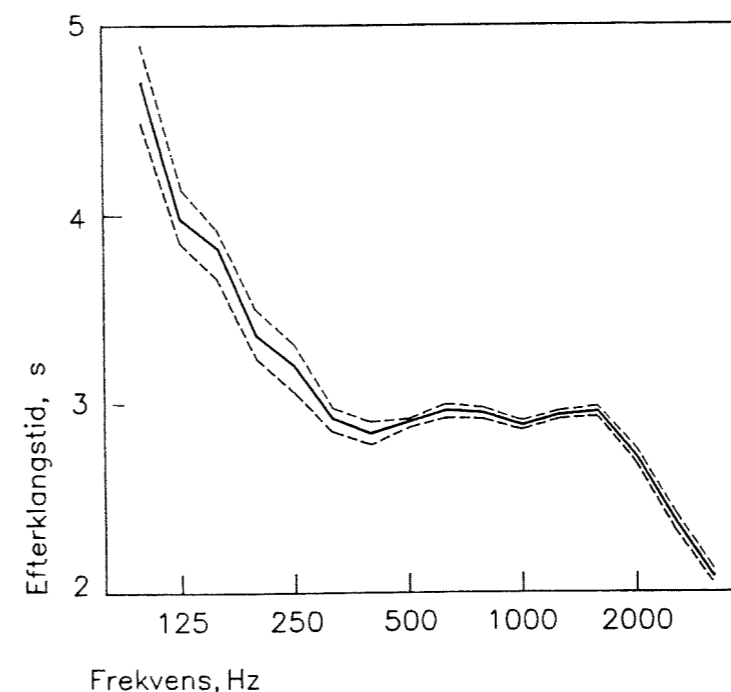
Ved målinger i praksis har det vist sig, at efterklangstiden i større rum ofte er forholdsvis mere afhængig af højttalerplaceringerne end af mikrofonplaceringerne. Det har ført til, at laboratoriet har udarbejdet en procedure for målinger, hvor der i rum større end 1000 m³ benyttes 5 højttalerpositioner, 10 mikrofonpositioner og 2 gentagelser. Det vil sige $5 \times 10 \times 2 = 100$ efterklangsforløb per benyttet kanal. Der benyttes normalt 16 kanaler, hvilket giver 1600 efterklangsforløb for en måling. Selv med et moderne måleudstyr medgår et betydeligt tidsforbrug til udførelse af en måling. Det vil derfor betyde en væsentlig lettelse, hvis proceduren kunne forenkles uden at målepræcisionen samtidig blev væsentlig forringet.

Undersøgelse af procedure for måling af efterklangstid i et større rum

I forbindelse med måling af efterklangstiden i en række større haller blev resultaterne fra en af disse nærmere undersøgt. Hallens dimensioner er 28 x 34 x 7 m svarende til et volumen på ca. 6000 m³, når volumet af et indbygget rum er fratrukket. Med fem højttalerpositioner, ti mikrofonpositioner og to gentagelser kan dette behandles som et statistisk faktorforsøg med 5 rækker, 10 søjler og 2 gentagelser.

En to-sidig variansanalyse viser, at i det undersøgte rum er der hverken ved høje eller lave frekvenser signifikans for vekselvirkning mellem højttalerpositioner og mikrofonpositioner, eller signifikans for at vekselvirkningen mellem henholdsvis højttalerpositionerne indbyrdes og mikrofonpositionerne kan være nul. Sandsynligheden for en indbyrdes vekselvirkning er dog større mellem højttalerpositioner end mellem mikrofonpositioner og især ved lave frekvenser. Efterklangstidens middeltal som funktion af frekvensen og konfidensintervallet for middeltallet er indtegnet i figur 17.

Vælges en højttalerposition og de ti mikrofonpositioner successivt, svarer dette til den tidligere normale fremgangsmåde, omvendt kan der vælges at bruge fem højttalerpositioner successivt, hver med først én mikrofonposition og derefter en anden. Endelig kunne man vælge en random fordeling, f.eks. en højttalerposition med successivt to mikrofonpositioner, derefter en anden højttalerposition successivt med to andre mikrofonpositioner osv. indtil alle fem højttalerpositioner og alle ti mikrofonpositioner havde været i brug, se tabel 3.



Figur 17. Middelværdi af efterklangstid som funktion af frekvensen målt i et stort rum med volumen ca. 6000 m³, samt konfidensintervallet for middelværdien ved måling i ti mikrofonpositioner og med fem højttalerpositioner og to frekvensforløb for hver kombination af mikrofon og højttaler.

Tabel 3. Kombinationer af sæt af positioner for højttalere og mikrofoner. For hver type kan udvæges fem sæt måleværdier af hvilke middelværdier beregnes. Antallet af værdier, der ligger uden for konfidensintervallet, er anført i pct.

Kombinations- type	Højttalerposition stk.	Mikrofonposition stk.	Afvielser fra kon- fidensinterval, pct.
a	1	10	20
b	5	1	35
	5	1	
c	1	2	10
	1	2	
	1	2	
	1	2	
	1	2	

For hver af de tre kombinationer af sæt af positioner for højttalere og mikrofoner kan der af det samlede antal resultater udtages fem sæt middeltal. Sammeholdes disse med konfidensintervallets grænser i figur 17, viser det sig, at en del af middeltallene falder uden for spredningsområdet, flest for type b og mindst for type c. Hvilket således ikke uventet antyder, at en randomiseret prøveudtagning er at foretrække for den normalt anvendte. Forenkles målingen, bør det ske således, at færrest mulige middelværdier ligger uden for konfidensintervallet. Hvis man vil reducere måleomfanget til en femtedel, dvs. 20 efterklangsforløb, betyder det, da gentagelserne skal være mindst 2, at der skal måles 10 kombinationer af højttaler- og mikrofonpositioner.

Konklusion af undersøgelsen

Ud fra de fundne resultater burde måleproceduren ændres således, at der i stedet for fem højttalerpositioner og ti mikrofonpositioner anvendes syv positioner for både mikrofoner og højttalere, og at der for hver højttalerposition benyttes en ny mikrofonposition. Med syv positioner er måleomfanget omtrent som i den benyttede procedure (49 x 2 efterklangsforløb per frekvens). Nedsættes antallet af positioner til fem, reduceres måleomfanget til det halve (25 x 2 per frekvens) uden at den hidtil opnåede præcision reduceres mærkbart.

----- Summary -----

SBI-bulletin 82: Measurements of sound insulation and reverberation time in practice. Experiences and results.

Measurements of sound reduction index, impact sound level and reverberation time have been carried out for many years both in the laboratory and in the field. This report describes the results from some investigations carried out in the laboratory as well as in the field. The aim of these investigations was to add to the precision of the measurements without at the same time increasing the number of measuring positions. The main conclusions were:

The sound sources should at least be placed at some distance from the surface of the walls.

The sound reduction index measured with two different loudspeaker systems gave no measurable difference in the results. One loudspeaker system was a dodecahedron shaped box with twelve loudspeaker units and the other system was a box like a suitcase with one loudspeaker unit placed in one of the large surfaces of the box. The box is open when the loudspeaker system is in use.

The same number of positions (never below two) should be used for sound source (loudspeaker, tapping machine) and sound receiver (microphone).

Litteratur

Jacobsen, F. and Rindel, J.H. Time reversed decay measurements. Journal of Sound and Vibration Vol 119, 1987, pag. 187-190.

Kjær, J. Undersøgelse af lydisolations mellem to rum med henblik på bestemmelse af måleusikkerhed. Intern rapport BAM-SBI. F-419. 1977.

Kristensen, J. og Petersen, L.J. Undersøgelse af måleprocedurer for måling af luftlydisolation og trinlydniveau. Intern rapport BAM-SBI. F-419. 1983.

Dämmig, P. und Fischer, H.W. Untersuchungen über die abhängigkeit bauakustische messungen von art des verwendeten Lautsprechers. Acustica vol. 40, 1978, pag. 73.

Venzke, G. und Dämmig, P. Vergleichende Untersuchungen an Trittschall Hammerwerke. Acustica vol 17. 1966, pag 56.

DS/ISO 140 Akustik. Lydisolationsmålinger i bygninger og af bygningselementer. Del 2: Fastlæggelse af præcisionskrav.

Denne SBI-meddelelse omhandler undersøgelser af mulighederne for at forbedre reproducerbarheden ved måling af luftlydisolation, trinlydniveau og efterklangstid under betingelser, der svarer til måling i den indflytningsfærdige bygning. Der omtales resultater fra måling med to forskellige udformninger af højttalerkabinetter, hvoraf det ene er let håndterbart ved feltmålinger. Der peges på muligheder for at reducere måleprocedurers omfang uden at reducere reproducerbarheden tilsvarende. Publikationen henvender sig primært til rådgivende ingeniører og andre med interesse for måling af lyd.