

**BESTEMMELSE AF RESONANSFREKVENS
VHA BRÜEL & KJÆR
FREKVENSGENERATOR OG
SIGNALANALYSATOR**

Ernst Jan de Place Hansen
Oktober 1994

LABORATORIET FOR BYGNINGSMATERIALER
Danmarks tekniske Universitet

BUILDING MATERIALS LABORATORY
Technical University of Denmark

Bestemmelse af resonansfrekvens vha Brüel & Kjær frekvensgenerator og signalanalysator

Ernst Jan de Place Hansen

Laboratoriet for Bygningsmaterialer, Danmarks tekniske Universitet

Teknisk rapport 319/1994

Stikord

Resonansfrekvens, frekvensgenerator, signalanalysator, brugervejledning, frostbestandighed, dynamisk E-modul, ikke-destruktiv prøvning.

Resumé

Der gives en kort baggrund for og oversigt over brugen af ikke-destruktiv prøvning af bygningsmaterialer.

Begrebet resonansfrekvens og forudsætningerne for at bestemme resonansfrekvenser beskrives. Bestemmelse af resonansfrekvenser og dæmpning gennemgås med udgangspunkt i det apparatur som findes på Laboratoriet for Bygningsmaterialer (LBM), DTU.

Egne forsøgsopstillinger til brug for detektering af frostskader i tegl og beton og erfaringer med apparaturet opnået i den forbindelse præsenteres. I bilag gennemgås apparurets betjening mere udførligt.

Indhold

Forord	5
1. Hvorfor benytte ikke-destruktiv prøvning ?	7
1.1 Semi-destruktiv prøvning	7
1.2 Måling af ultralydhastighed	8
1.3 Bestemmelse af resonansfrekvens	8
1.4 Impact-Echo metode til in-situ måling	9
2. Bestemmelse af resonansfrekvens - teoretisk baggrund	10
2.1 Dynamisk E-modul og indre dæmpning	10
2.2 Hvad er resonansfrekvens ?	12
2.3 Resonansfrekvens og skadesdetektering	16
3. Forsøgsopstillinger	18
3.1 Opstilling med frekvensgenerator	18
3.2 Opstilling med signalanalysator	21
3.3 Supplerende opstillinger og udstyr	23
4. Anvendelse af frekvensgenerator	25
4.1 Tilslutning af apparatur	25
4.2 Indkredsning af resonansfrekvens	26
5. Anvendelse af signalanalysator	29
5.1 Tilslutning af apparatur	30
5.2 Bestemmelse af resonansfrekvens og indre dæmpning	30
6. Resultatbehandling	34
7. Diskussion af målemetoder	36
8. Symboliste	39
9. Litteraturliste	41
Bilag 1 Lynvejledning til frekvensgenerator	46
Bilag 2 Gennemgang af frekvensgenerator	47
Bilag 3 Lynvejledning til signalanalysator	52
Filhåndtering	53
Transducer setup	54
Indstilling af delay-tid og vægtningsfunktioner	54
Indstilling af følsomhed (Auto-Range)	56
Bilag 4 Gennemgang af signalanalysator	57
Tastatur	57
Skærmbilleder	62

Indhold

Bilag 5 Tekniske specifikationer	71
B&K Mini Shaker Type 4810	71
B&K Heterodyne Analyzer Type 2010	72
B&K Accelerometer Type 4393	74
B&K Force Transducer Type 8203	75
B&K Signal Analyzer Unit Type 2035	76
B&K 100 kHz Input Module Type 3020	77
B&K Generator & Sampling Module Type 3106	78
B&K 100 kHz/Multichannel Zoom Processor Type 3157	79
Bilag 6 Fotos af opstillinger	80
Opstilling med frekvensgenerator	80
Opstilling med signalanalysator	81
Bilag 7 Udstyrsliste - LBM	82

Forord

Denne rapport indgår som en del af mit arbejde på Ph.D.projektet "Byggematerialers frostbestandighed", der gennemføres i samarbejde mellem Statens Byggeforskningsinstitut (SBI) og Laboratoriet for Bygningsmaterialer (LBM), DTU med docent Anders Nielsen og lektor Lauge Fuglsang Nielsen, begge LBM samt civilingeniør Erik Brandt, SBI som vejledere.

I forbindelse med eksamensprojektet "Tegls frostbestandighed" [de Place & Schmidt,89] samt det igangværende Ph.D.projekt har jeg opnået en række erfaringer med brugen af LBMs frekvensgenerator og signalanalysator (mrk Brüel & Kjær), der bla kan anvendes til en ikke-destruktiv bestemmelse af det dynamiske E-modul vha måling af resonansfrekvens. Udstyret er benyttet til detektering af skader opstået som følge af frost-tø-påvirkning af 30x30x120 mm à 40x40x160 mm prismaer af tegl og beton ved at sætte disse emner i bøjningssvingninger.

Rapporten indledes med et afsnit, der omhandler anvendelsen af ikke-destruktiv prøvning generelt. I det følgende afsnit beskrives størrelsen resonansfrekvens, forudsætningerne for at kunne bestemme resonansfrekvenser, samt hvordan bestemmelse af resonansfrekvens kan anvendes ved skadesdetektering.

Rapporten beskriver to forskellige måder at bestemme resonansfrekvens på, baseret på tvungne svingninger genereret vha en vibrator henholdsvis frie svingninger sat i gang vha en lille hammer. Det øvrige udstyr til bestemmelse af resonansfrekvens, som findes på LBM, omtales kort.

Mine erfaringer med apparaturet er primært af praktisk art, forstået således, at jeg ikke er ekspert i teknikken bag instrumenternes virkemåde. Apparaturet har desuden langt flere muligheder end jeg har benyttet. For en mere detaljeret og teknisk beskrivelse henvises til de tilhørende manualer, der er opført særskilt i litteraturlisten.

Jeg håber rapporten kan hjælpe og inspirere andre, der vil arbejde med måling af dynamiske egenskaber.

Hørsholm, 3. juni 1994
Ernst Jan de Place Hansen

Enkelte rettelser er foretaget i forbindelse med trykningen af rapporten.

Hørsholm, oktober 1994
Ernst Jan de Place Hansen

1. Hvorfor benytte ikke-destruktiv prøvning ?

Der er i tidens løb udfoldet store bestræbelser for at udvikle metoder til in-situ, ikke-destruktiv prøvning af fx beton og i dag findes et meget stort antal metoder til mange forskellige formål, [Malhotra,84], [CRC Handbook,91], [Teodoru & Mommens,91]. Sådanne metoder udvikles for at kunne bestemme styrken og holdbarheden af beton i en virkelig konstruktion, ofte hvor initialværdier af fx trykstyrke ikke findes. Et argument mod at benytte styrkebestemmelse i laboratorieforsøg er, at der er tale om en destruktiv prøvning og at det derfor er nødvendigt at belaste til brud for at få de nødvendige oplysninger. Hvis man fx vil benytte styrkebestemmelse til at følge frostnedbrydning af beton, kræves et stort antal emner og meget arbejde, ligesom måleresultaterne vil udvise en forholdsvis stor spredning pga betonens inhomogenitet.

Benyttes ikke-destruktiv prøvning til laboratorieforsøg kan man ofte benytte forholdsvis få emner, idet det enkelte emne kan "genbruges". Det har desuden den fordel, at man kan følge det *enkelte* emnes udvikling, hvilket specielt for et materiale som beton er vigtigt. Det er også muligt at lave målinger in-situ vha ikke-destruktive metoder. På den måde kan man tage hensyn til bla den aktuelle efterbehandlings betydning for kvaliteten af den udstøbte beton, hvilket ikke er muligt ved bestemmelse af trykstyrke i laboratoriet.

Der skelnes i dag mellem semidestruktive og ikke-destruktive metoder. Førstnævnte resulterer i en lokal beskadigelse af overfladen, dog således at metoderne kan opfattes som ikke-destruktive i forhold til hele konstruktionen, mens sidstnævnte er "ægte" ikke-destruktive metoder.

Uanset hvilken form for prøvning man benytter, det være sig destruktiv eller ikke-destruktiv, er det vigtigt at holde sig for øje, at der er tale om *stikprøvemåling*. Resultatet af en betonprøvning vil således afhænge af betonens sammensætning og alder, fugtforholdene, placering af eventuel armering etc. Ikke-destruktiv prøvning er derfor først og fremmest egnet til sammenlignende målinger. Det kan være undersøgelser af materialets homogenitet eller undersøgelse af ændring af materialeegenskaber, fx som følge af frost-tø-belastning.

1.1 Semi-destruktiv prøvning

Et eksempel på en semidestruktiv in-situ-metode er den dansk udviklede LOK-test; en såkaldt "udtræksprøvning". Små stålankre indstøbes i betonen og trækkes ud, når betonen er hærdnet. Udtræksstyrken benyttes til at vurdere trykstyrken. En variant af denne metode er den såkaldte CAPO-test, hvor man i stedet for at indstøbe ankre i betonen fræser et hul og monterer ankeret i den hærdnede beton. Man behøver således ikke at planlægge omfanget af sådanne prøvninger inden betonen støbes ud, ligesom ældre konstruktioner kan undersøges.

1.2 Måling af ultralydhastighed

Mange metoder til ikke-destruktiv prøvning bygger på måling af egenskaber vha hvilke man indirekte kan foretage skøn over trykstyrke, E-modul eller et andet mål for holdbarhed.

Et meget kendt og brugt eksempel på dette er måling af ultralydhastighed, som det fx er beskrevet i [ASTM C597] og [DS 423.33]. Ultralydmåling er baseret på, at der sendes kortvarige, højfrekvente lydimpulser gennem materialet fra en sender til en modtager. Afhængig af materiale-sammensætning mv vil signalet nå gennem emnet med en bestemt hastighed (c), som derfor i mange sammenhænge kan benyttes til at skønne det dynamiske E-modul (E_{DYN}) jf (1), [Timoshenko,34], [Love,27].

$$c = \sqrt{\frac{E_{DYN}}{\rho} \frac{1-v}{(1+v)(1-2v)}} \quad (1)$$

v er Poissons forhold, ρ er densiteten af materialet. For at bestemme E_{DYN} vha (1) kræves kendskab til de aktuelle værdier af v og ρ . I lange, tynde konstruktioner kan der ses bort fra v . I så fald kan (2) anvendes.

$$\frac{E_{DYN,n}}{E_{DYN,0}} = \left(\frac{c_n}{c_0}\right)^2 \quad (2)$$

Indices 0 og n refererer til referencemåling henholdsvis måling efter en given påvirkning, fx n frost-tø-cykler. Dog skal det bemærkes, at en halvering af v for ikke-frostbestandig beton som følge af materialets nedbrydning er observeret [Trudsø,58A]. Det er derfor forbundet med en vis usikkerhed at benytte et udtryk af typen (2) til at vurdere ændringer i materialets E-modul som følge af frost-tø-påvirkning.

1.3 Bestemmelse af resonansfrekvens

En anden metode, der især er brugt ved laboratorieundersøgelser, er bestemmelsen af resonansfrekvensen, som denne rapport handler om. Både Trudsø [1958A] og Warris [1964] viser, at resonansfrekvens er en mere følsom metode end ultralydmåling, når det gælder indikering af frostskader.

Resonansfrekvens har været anvendt til bestemmelse af dynamisk E-modul siden midten af 1930'erne jf [Powers,38]. Powers arbejdede videre med princippet og udviklede en simpel, hurtig metode, hvor han slog på materialet med en hammer og sammenlignede lyden med toner fra forskellige stemmegafler. Resonansfrekvensen skulle på denne måde kunne bestemmes med en usikkerhed på 2-3 %. Denne trods alt meget subjektive metode blev grundlaget for arbejder af Hornbrook [1939], Thomson [1940], Obert & Duvall [1941], Stanton [1944] mfl, der alle satte materialet i svingninger vha en vibrator. Selv om bestemmelse af resonansfrekvens således har mange år på bagen, har metoden ikke været benyttet så meget uden for laboratoriet som fx ultralyd har. Det skyldes

primært, at ultralydmåling er mindre kompliceret og derfor bedre egnet til in-situ målinger.

I de senere år er en ny version af metoden udviklet, hvor man vender tilbage til Powers' princip med at slå på emnet med en hammer. Den store forskel er, at man ikke længere skal bruge sine ører, men en mikrofon (i form af et accelerometer) og en signalanalysator til at bestemme resonansfrekvensen. Desuden har man mulighed for at få betydelig flere oplysninger om materialets dynamiske opførsel. Opstillinger der bygger på dette princip er omtalt i [Gaidis & Rosenberg,86] og [Christaras et al,94] og en tilsvarende opstilling baseret på komponenter fra Brüel & Kjær gennemgås i denne rapport. Metoden er desuden taget med i den nyeste version af [ASTM C215]. [Malhotra & Sivasundaram,91] giver en slags "state-of-the-art" omkring resonansfrekvens incl ovennævnte nye princip samt eksempler på undersøgelser, hvor resonansfrekvens har været benyttet til detektering af frostskader.

1.4 Impact-Echo metode til in-situ måling

En variant til in-situ brug er den såkaldte Impact-Echo metode, der markedsføres under navnet DOCTer (*Defect Orientation Confirmation Tester Impact-Echo System*). Metoden er udviklet i et samarbejde mellem the National Institute of Standards and Technology (Maryland) og Cornell University (New York). Den bygger på samme princip som ovennævnte metode med hammeren. Metoden er udviklet med henblik på in-situ målinger, hvor det er ønskeligt/nødvendigt at kunne måle fra én side (fx væg- eller dækelementer). Ved in-situ målinger har man ikke mulighed for at isolere det område af konstruktionen man måler på, i modsætning til laboratoriemålinger, hvor man kan arbejde med små materialeemner. Dette problem har nødvendiggjort en hel del teoretiske overvejelser. Metoden er beskrevet i et større antal artikler fx [Sansalone & Carino,89], [Pratt & Sansalone,92] og [Cheng & Sansalone,93].

2. Bestemmelse af resonans-frekvens - teoretisk baggrund

I dette afsnit defineres størrelsen resonansfrekvens, og det beskrives hvordan resonansfrekvenser giver sig til kende, samt hvordan disse kan benyttes til skadesdetektering. Indledningsvis omtales det dynamiske E-modul og dæmpningen, der er nært knyttet til resonansfrekvensen. For yderligere oplysninger angående teorien omkring resonansfrekvens henvises til [Trudsø,78], [Pickett,45], [Powers,38] mfl.

2.1 Dynamisk E-modul og indre dæmpning

Når der ses bort fra tidsafhængige egenskaber defineres det statiske E-modul (E) ganske enkelt som:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3)$$

hvor σ og ϵ betegner spænding henholdsvis tøjning.

Helt så enkelt er det ikke for det dynamiske E-moduls vedkommende. Ved en dynamisk belastning vil intern friktion resultere i en faseforskydning mellem kraft og tøjning. Det dynamiske E-modul (E^*) udtrykkes således som en kompleks størrelse, [Schlägel,60]:

$$E^* = E' + E'' = E'(1+jd) \quad (4)$$

hvor E' er den reelle og E'' den imaginære del af E^* (dvs det elastiske modul henholdsvis dæmpnings-modulet). E^* , E' og E'' skal opfattes som vektorer jf figur 1.

d betegner dæmpningen og defineres som

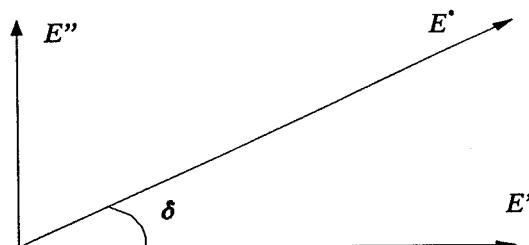
$$d = \operatorname{tg}\delta = \frac{E''}{E'} \quad (5)$$

hvor δ er tabsvinklen. E'' og E' angiver i denne forbindelse den numeriske værdi (længde) af vektorerne i figur 1. Dæmpningen defineres som den egenskab ved et materiale, der får frie svingningers amplitude til at aftage som funktion af tiden, [Malhotra & Sivasundaram,91].

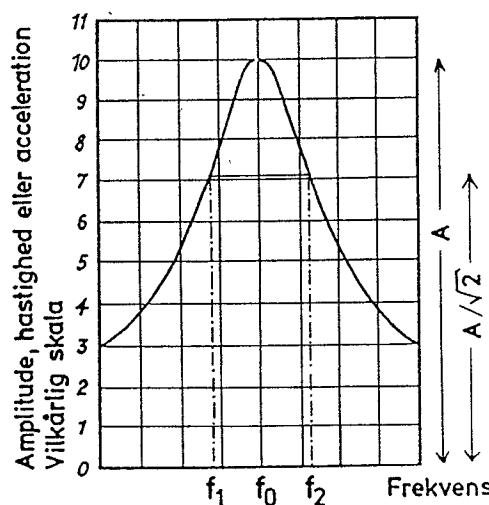
δ kan bestemmes ud fra forsøg vha.:

$$\delta = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \pi \quad (6)$$

jf figur 2, hvor f_0 betegner resonansfrekvensen og f_1 og f_2 er frekvenser svarende til en amplitude på $1/\sqrt{2}$ af resonansfrekvensens amplitude. Præcisionen i bestemmelsen af δ afhænger af, hvor veldefineret toppen på kurven er.



Figur 1. Komplekst E -modul (E^*). E' er den reelle del (elastisk modul), E'' den imaginære del (dæmpningsmodul). δ er tabsvinklen.

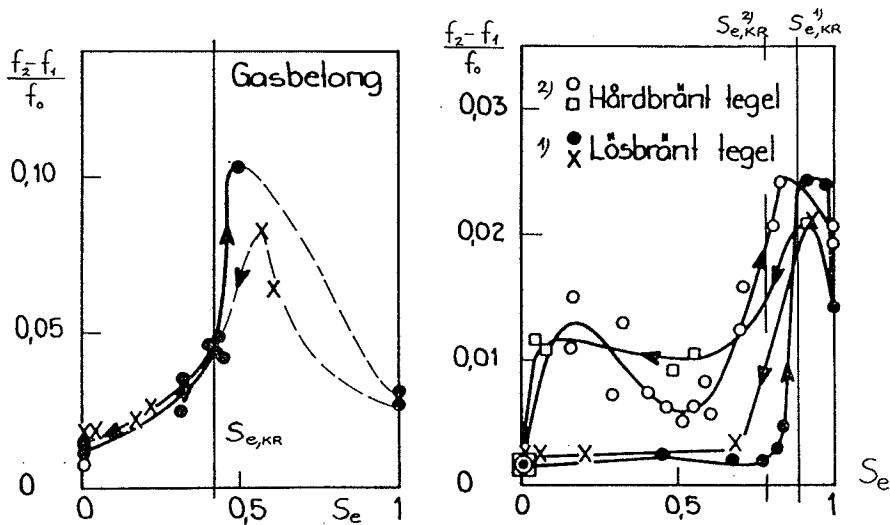


Figur 2. Bestemmelse af dæmpning, udtrykt ved tabsvinklen δ , [Trudsø,78].
 $\delta = (f_2 - f_1) \cdot \pi / f_0$, hvor f_0 er resonansfrekvensen.

Herefter benyttes betegnelsen dynamisk E -modul (E_{DYN}) om den reelle del af E^* , dvs E' .

Göran Fagerlund har undersøgt dæmpning som funktion af vandmætningsgraden (S) for forskellige porøse materialer, [Fagerlund,72]. Specielt for grovpørøse materialer som gasbeton og dårlig brændt tegl finder Fagerlund, at dæmpningen er meget afhængig af ændringer i vandmætningsgrad i området omkring den *kritiske* vandmætningsgrad. Selv en meget lille ændring i vandindholdet kan derfor betyde en stor ændring i dæmpningen jf figur 3, uden at det nødvendigvis modsvares af en skade i materialet. For beton konstateres ligeledes et afhængighedsforhold mellem fugtindhold og dæmpning, [Obert & Duvall,41].

Dæmpning bestemmes med en langt større spredning end E_{DYN} , hvilket bla skyldes, at den findes vha en lille differens mellem to store tal ($f_2 - f_1$), [Trudsø,78]. Trudsø nævner, at man skal være meget omhyggelig i sine målinger og med understøtningen af sine emner, hvis bestemmelse af indre dæmpning på beton skal give et brugbart resultat.



Figur 3. Eksperimentelt bestemt sammenhæng mellem vandmætningsgrad (S_e) og dæmpning (udtrykt ved $(f_2 - f_1)/f_0$), [Fagerlund,72]. $S_{e,KR}$ er den kritiske vandmætningsgrad.

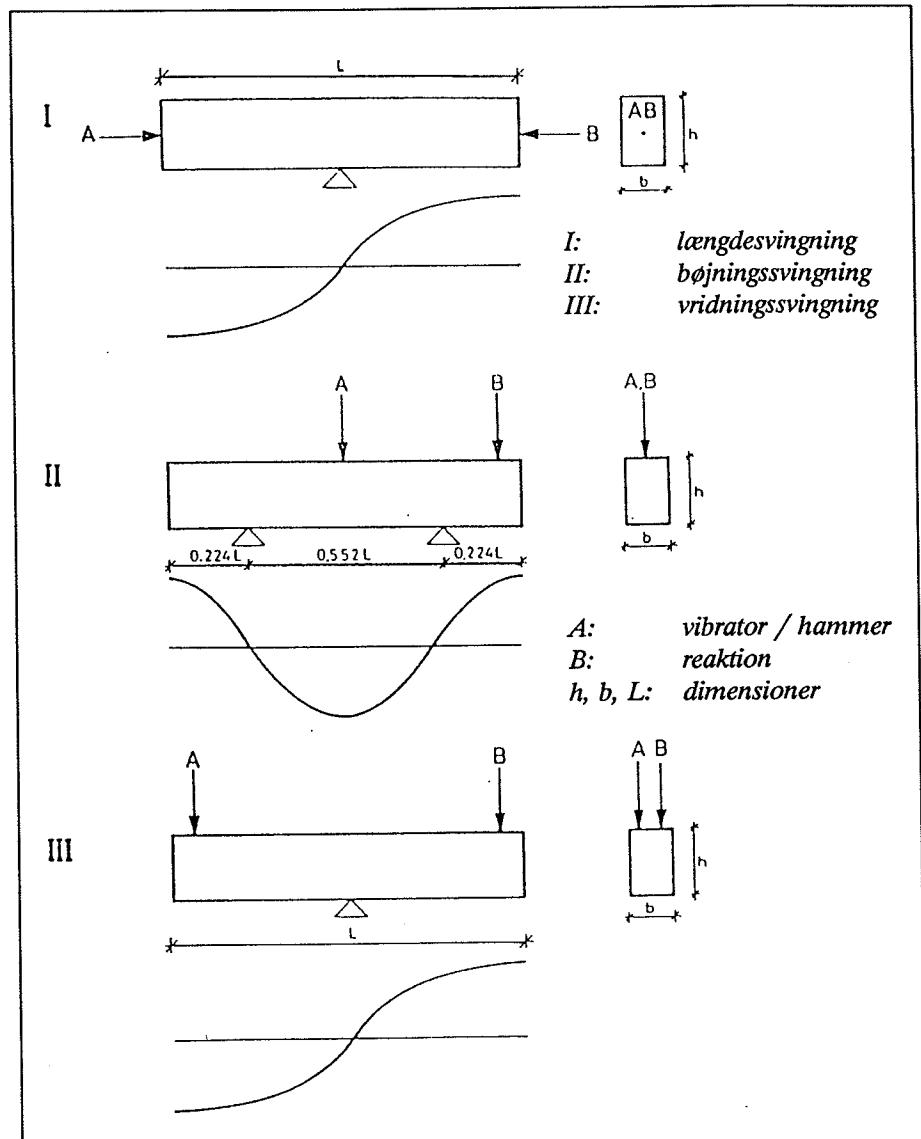
2.2 Hvad er resonansfrekvens ?

Resonansfrekvensen (f_e) for et emne kan bestemmes ved at udsætte emnet for enten længde-, bøjnings- eller vridningssvingninger jf figur 4. Ved bestemte for emnet karakteristiske frekvenser, vil det komme i egen-svingninger, dvs der dannes "stående bølger" i emnet, jf figur 5. Disse frekvenser er de såkaldte resonansfrekvenser.

Ved at anbringe en mikrofon på emnet, som vist på figur 4, kan man registrere, om emnet er kommet i egen-svingninger. Som mikrofon benyttes et accelerometer, der opfanger den acceleration, emnet opnår ved at blive sat i svingninger, og omsætter accelerationen til et elektrisk signal. Accelerationen og dermed det elektriske signal vil være størst, når materialet kommer i egen-svingninger.

Den mest anvendte svingningsform er bøjningssvingninger, da det normalt er lettest at bestemme f_e på denne måde. Således er en to-punkts understøtning, der benyttes når emnet sættes i bøjningssvingninger, mere stabil end en et-punkts understøtning, der benyttes i forbindelse med de andre svingningsformer jf figur 4. Denne rapport omhandler derfor kun bestemmelse af resonansfrekvens vha *bøjningssvingninger*.

Emnet kan sættes i svingninger vha en vibrator, [Jehrbo Jensen,85] eller via et slag med en hammer, [Gaidis & Rosenberg,86]. De to opstillinger der beskrives i denne rapport bygger på disse to forskellige principper, som kan karakteriseres ved brugen af en *frekvensgenerator* i kombination med en *vibrator* henholdsvis en *signalanalysator* i kombination med en *hammer*. Forskellen på de to målemetoder beskrives i afsnit 2.2.2. Konsekvensen fremgår bla af forskelle i forsøgsopstilling, afsnit 3.1 og 3.2. Begge målemetoder indgår i øvrigt i den seneste version af [ASTM C215].



Figur 4. Resonansfrekvenser (princip), [Jehrbo Jensen,85]. Emnet sættes i svingninger vha A, reaktionen registreres vha B.

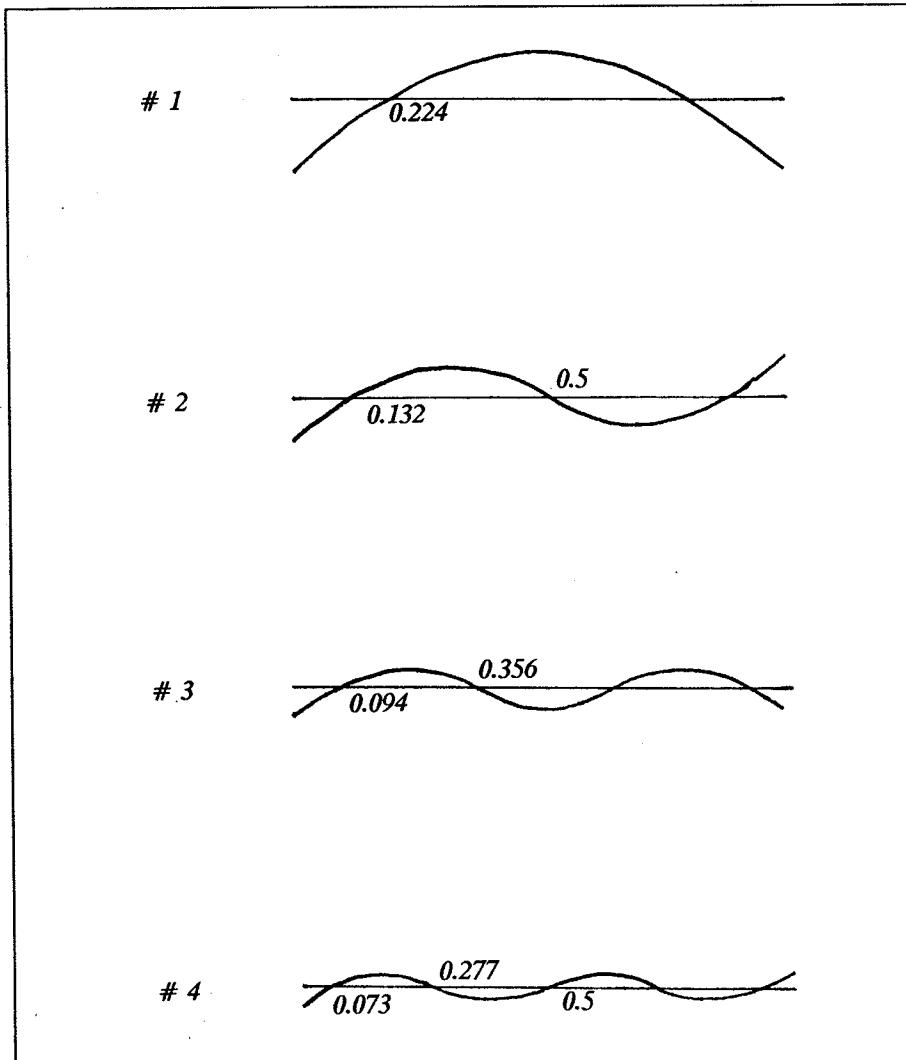
2.2.1 Grundfrekvens og frekvens af højere orden

Materialet kan komme i egensvingning ved flere forskellige frekvenser som illustreret i figur 5. At undersøge om man har at gøre med en grundfrekvens (mode #1) eller en frekvens af højere orden (mode #2, #3, #4 osv) kaldes at bestemme svingningens modus.

Figur 5 illustrerer groft fortegnet, hvordan en frit svævende bjælke vil reagere, når den sættes i bøjningssvingninger med frekvenser svarende til egensvingningerne. Et stort udsving fra den vandrette linie betyder, at bjælken det pågældende sted reagerer kraftigt på den påsatte frekvens. Af samme grund vil det være fordelagtigt at placere accelerometeret ud for det/de steder, hvor det maksimale udsving opnås.

De punkter, hvor den stående bølge krydser den vandrette linie, kaldes "nodal points" (knudepunkter), og det fremgår af figur 5, at jo højere mode desto flere knudepunkter. Når man bestemmer resonansfrekvens ved bøjningssvingninger, vil man normalt understøtte bjælken simpelt i to

punkter. Bjælken har netop to knudepunkter ved grundfrekvensen (mode #1), jf figur 5.



Figur 5. Grundfrekvens (mode #1) samt resonansfrekvens af anden, tredje og fjerde orden (mode #2, #3, #4) for en frit svingende bjælke udsat for bøjningssvingninger, illustreret ved stående bølger. Teoretisk position af knudepunkter angivet, [Vinkeloe,62].

For længde- og vridningspåvirkning er resonansfrekvenser af højere orden (mode #2,3..) et helt multiplum af grundfrekvensen, men for bøjningssvingningers vedkommende er sammenhængen ikke helt så enkel, idet der optræder en konstant, der er afhængig af svingningens modus. Der gælder:

$$f_{n+1} = \frac{K_{n+1}^2}{K_n^2} f_n \quad (7)$$

hvor n angiver svingningens modus. Værdier for K_n er bla angivet i [Vinkeloe,62].

2.2.2 Hvordan bestemmes den "rigtige" resonansfrekvens ?

Benyttes frekvensanalyse til at detektere skader i et materiale, er det væsentligt at kunne regne med, at man bestemmer den samme resonansfrekvens - dvs frekvens af samme orden - ved hver måling. Det gælder specielt i forbindelse med forsøg, hvor de påvirkninger, som emnet udsættes for mellem to målinger af resonansfrekvensen, kan resultere i en voldsom ændring af denne.

I principippet kan man vælge at bestemme en vilkårlig af resonansfrekvenserne, men som afsnit 2.2.1 viser, er det simpleste at bestemme grundfrekvensen (mode #1) jf antallet af understøtninger. Der vil da være så få berøringspunkter som muligt og emnet bevæger sig desto mere som følge af belastningen. Heri ligger også, at grundfrekvensen er lettest at bestemme, simpelthen fordi man her får den kraftigste reaktion.

Målemetodens betydning

Benyttes en vibrator til at sætte emnet i svingninger, som beskrevet i afsnit 3.1, undgår man at "ramme ind i" frekvenser med et ulige antal knudepunkter (mode #2, #4 etc) ved at placere vibratoren midt på emnet, da stående bølger hørende til disse frekvenser netop har et knudepunkt midt på emnet jf figur 5. Benyttes en to-punkts understøtning vanskeliggøres detektering af egensvingninger ved mode #3, #5 etc.

Sættes emnet i svingninger vha en hammer koblet til en signalanalysator, som beskrevet i afsnit 3.2, svinger emnet helt frit og man kan derfor ikke sikre sig på samme måde. Til gengæld vil man med et hammerslag påvirke emnet med et bredt spektrum af frekvenser, hvorfra nogle få er resonansfrekvenser. Signalanalysatoren er i stand til at behandle dette langt mere komplicerede signal, således at emnets reaktion på hele spektret af frekvenser kan registreres på én gang. På den måde får man let et overblik over tilstedsvarelsen af resonansfrekvenser.

Geometri og størrelse af emner

For at lette bestemmelsen af grundfrekvensen anbefaler [ASTM C215] mfl at benytte emner med et længde-bredde forhold mellem 3 og 5, uden at det dog skal opfattes som et ufravigeligt krav. Et passende længde-bredde-forhold mindsker risikoen for at udsætte emnet for flere slags egen-swingninger (bøjnings-, vridnings-, længdeswingninger) på én gang. [Fagerlund,77] refererer til forsøg, hvor resonansfrekvensen med held er bestemt på emner med et længde-bredde-forhold på 2.

Ved at arbejde med emner, der opfylder ASTM's krav, kan man tillade sig at være lidt upræcis med placeringen af understøtningerne, fordi der er tale om en "blød" krumning ved knudepunkterne i mode #1 jf figur 5. Derfor tales i denne rapport om ophængning/understøtning i *femtedelspunkterne*, svarende til en afstand på $0,2 \times l$ fra enderne, hvor l er emnets længde.

Udviklingen af nyt måleudstyr, ikke mindst at komponenterne bliver stadig mindre, har gjort at man kan måle på forholdsvis små emner, uden at vægten af komponenter influerer på resultatet. Små emner er i denne sammenhæng emner med en størrelse på 30x30x120 mm, evt endnu mindre.

2.3 Resonansfrekvens og skadesdetektering

Om sammenhængen mellem det dynamiske E-modul E_{DYN} og resonansfrekvensen f_e gælder forenklet, [Pickett,45] mfl, at :

$$E_{DYN} = k \cdot w \cdot f_e^2 \quad (8)$$

w er emnets vægt. k er en konstant, der afhænger af emnets geometri, svingningsmåden (bøjnings-, vridnings- eller længdesvingninger, jf figur 4), om f_e er grundfrekvensen eller en resonansfrekvens af højere orden, samt af Poissons forhold, v . Pickett [1945] har studeret k samt forudsætningerne for (8) for bestemte geometrier.

(8) er udviklet på basis af ikke-lineære differentialligninger for udbøjning af en lang tynd bjælke af et homogent, isotrop, perfekt elastisk materiale. Den kan anvendes på bygningsmaterialer ved at arbejde med tilstrækkelig store emner - fx betonemner, der er betydelig større end de sten der indgår i betonen.

Når porøse materialer udsættes for nedbrydning, fx via frost-tø-påvirkning, mindskes E_{DYN} og dermed f_e , jf (8). Dette er baggrunden for at benytte resonansfrekvens til detektering af skader.

Skadesdetektering vha resonansfrekvens er først og fremmest egnet til at detektere skader i situationer, hvor der ikke sker en egentlig afskalning af materiale, dvs i tilfælde af indre skader. Vægtab i form af afskalning kan tværtimod øge resonansfrekvensen, fordi emnets geometri ændres, men afskalningen betyder også, at skaderne kan ses med det blotte øje.

Warris [1964] konkluderer ikke desto mindre, bla på basis af forsøg af Klieger [1952], at alle skader som følge af frysning, såvel afskalning som ekspansion, giver sig udslag i en reduktion af den transverselle E_{DYN} (bøjningsstivheden), og at det således er tilstrækkeligt at bestemme denne. Warris når for beton frem til, at:

$$\frac{\Delta E}{E_0} = k_1 \frac{\Delta w}{w_0} + k_2 (\epsilon - k_3) \quad (9)$$

hvor Δ betyder ændring, w er vægten og ϵ er ekspansionen (længdeændringen). Første led udtrykker vægtændringens betydning (afskalning), andet led udtrykker ekspansionens betydning (indre skader). k_1 , k_2 og k_3 er konstanter.

I følge Warris kan vægtab op til 5 % ignoreres, dvs man kan regne med linearitet mellem $\Delta E/E_0$ og ϵ jf (9), således at ΔE er et mål for, hvor store indre skader emnet har opnået. Denne simplificering er også eftervist eksperimentelt af Bergström [1955].

En direkte bestemmelse af E_{DYN} foretages normalt ikke i forbindelse med frostprøvning. Det skyldes især, at man ikke er interesseret i den absolute værdi af E_{DYN} , men i den ændring af E_{DYN} som frost-tø-påvirkningen bevirker. På den måde slipper man også for at bestemme de indgående konstanter. Ser man bort fra vægtab, kan man i følge [Warris,64] bestemme det relative dynamiske E-modul (E_n/E_0) vha :

3. Forsøgsopstillinger

I dette afsnit gennemgås to forsøgsopstillinger til bestemmelse af resonansfrekvens, henholdsvis afsnit 3.1 og 3.2, baseret på udstyr som LBM råder over. Supplerende udstyr samt alternative opstillinger til beskrivelserne i afsnit 3.1 og 3.2 omtales kort i afsnit 3.3. Fotos af opstillinger findes i bilag 6. I bilag 7 findes en samlet liste over udstyr og tilbehør som findes på LBM. Selve måleinstrumenterne er beskrevet nærmere i afsnit 4 og 5 med tilhørende bilag.

De beskrevne opstillinger er beregnet til bestemmelse af resonansfrekvenser ved at udsætte emnet for *bøjningssvingninger*. Opstillinger til brug ved andre svingningsformer er skitseret i [Jehrbo Jensen,85], [ASTM C215] mfl.

3.1 *Opstilling med frekvensgenerator*

Den viste opstilling er benyttet ved bestemmelse af resonansfrekvens på 30x30x120 mm teglprismer i forbindelse med frost-tø-belastning, [de Place & Schmidt,89]. En tilsvarende opstilling anbefales bla i [ASTM C215] og [Fagerlund,72].

I det følgende refereres til figur 6 ved at henvise til betegnelserne på figuren vha (6.x), hvor x er et tal på figuren. Se også afsnit 4.

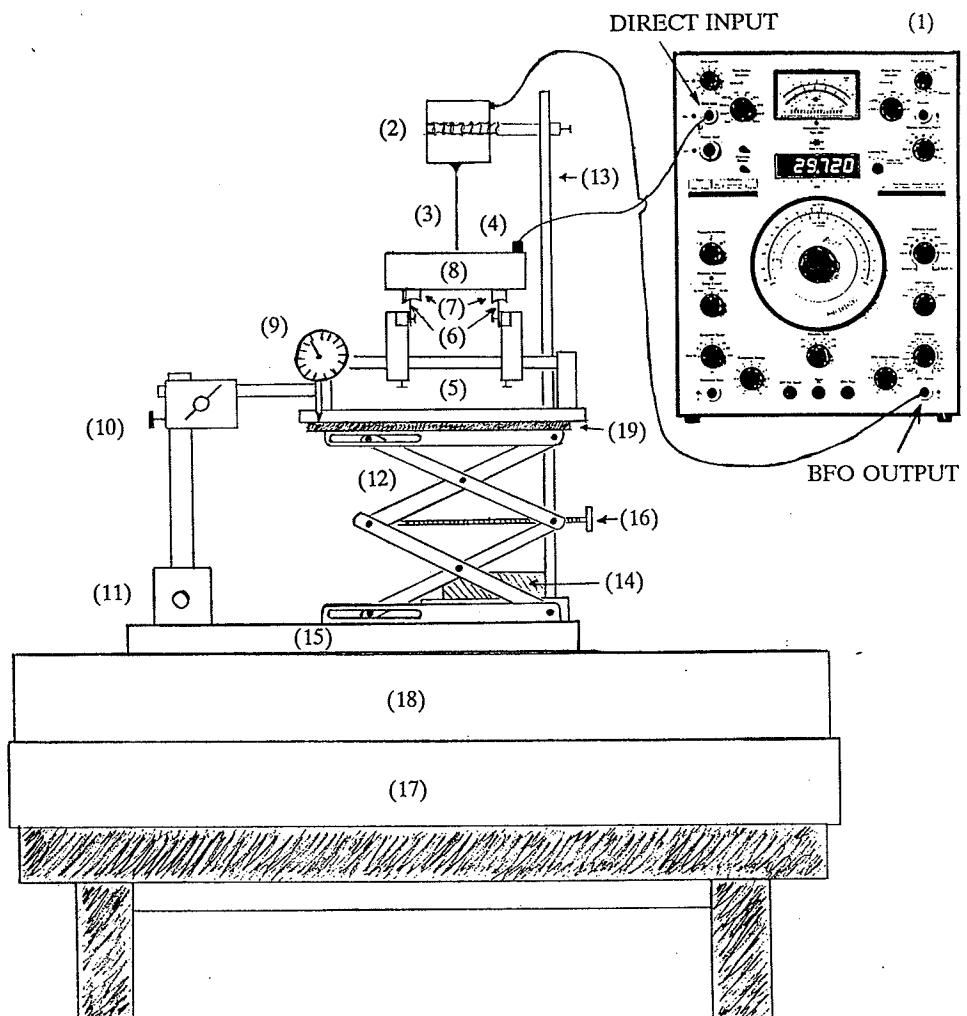
Siden udarbejdelsen af [de Place & Schmidt,89] er LBM's eksemplar af frekvensgeneratoren blevet kasseret og tilsvarende apparatur er lånt på Lab f Akustik, DTU i forbindelse med efterfølgende projekter på LBM, se bla [Laugesen,93].

3.1.1 Understøtning af emne

Emnet lægges på en specielt fremstillet holder (6.5), der består af en aflang ramme, hvor to "klodser" kan forskydes i horisontal retning. På hver klods er et knivblad (6.6) skruet fast. Emnet hviler på disse med et mellemlags af skumgummi (6.7). Ved at forskyde klodserne kan afstanden mellem understøtningerne afpasses til længden af det aktuelle emne. Mindste afstand er 10 mm, største er 220 mm, svarende til, at emnets længde kan variere fra 17 mm til 367 mm, når det understøttes i femtedelspunkterne. Mellemlagsene skal sikre, at svingningerne ikke forplantes fra emnet til understøtningerne, hvilket kontrolleres ved at forsøge at bestemme resonansfrekvensen af emnet med accelerometeret anbragt på et af knivbladene. Understøtningerne placeres i femtedelspunkterne jf afsnit 2.2.2.

Emnernes begrænsede størrelse og vægt (150-200 g) betyder at en understøtning, som beskrevet ovenfor, er at foretrække fremfor ophængning i tråde. Ophængning i tråde benyttes typisk til væsentlig større emner (100 x 100 x 400 à 600 mm), hvor vægten af vibrator og mikrofon har mindre betydning for resultatet, [Trudsø,78], [Jehrbo Jensen,85] mfl.

Elevatorbord (6.12) og måleur (6.9) benyttes for at kunne reproducere tvangskræfterne fra vibratoren, jf afsnit 3.1.2. Mellem holderen (6.5) og elevatorbordet er lagt en plade (6.19), der udelukkende har til formål at fungere som "angrebspunkt" for måleurets tap, hvilket elevatorbordet ikke var tilstrækkeligt stort til.



Figur 6. Forsøgsopstilling med frekvensgenerator. Frekvensgeneratoren (1) er af pladsmæssige grunde anbragt "svævende" øverst til højre på figuren med angivelse af tilslutning for vibrator (2) og mikrofon (4).

- (1) Frekvensgenerator, B&K Heterodyne Analyzer Type 5122
- (2) Vibrator, B&K Mini Shaker Type 4810
- (3) Kobberør
- (4) Mikrofon, B&K Accelerometer Type 4367
- (5) Holder med flytbare understøtninger
- (6) Knivblade
- (7) Skumgummipuder
- (8) Emne
- (9) Måleur
- (10) Stativ til måleur
- (11) Magnetholder
- (12) Elevatorbord
- (13) Stativ til opfængning af vibrator
- (14) Ballast
- (15) Stålplate
- (16) Regulering af elevatorbord
- (17) RoofMate-plade
- (18) Tung plade (betonflise el lign)
- (19) Ekstra plade (kan evt udelades)

3.1.2 Vibrator (B&K Mini Shaker Type 4810)

I den benyttede opstilling med frekvensgenerator sættes emnet (6.8) i svingninger vha en vibrator (6.2), som omdanner et elektrisk signal til en mekanisk bevægelse. Vibratoren har en egenfrekvens, der er højere end 18 kHz jf bilag 5, og den er således egnet til frekvensanalyse op til denne værdi.

For at undgå at komme til at knække vibratorens fastmonterede rør i forbindelse med målingerne, bør der anbringes et tyndt kobberrør (6.3) som "forlænger" mellem vibratoren og emnet. I tilfælde af fejlhåndtering vil der så blot ske det, at kobberrøret falder på gulvet.

For hvert enkelt prøveemne kan tvangskræfterne fra vibratoren reproduceres vha elevatorbordet (6.12) og måleuret (6.9-11), idet elevatorbordet ved hver måling indstilles således, at måleuret giver samme udslag. Dette er af stor betydning for at kunne sammenligne målinger foretaget i forskellige situationer, fx før og efter frostprøvning. En tilfredsstillende reproduktion forudsætter, at vibratoren ikke flyttes, samt at emnet placeres på samme måde ved hver måling. Desuden forudsættes en understøtning som beskrevet i afsnit 3.1.1, idet en ophængning i tråde ikke gør det muligt at reproducere tvangskræfterne.

3.1.3 Mikrofon (B&K Accelerometer Type 4367)

Som mikrofon (6.4) benyttes i [de Place & Schmidt,89] et accelerometer. På trods af den beskedne størrelse er der grund til at tro, at accelerometerets masse ikke kan ignoreres helt, og at accelerometeret derfor influerer på resonansfrekvensen. Accelerometeret vejer 15 gram, svarende til ca 1/10 af vægten af et emne.

Accelerometeret registrerer emnets reaktion (acceleration) på den påvungne svingning og omsætter det til et elektrisk signal. Signalet sendes videre til frekvensgeneratoren (6.1), hvor reaktionens størrelse (amplitude) kan aflæses på METER SCALE (figur 9, afsnit 4).

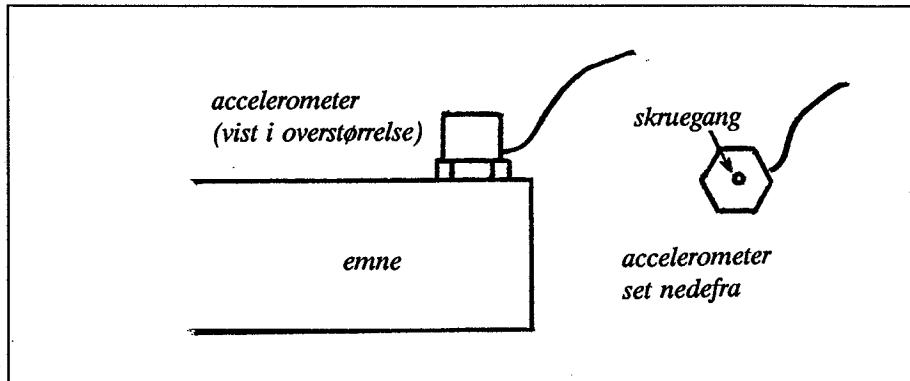
Placering af accelerometer

Det størst mulige signal fås ved at placere accelerometeret i den ene ende af emnet på samme flade som vibratoren, jf figur 4, eller på modstående flade. Alternativt kan accelerometeret anbringes modsat vibratoren, dvs midt på emnet. Det bevirker, at man kun opnår amplituder på ca 60 % af det maksimale, [ASTM C215] mfl, hvilket kan resultere i en mindre præcis fastlæggelse af resonansfrekvensen.

Accelerometeret skal orienteres som vist på figur 7.

Fastgørelse af accelerometer

Accelerometeret kan fastgøres på flere måder: 1) den kan holdes ind mod emnet vha en elastik, 2) den kan fastgøres med bivoks el lign, 3) skruengangen på accelerometerets "forside" kan udnyttes (se figur 7). Det kan foregå ved at lime en lille plade med et gevindstykke fast på emnet, som accelerometeret skrues fast til, eller ved at anbringe en minimagnet i skruengangen og lime små metalbrikker på emnet. En god kontakt mellem accelerometer og emne opnås, men det er kun muligt at måle de steder hvor man i forvejen har fastgjort sådanne gevindstykke/metalbrikker.



Figur 7. Anbringelse af accelerometer på emne. Skruengang kan benyttes i forbindelse med fastgøring til emnet.

I [de Place & Schmidt,89] er metode 1) benyttet.

Alternativt benyttes en pick-up opsat i et stativ, [Fagerlund,72], eller som på en pladespiller, [Trudsø,78].

3.1.4 Underlag for opstillingen

For at undgå forstyrrelser af målingerne er det vigtigt at sikre sig, at det kun er emnet (6.8) der svinger, dvs at svingninger ikke udbredes til/fra understøtninger og gulv. Understøtningens egenfrekvens skal derfor ligge *uden for* det aktuelle frekvensområde; i praksis vil det sige en tung understøtning med en meget lav egenfrekvens. Måleinstrumenter skal *ikke* anbringes på dette underlag.

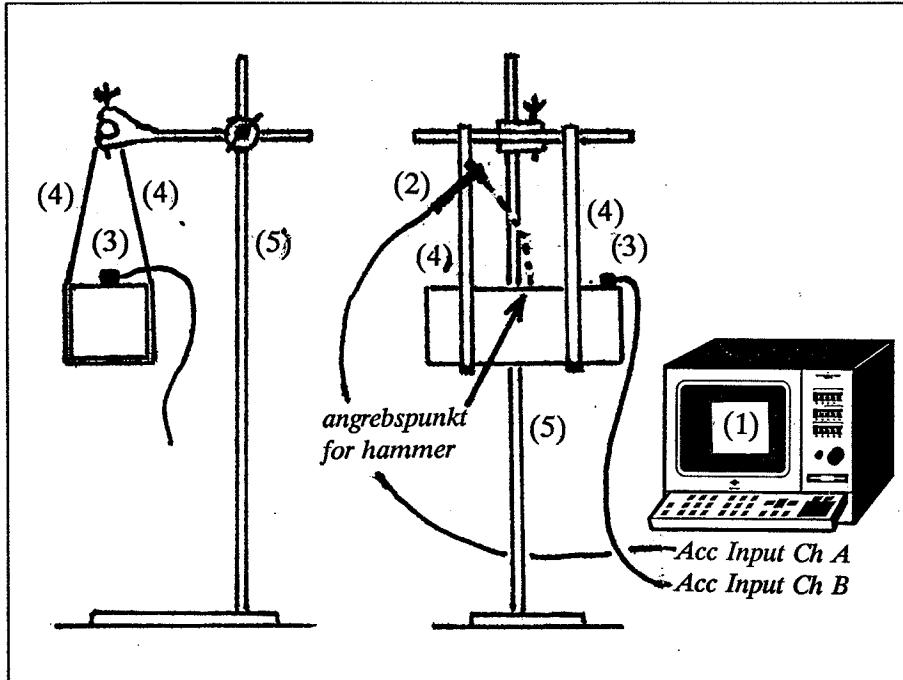
I den benyttede opstilling er anvendt tre plader, en stålplade (6.15), en betonflise (6.18) og en RoofMate-plade (6.17). Stålpladen benyttes udelukkende aht magnetholderen (6.11) til måleuret (6.10). Betonflisen fungerer som ballast, mens RoofMate-pladen, skal bremse udbredelsen af svingninger til/fra omgivelserne.

Opstillingens underlag skal afpasses størrelsen af de emner, der måles på. I [Trudsø,78] refereres således til en opstilling med en 60 kg tung grundplade. Opstillingen benyttes til måling på 100x100x600 mm beton-emner. Laboratoriet for Teknisk Fysik, DTU har en opstilling med en grundplade på 600 à 700 kg, [Brandt,93].

3.2 Opstilling med signalanalysator

Den viste opstilling er benyttet i Ph.D.projektet "Byggematerialers frostbestandighed" samt af Ejsing [1993] til måling af resonansfrekvens og dæmpning på 30x30x120 mm à 40x40x160 mm beton- og tegl-prismer. Opstillingen er baseret på LBM's nyindkøbte modalanalyseudstyr fra Brüel & Kjær. Modalanalyse dækker over karakterisering af et elastisk materiales dynamiske egenskaber (frekvens, dæmpning, svingningens modus mm).

Der refereres til figur 8 ved at henvise til betegnelserne på figuren vha (8.x).



Figur 8. Forsøgsopstilling - signalanalysator.

- (1) Signalanalysator, B&K Signal Analyzer Unit Type 2035
- (2) Hammer, B&K Force Transducer/Impact Hammer Type 8203. Transduceren monteres på et skaft og fungerer sammen med dette som en lille hammer.
- (3) Mikrofon, B&K Accelerometer (Miniature Delta Shear) Type 4393
- (4) Elastikker til ophængning af emne
- (5) Stativ med holdere og gribeklører til ophængning af emne

3.2.1 Ophængning af emnet

Sammenholdt med opstillingen i figur 6 er der tale om en meget enkel opstilling. Det skyldes dels at der benyttes et mindre accelerometer (8.3), dels at swingninger ikke påtrykkes vha en vibrator, men igangsættes ved at slå med en lille hammer (8.2). Det betyder at emnerne kan svinge mere frit. Desuden har hammeren indbygget en krafttransducer, der registrerer hammerslagets styrke. Elevatorbordet og måleuret fra den foregående opstilling er derfor overflødige.

Alt i alt betyder det, at en ophængning vha elastikker (8.4) - alternativt tråde - i femtedels-punkterne er tilstrækkeligt selv for emner med en størrelse på 30x30x120 mm.

3.2.2 Hammer (B&K Force Transducer/Impact Hammer Type 8203)

Emnet sættes i swingninger vha en hammer (8.2), hvis hoved som nævnt er en lille krafttransducer, der er i stand til at registrere slagets kraft. Hammeren er egnet til frekvensanalyse for frekvenser op til 15 kHz. Se også datablad i bilag 5.

En registrering af hammerslagets kraft *samtidig* med at reaktionen måles vha et accelerometer, gør det muligt at normere reaktionen, således at signaler der stammer fra forskellige hammerslag kan sammenlignes. Se også kommentarer til Display Setup og Cursor Setup i afsnit 5.2.

3.2.3 Mikrofon (B&K Accelerometer Type 4393)

Som mikrofon (8.3) benyttes samme type accelerometer som omtalt i afsnit 3.1.3, dog er den væsentlig mindre og vejer blot 2.2 gram. Accelerometeret vil derfor ikke influere på resonansfrekvensen af de undersøgte emner. Accelerometeret har et arbejdsmønster fra 0 til 15 kHz. Se også datablad i bilag 5.

Accelerometeret orienteres som vist på figur 7 og placeres mest hensigtsmæssigt længst ude på den flade, man slår på med hammeren jf afsnit 3.1.3.

Om fastgøring af accelerometeret henvises til afsnit 3.1.3. Accelerometerets størrelse gør en fastholdelse vha bivoks eller lignende meget velegnet. Denne løsning er benyttet i Ph.D.projektet "Byggematerialers frost-bestandighed". Bivoks er dog ikke egnet til meget fugtige overflader.

3.2.4 Underlag for opstillingen

Der gælder fortsat at svingninger ikke må forplante sig til underlaget. Dette kan sikres ved en ophængning med elastikker (8.4), samt ved at benytte små stykker gummislange på de gribeklører der holder den stang, som elastikkerne hænges på.

Ved at fastgøre accelerometeret forskellige steder på stativet, samtidig med at man slår på emnet med hammeren, kontrolleres at stativet ikke influerer på resultatet.

Stativet (8.5) skal have en stor fod, så det står stabilt. Stativ og analysator bør anbringes på hver sit bord.

3.3 Supplerende opstillinger og udstyr

3.3.1 Varianter af opstillinger

Opstilling med frekvensgenerator (afsnit 3.1)

For at undgå en opstilling med elevatorbord og måleur, kan en krafttransducer kobles på vibratoren, således at tvangskræfternes størrelse registreres. Det vil da være muligt at normere signalet fra vibratoren med svaret fra mikrofonen (accelerometeret). Et eksempel på en sådan opstilling er vist i [Type 2010] p.10 og kræver supplerende udstyr i form af forstærkere mm, som LBM ikke råder over.

Opstilling med signalanalysator (afsnit 3.2)

Det er muligt at benytte en vibrator i forbindelse med analysatoren, idet denne har indbygget en svingningsgenerator. Benyttes LBMs Mini Shaker Type 4810 som vibrator, kræves en forstærker for at få tilstrækkeligt kraftige vibrationer. B&K Power Amplifier Type 2706 vil være egnet. Der skal fortsat kobles en krafttransducer på, hvis opstillingen med elevatorbord skal undgås.

Benyttes hammer eller vibrator med krafttransducer kan holderen med knivblade og små stykker skumgummi, som vist på figur 6, benyttes som et alternativ til ophængningen i elastikker, dog uden elevatorbord.

Som alternativ til den lille hammer har LBM indkøbt en større hammer (B&K Impact Hammer Type 8203), beregnet til måling på væsentlig større emner end omtalt i afsnit 3.1 og 3.2.

3.3.2 Complex Modulus Apparatus

Af andet udstyr, der kan benytte til frekvensanalyse råder LBM over et såkaldt Complex Modulus Apparatus (B&K Type 3930), i det følgende kaldet CPA. CPA består af en specielt udformet holder, der kan fastholde emnet og samtidig to transducere, der fungerer som vibrator henholdsvis mikrofon. Som vibrator benyttes en elektromagnetisk transducer, mens mikrofonen enten kan være en elektromagnetisk eller en kapacitiv transducer.

CPA kan benyttes sammen med såvel en frekvensgenerator som en signalanalysator. CPA er udviklet med særlig henblik på plastmaterialer og beskrives nærmere i [Type 3930]. Forsøg på LBM med måling på træ er rapporteret i [Rathkjen,84], [Laugesen,93] mfl. Aktuelt benyttes CPA sammen med signalanalysatoren til måling på træ i et Ph.D.projekt, [Morsing]².

3.3.3 Måling med Complex Modulus Apparatus

I en opstilling hvor CPA indgår benyttes ikke mekanisk, men elektromagnetisk påvirkning til at sætte emnet i svingninger. En sådan belastning sikrer, at transduceren ikke *selv* optager en del af signalet, ligesom den rent mekaniske belastning undgås, [Type 3930]. Til gengæld kræver det, at ikke-magnetiske materialer som fx beton og tegl skal pålimes små metalbrikker, hvilket komplicerer håndteringen af emnerne.

CPA er i følge [Type 3930] først og fremmest egnet til slanke emner med et maksimalt tværsnit på 12x12 mm. Larsen [1993] har dog målt på emner med et tværsnit på 6x40 mm. Kravet til emnets tværsnit gør, at CPA ikke er særlig egnet til detektering af frostskader i porøse materialer. Enten vil emnerne slet ikke kunne fryse i stykker [Fagerlund,73], jf størrelsen D_{KR} (tegl), eller også er emnerne ikke repræsentative for materialet (beton). D_{KR} betegner den maksimale tykkelse af et porøst materiale, der kan modstå frost, selv om alle porer er vandfyldte. Et andet problem i forbindelse med frostprøvning er, at de pålimede brikker fryser af, [Fagerlund,72].

De geometriske begrænsninger kan omgås ved at benytte de elektromagnetiske transducere i forbindelse med ophængning af emnet i tråde, men det kræver *fortsat* pålimning af metalbrikker. En sådan opstilling blev forsøgt benyttet i [de Place & Schmidt,89] uden særlig succes.

3.3.4 Andet udstyr

Sellevold & Radji [1975,1976] har benyttet en speciel opstilling, hvor måling er foregået på små bjælker af porøst Vycor glas vha elektromagnetiske transducere. Opstillingen er anbragt i en isoleret kasse, således at bestemmelse af resoansfrekvens og dæmpning kunne foregå under frysning/optøning. Desuden refereres til måling på cementpasta.

² Referencen er uden årstal, da der er tale om et igangværende projekt jf litteraturlisten.

4. Anvendelse af frekvensgenerator

I det følgende afsnit gives en gennemgang af, hvordan frekvensgeneratoren benyttes til bestemmelse af resonansfrekvens, herunder hvordan de forskellige komponenter tilsluttes, samt hvordan apparatets knapper skal indstilles.

I bilag 2 gives en mere detaljeret gennemgang af frekvensgeneratoren. Tekniske specifikationer findes i bilag 5. Se i øvrigt nærmere beskrivelse i [Type 2010] og [Type 4810].

4.1 Tilslutning af apparatur

På figur 9 er frekvensgeneratorens frontpanel gengivet med navnene på samtlige knapper, lamper mm. Henvisninger i teksten til denne figur sker ved at skrive navnene med store bogstaver (versaler). Henvisninger til figur 6 i afsnit 3.1 sker som hidtil.

Knapper mv på frekvensgeneratorens sidepaneler og bagpanel beskrives i afsnit 2.2-2.3 og 3.1-3.2 i [Type 2010]. Disse benyttes primært, når supplerende instrumenter skal tilsluttes samt i forbindelse med kalibrering og justering af frekvensgeneratoren.

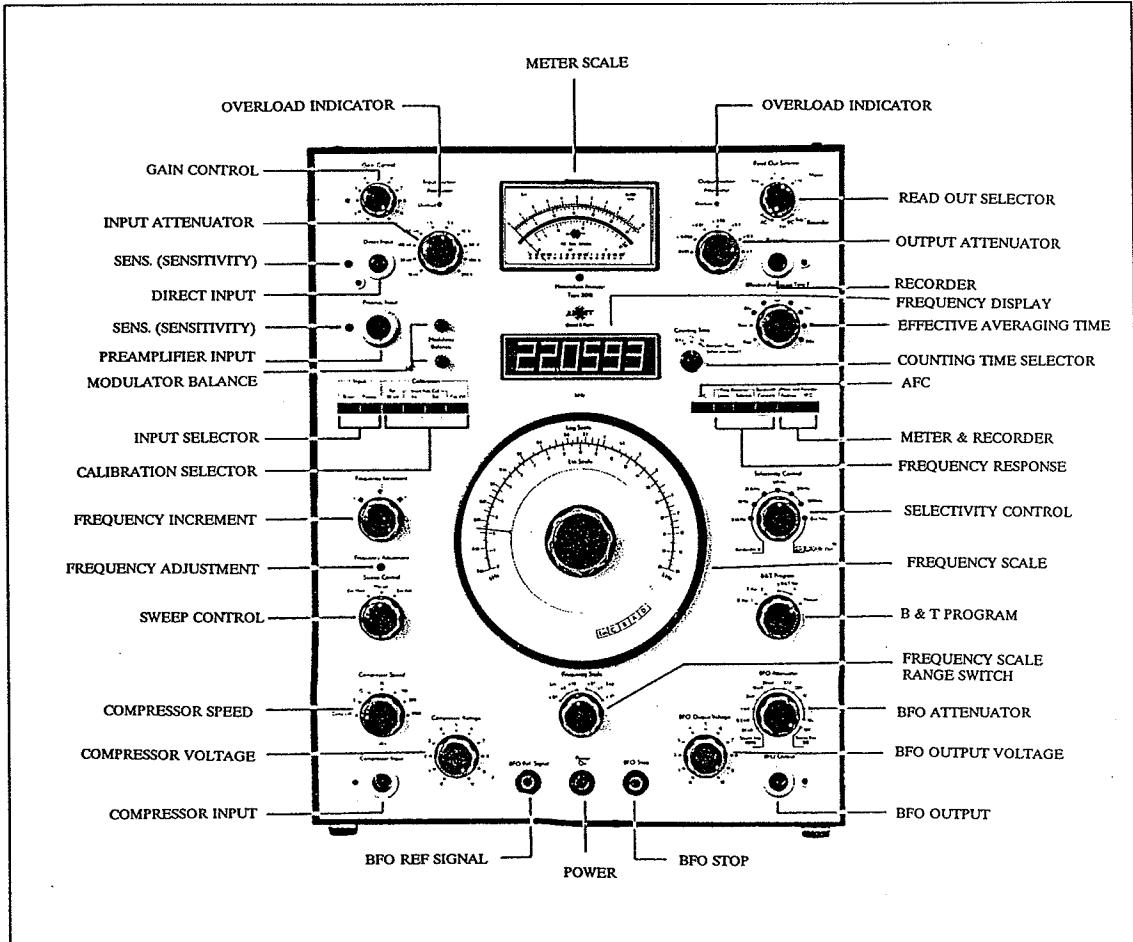
Accelerometeret (6.4) sluttes til frekvensgeneratoren (6.1) vha et koaksial-stik til indgangen DIRECT INPUT. Vibratoren (6.2) forbindes med samme slags stik til BFO OUTPUT.

Frekvensgeneratoren tændes nederst på frontpanelet (POWER). Normalt skal regnes med en opvarmningstid på 1 minut, dog længere hvis man stiller særlige krav til stabiliteten af apparaturet.

Supplerende apparatur

Bestemmelsen af resonansfrekvensen på frekvensgeneratoren kan suppleres ved at benytte et oscilloskop, der i så fald forbindes til RECORDER på frekvensgeneratoren med et tilsvarende stik. På oscilloskopet aflæses tydeligt, hvornår max amplitude (dvs resonansfrekvensen) fås, jf figur 10 afsnit 4.2.

I [Type 2010] afsnit 4-5 beskrives en stort antal muligheder for tilslutning af supplerende apparatur, hvoraf LBM dog kun råder over en begrænset del. Det ligger uden for denne rapport at komme nærmere ind på disse muligheder.



Figur 9. Frontpanel, frekvensgenerator.

4.2 Indkredsning af resonansfrekvens

De fleste af knapperne på frekvensgeneratorens frontpanel indstilles på forhånd og skal *ikke* justeres under forsøget. I tabel 1 listes disse knapper/indgange på frontpanelet, samt den benyttede indstilling i forbindelse med måling på 30x30x120 mm teglprismer. Se også bilag 2.

Når emnet (6.8) anbringes på knivbladene (6.6), skal man sørge for, at afstanden mellem disse er således, at understøtningen sker i knudepunkterne af hensyn til bestemmelsen af resonansfrekvensen. I praksis er en placering af understøtninger i femtedelspunkterne normalt tilstrækkelig nøjagtigt jf afsnit 2.2.2.

Accelerometeret (6.4) fastgøres til emnet som beskrevet i afsnit 3.1.3. Der etableres kontakt mellem vibrator og emne ved at stille på elevatorbordet (6.12). Ved hjælp af måleuret (6.9) og elevatorbordet (6.12) sikres det at tvangskræfterne reproduceres, jf afsnit 3.1.2.

Resonansfrekvensen indkredsses vha de knapper på frekvensgeneratoren der er listet i tabel 2. Frekvensen aflæses på FREQUENCY SCALE / FREQUENCY DISPLAY. Se også bilag 2.

Indstillingen af knapperne er også egnet hvis Complex Modulus Apparatus, afsnit 3.3, benyttes.

Tabel 1. Fast indstilling af knapper på frontpanel, når instrumentet benyttes til bestemmelse af resonansfrekvens.

Knap	Indstilling/bemærkninger
GAIN CONTROL	CAL
DIRECT INPUT	Mikrofon tilsluttet.
INPUT SELECTOR	DIRECT
CALIBRATION SELECTOR	OFF
SWEEP CONTROL	MANUAL
COMPRESSOR SPEED	OFF
BFO OUTPUT	Vibrator tilsluttet.
BFO OUTPUT VOLTAGE (Beat Frequency Oscillator)	Sættes så højt at man tydeligt kan høre det signal, der sendes ud.
BFO ATTENUATOR (findeler)	10 V, source imp. 5 Ω
B & T PROGRAM	MANUAL
SELECTIVITY CONTROL	100 Hz
FREQUENCY RESPONSE	SELECTIVE
METER & RECORDER	ANALYZER
AFC	ikke aktiveret
COUNTING TIME SELECTOR	"ude" (dvs ikke trykket ind)
EFFECTIVE AVERAGING TIME	FAST
RECORDER	evt tilslutning af oscilloskop
READ OUT SELECTOR	
- METER	LINEAR
- RECORDER	AC

Har man ingen fornemmelse af grundfrekvensens størrelse, bør man indledningsvis bestemme *samtlige* resonansfrekvenser over et stort (brede) interval af frekvenser. Det vil gøre det lettere, senere at vurdere, om man har fundet frem til grundfrekvensen eller en frekvens af højere orden. Alternativt kan man lade accelerometeret "vandre" hen over emnet for at checke hvilken af kurverne i figur 5, afsnit 2.2.1, amplituden følger.

Når kontakt mellem emne og vibrator er opnået, drejes på FREQUENCY SCALE, indtil det største udslag (amplitude) på METER SCALE findes. Hvis udslaget bliver så stort, at det ikke kan være på METER SCALE, ændres følsomheden ved at dreje INPUT ATTENUATOR *med* uret. Tilsvarende drejes *mod* uret, hvis udslag på METER SCALE er så små, at de ikke kan registreres. OUTPUT ATTENUATOR justeres kun, hvis det ikke er tilstrækkeligt at dreje på INPUT ATTENUATOR.

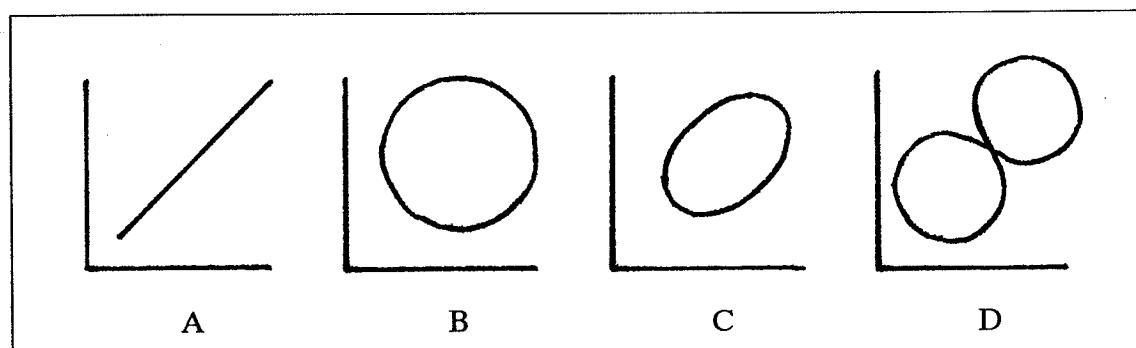
Målingen foretages et passende antal gange (fx fem). Det bedste er at fjerne accelerometeret efter hver måling og anbringe det igen. Det giver mulighed for at se, hvor stor en usikkerhed man skal regne med, når man sammenligner resonansfrekvens før og efter en påvirkning af emnet. Mærk evt op, hvor på emnet accelerometeret skal anbringes.

Tabel 2. Knapper på frontpanel, der kan justeres, når instrumentet benyttes til bestemmelse af resonansfrekvens.

Knap	Indstilling/bemærkninger
INPUT ATTENUATOR	Benyttes til justering af METER SCALE's følsomhed mht amplitudens størrelse.
OUTPUT ATTENUATOR	Stilles så højt som muligt, dog således at udslag på METER SCALE kan registreres.
OVERLOAD INDICATOR (for henholdsvis I.A. og O.A.)	Hvis lampen(erne) lyser, drejes I.A. henholdsvis O.A. en tak med uret.
FREQUENCY SCALE RANGE SWITCH	Valg mellem lineær og logaritmisk skala samt om aflæsning skal ske med en faktor 0.1, 1 eller 10.
FREQUENCY SCALE	Med denne knap styres den påtrykte frekvens. Denne kan desuden aflæses digitalt ovenover skalaen (FREQUENCY DISPLAY).
METER SCALE	Her aflæses størrelsen på mikrofonens "svar" (amplituden) i volt/dB.
FREQUENCY INCREMENT	Benyttes til finindstilling af frekvensen.

Supplerende apparatur

Ved at anvende et oscilloskop til sin opstilling, vil man med sikkerhed kunne konstatere, om man har fundet grundfrekvensen, idet der da vil aftegnes en ret linie, en cirkel eller en ellipse på skærmen (figur 10, A,B,C) mens frekvensen af første orden (figur 10,D) vil repræsenteres af et otte-tal. Man vil samtidig kunne sikre sig, at vibrator og emne svinger med samme frekvens, [Fagerlund,72], [Trudsø,78]. Oscilloskopet er kun benyttet meget lidt og omtales ikke yderligere.



Figur 10. Aftegning af resonansfrekvenser på oscilloskop. Figurens form viser, om grundfrekvensen (A,B,C) eller en frekvens af højere orden (D) er fundet.

5. Anvendelse af signalanalysator

I det følgende afsnit gives en gennemgang af, hvordan signalanalysatoren benyttes til bestemmelse af resonansfrekvens og dæmpning, herunder hvordan de forskellige komponenter tilsluttes, samt hvordan apparatets knapper skal indstilles.

I bilag 4 gives en mere detaljeret gennemgang af analysatorens tastatur og skærmbilleder.

Analysatoren er et "samlesæt" bestående af:

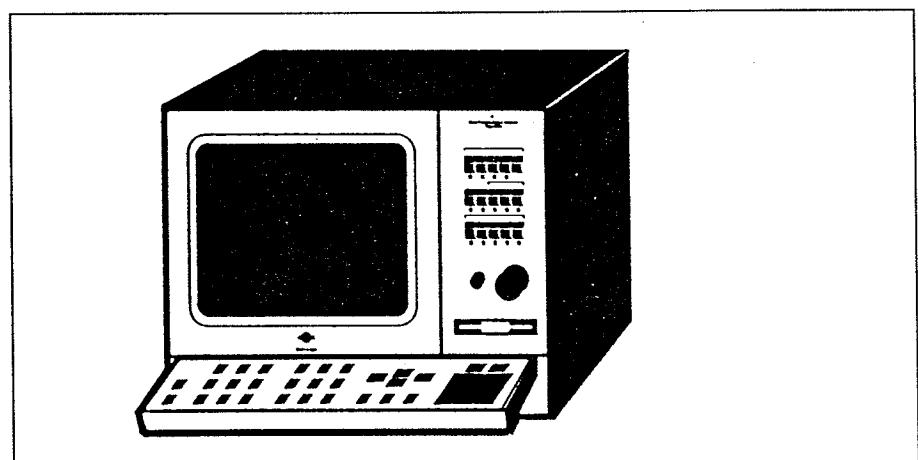
1 stk Signal Analyzer Unit Type 2035 - selve analysatoren - med en 12" skærm, et tastatur samt et disketteredrev for 3.5" disketter.

1 stk 100 kHz/Multichannel Zoom Processor Type 3157 - muliggør at der kan arbejdes med udsnit af frekvensspektret.

2 stk 100 kHz Input Module Type 3020 - med de nødvendige tilslutningsmuligheder for hammer, accelerometer o lign.

1 stk Generator & Sampling Module Type 3106 - kan generere forskellige former for svingninger.

Samtlige moduler er indbygget i kassen vist på figur 11.



Figur 11. Signalanalysator, B&K Type 2035.

I bilag 5 findes tekniske specifikationer på de forskellige dele. I øvrigt henvises til [B&K Manual,92].

Analysatoren har indbygget en lang række standardfunktioner og rummer desuden mange muligheder for at definere sine egne funktioner, såkaldte UDF, User Definable Functions. Der er også mulighed for at automatisere dele af sine målinger. For at gøre anvendelsen af analysatoren overskuelig er de mange indstillingsmuligheder delt op i en række menupunkter. Desuden har apparatet en indbygget on-line hjælp. Kun en meget begrænset del af analysatorens muligheder og funktioner beskrives i denne rapport, da projektet er et af de første på LBM, hvor udstyret benyttes.

Skærmopsætningen kan gemmes på en diskette. Dette er en stor hjælp hvis flere personer og/eller flere opstillinger er i gang sideløbende.

I [B&K Manual,92] vol 1, Guided Tour 1, beskrives teorien bag signalbehandlingen, der foregår ved en såkaldt Fast Fourier Transform. [B&K Manual,92] vol 1, kap 0 giver en kort gennemgang af analysatorens og opdelingen af tastatur og skærmbilleder. Uddybende gennemgang i vol 2, kap 4, 7, 8, 9, 49 og 50.

5.1 Tilslutning af apparatur

Ved brug af signalanalysator kan et emne kan bringes i svingninger på to måder: 1) ved at slå med en hammer, 2) ved at generere en på forhånd valgt svingningsform (fx en sinusbølge) vha analysatorens generator modul. Det genererede signal kan overføres til emnet via en vibrator eller en elektromagnetisk transducer. Sidstnævnte mulighed vil blive beskrevet nærmere i et andet Ph.D.projekt [Morsing].

Svingning igangsat vha hammer

Kabler til hammer og accelerometer er forsynet med ministik (B&K JP 0012), der kobles til analysatoren via medfølgende overgangsstik (B&K JP0162). Hammer kobles til kanal/indgang A (acc. input), accelerometer til kanal B (acc. input) i hver sit Input Modul.

Svingning vha genereret signal

Transducere og/eller vibrator kobles til direct input i kanal A & B samt til generator modulet jf [Morsing]. Overføres det genererede signal vha en vibrator kan en forforstærker være nødvendig som mellemled. Benyttes B&K Mini Shaker Type 4810 (afsnit 3.1.2) som vibrator, vil B&K Power Amplifier Type 2706 være egnet som forforstærker.

Dataopsamling

Dataopsamling kan ske på tre måder: 1) ved at aflæse direkte fra skærmen, 2) ved at gemme skærmbilleder på diskette til senere analyse, 3) ved at overføre data direkte til PC, der tilsluttes til analysatorens bagside med et 25 bens RS-232-C Interface.

I Ph.D.-projektet "Byggematerialers frostbestandighed" bringes emnet i svingninger vha en hammer som beskrevet i afsnit 4. Kun selve resonansfrekvensen og til en vis grad dæmpningen er bestemt og disse resultater aflæses direkte fra skærmen. Desuden er skærmbilleder er gemt på diskette i forbindelse med udarbejdelsen af denne rapport.

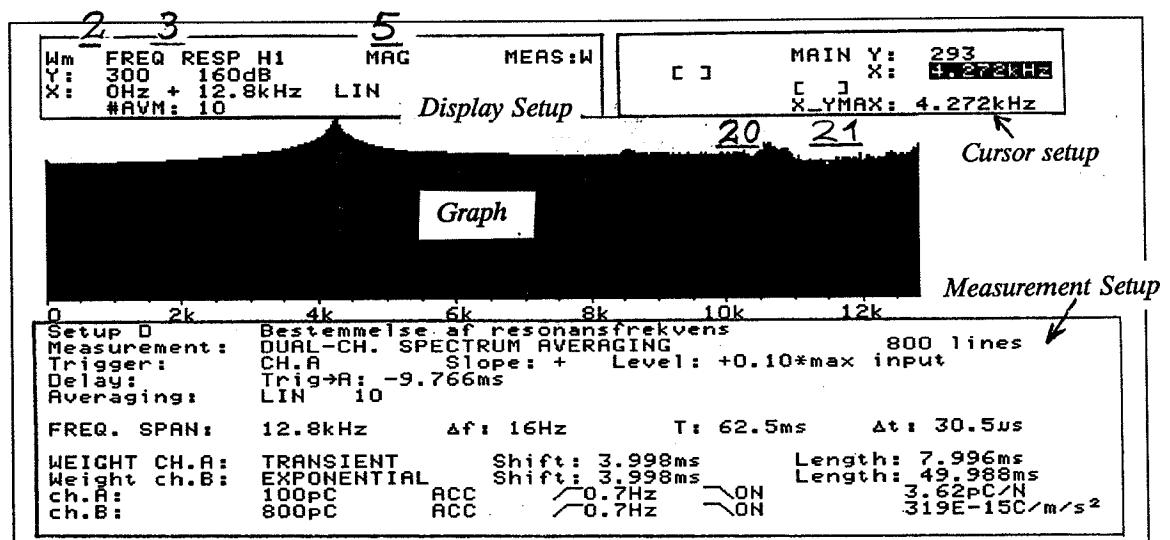
5.2 Bestemmelse af resonansfrekvens og indre dæmpning

Etablering af målesetup

I det følgende gennemgås skærmbilledet som det så ud i Ph.D.projektet "Byggematerialers frostbestandighed". Den benyttede indstilling er generelt anvendelig hvor resonansfrekvens eller dynamiske egenskaber

ønskes undersøgt ved at introducere bøjningssvingninger vha en hammer. For yderligere oplysninger, herunder oplysninger om de dele af skærmbilledet, der ikke nævnes her, henvises til bilag 4 og [B&K Manual,92].

Skærmbilledet opdeles i fire områder, som vist på figur 12. Øverste del af skærmbilledet består af *Display Setup* og *Cursor Setup*. Her vælges, hvordan man ønsker sine resultater vist på grafenmidt på skærmbilledet. Nederste halvdel af skærmbilledet indeholder *Measurement Setup*. Her defineres de parametre, der kontrollerer målingen.



Figur 12. Skærmbillede på signalanalysator ved bestemmelse af resonansfrekvens med angivelse af Display Setup, Cursor Setup, graf og Measurement Setup. Understregede numre henviser til efterfølgende forklaringer.

Display Setup og Cursor Setup

De vigtigste felter, angivet ved et understreget nummer, kommenteres nedenfor. For øvrige felter henvises til bilag 4.

2, 20: Felterne er tomme (standardindstilling). Det betyder, at man kan vælge mellem en række standardfunktioner i det efterfølgende felt (3, 21).

3: I dette felt angives hvordan resultaterne skal vises, dvs hvilken funktion y-værdierne på grafen skal repræsentere. Valget FREQ RESP betyder, at den acceleration, der registreres af accelerometeret normeres i forhold til hammerslagets styrke. Ved at benytte denne funktion tages højde for, at man ikke slår med samme kraft i hvert hammerslag, hvilket muliggør sammenligning af de enkelte slag, herunder en midling af fx 10 på hinanden følgende slag på samme emne.

5: valget MAG betyder, at størrelsen af det samlede signal (som er kompletst) vises. Alternativt kan fx den reelle del (REAL) eller den imaginære del af signalet (IMAG) vises.

21: valget X_Y MAX betyder, at man i dette felt direkte kan aflæse x-værdien hørende til den største top på kurven, dvs resonansfrekvensen. Det sker med en nøjagtighed, der er bestemt af hvor stort et frekvensspekter man studerer, samt hvor stor opløsning man har valgt (se tabel 3).

Measurement Setup

Hovedparten af felterne nævnes linie for linie fra venstre mod højre i tabel 3. Se i øvrigt bilag 4.

Tabel 3. Benyttet indstilling af Measurement Setup ved bestemmelse af resonansfrekvens.

Felt	Indstilling	Bemærkninger
Measurement	DUAL CH. SPECTRUM AVERAGING	Sammenhørende målinger i kanal A og B (generel frekvensanalyse).
Spectral lines ¹	800 lines	Højeste skærmopløsning.
Trigger	CH A	Hammer "udløser" signalet.
Slope	+	Svagere hammerslag end 0.1 gange max
Level ³	+ 0.10 * max input	input registreres ikke.
Delay, Trig → A	- 10 ms	Sætter målingens starttidspunkt i forhold til triggertidspunktet.
Delay, Ch A → B (skjult felt)	0 ms	Sætter tidspunktet for hvornår måling i kanal B skal begynde i forhold til kanal A.
Averaging (skjult felt)	LIN 10	Midling af 10 hammerslag.
(skjult felt)	AUTO	Automatisk midling.
(skjult felt)	REJECT overload	For kraftige hammerslag avises.
FREQ SPAN ¹	12.8 kHz	Valg af frekvensspekter der skal studeres.
Weight Ch A	TRANSIENT	Vægtning af hammerslag. Skal sikre at den relevante del af slaget studeres.
Shift (A)	4 ms	Starttidspunkt for vægtning.
Length (A)	8 ms	Varighed af vægtningen.
Weight Ch B	EXPONENTIAL	Skal sikre at den relevante del af reaktionen studeres.
Shift (B)	4 ms	som for A
Length (B)	50 ms	som for A
Ch A (Max Input) Ch B (Max Input) ³		Hammerslag med en kraft henholdsvis reaktion med en acceleration større end den valgte værdi aaves (overload).
Polarity A & B (skjulte felter) Input Source A & B	+	Signalet regnes positivt.
	ACC	Acc-indgang benyttes.
Transducer Setup ²	3.62 pC/N (A) 319E-15 C/m/s ² (B)	Følsomhed af hammer og accelerometer; indstilles i TRANSDUCER SETUP.
Generator (skjult linie)	DISABLED	Generator benyttes ikke.

1 Valget af frekvensspekter skal afpasses det aktuelle materiale. Jo smallere frekvensspekter og jo flere linier, desto større præcision bestemmes resonansfrekvensen med. Et smalt frekvensspekter giver til gengæld mindre overblik.

2 Se nærmere i bilag 3 under "Transducer Setup".

3 Se nærmere i bilag 3 under "Indstilling af følsomhed".

En korrekt "Delay"tid samt passende værdier for "Shift" og "Length" bestemmes ud fra en tidskurve for hammerslaget. Se under "Indstilling af Delay-tid og vægtningsfunktioner" i bilag 3.

I dette projekt bestemmes resonansfrekvensen ud fra en middelkurve for 10 hammerslag der alle tillægges samme vægt (jf LINeær midling).

Måling

Opstillingen etableres som vist i afsnit 3.2. Understøtningen (elastikkerne) behøver ikke at være anbragt præcist i knudepunkterne jf afsnit 2.2.2. Accelerometer og hammer sluttes til analysatoren.

Måling sættes i gang ved at trykke på <START>, hvorefter der slås 10 gange med hammeren midt på emnet. Resultatet ses direkte på skærmen, jf figur 12, hvor resonansfrekvensen kan aflæses.

Vises der konstant "overload in ch.A and ch.B" skal følsomheden justeres (se under "Indstilling af følsomhed" i bilag 3).

Bestemmelse af dæmpning

Dæmpning, udtrykt ved tabsvinklen δ , er i [de Place] ³ og [Ejsing,93] bestemt manuelt. Med cursoren "vandres" til frekvenser på grafen hvis amplitude er en bestemt brøkdel af resonansfrekvensens amplitude. Amplitudens størrelse aflæses øverst til højre på skærbilledet, ud for "Y:".

I [de Place] er formel (6), afsnit 2.1 benyttet ved måling på beton, mens Ejsing har benyttet

$$\delta = \frac{\pi}{\sqrt{n^2 - 1}} \frac{f_2 - f_1}{f_0} \quad (12)$$

med $n = 4$ ved måling på tegl. f_0 er resonansfrekvensen, f_1 og f_2 er frekvenser svarende til en amplitude på $1/\sqrt{2}$ af amplituden ved resonansfrekvensen jf figur 2, afsnit 2.1. δ benyttes i stedet for selve dæmpningen d , da ændringen og ikke den absolutte værdi er af interesse.

Ejsings erfaring er, at (12) gør det lettere at bestemme δ i situationer med meget spidse toppe på frekvenskurven, [Ejsing,93]. Han gør dog ikke nærmere rede for disse erfaringer. Ikke desto mindre er det uheldigt, at der ikke er benyttet samme udtryk i de to forsøgsserier for at få sammenlignelige erfaringer mht om måling af dæmpning er relevant i forbindelse med studier af nedbrydning som følge af frostpåvirkning eller lignende.

I et andet Ph.D.projekt på LBM studeres dæmpningen mere udførligt og bestemmes vha en "damping ratio"-funktion, der er indbygget i instrumentet, [Morsing] ³.

³ Referencen er uden årstal, da der henvises til et igangværende projekt jf litteraturlisten.

6. Resultatbehandling

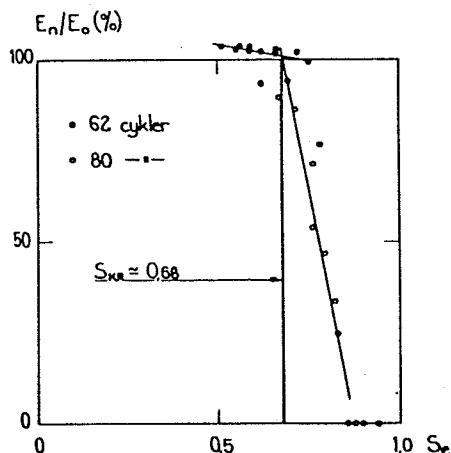
Resonansfrekvensen kan enten aflæses manuelt - på frekvensgeneratoren på skalaen FREQUENCY SCALE/FREQUENCY DISPLAY, på signalanalysatoren som et peak på frekvensresponskurven - eller for signalanalysatorens vedkommende overføres til en computer/diskette.

Der foretages målinger både før og efter prøvning (fx frost-tøbelastning). Ved langvarige forsøg kan det være relevant at bestemme f_e med passende mellemrum, fx efter hver 10. frost-tø-cyklus. Herefter bestemmes/skønnes $f_{e,n}/f_{e,0}$, hvorefter E_n/E_0 fås af formel (10), afsnit 2.3.

Dæmpning udtrykt ved tabsvinklen δ bestemmes ud fra (6), afsnit 2.1 ved at se på en frekvenskurve jf "Bestemmelse af dæmpning", afsnit 5.2. Dæmpning afdiges som δ eller $(\delta_n - \delta_0)/\delta_0$ jf afsnit 2.3.

Kritisk vandmætningsgrad

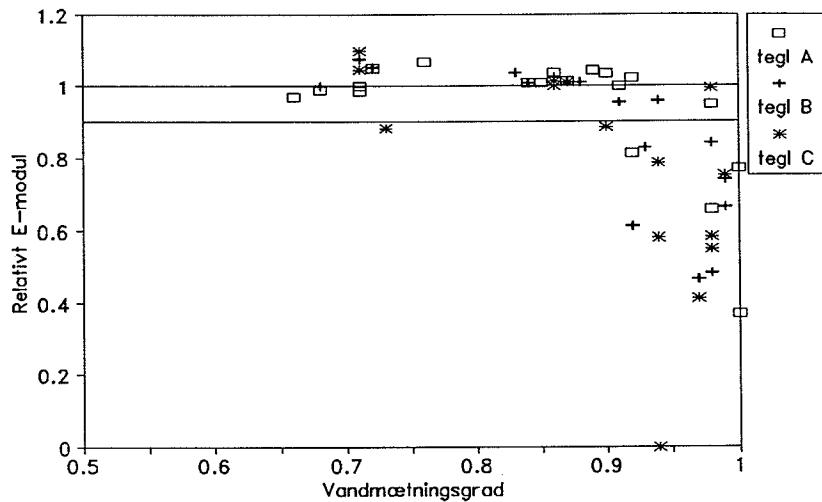
Resonansfrekvensbestemmelse i forbindelse med en frost-tø-påvirkning af emnerne kan benyttes til bestemmelse af den kritiske vandmætningsgrad (S_{KR} eller $S_{e,KR}$), der ikke må overskrides, hvis et porøst materiale skal være frostbestandigt. I så fald afdiges E_n/E_0 mod vandmætningsgraden (S eller S_e) af emnerne. Man kan da få en sammenhæng som vist i figur 13 og figur 14.



Figur 13. Relativt E-modul, bestemt ved måling af resonansfrekvens, som funktion af vandmætningsgrad (S_e), [Fagerlund,72]. Cementmørtel, w/c = 0,64.

På figur 14 er indtegnet en linie svarende til et relativt E-modul på 0,9, der i følge [Warris,64] kan benyttes som kriterium ved fastlæggelsen af den kritiske vandmætningsgrad.

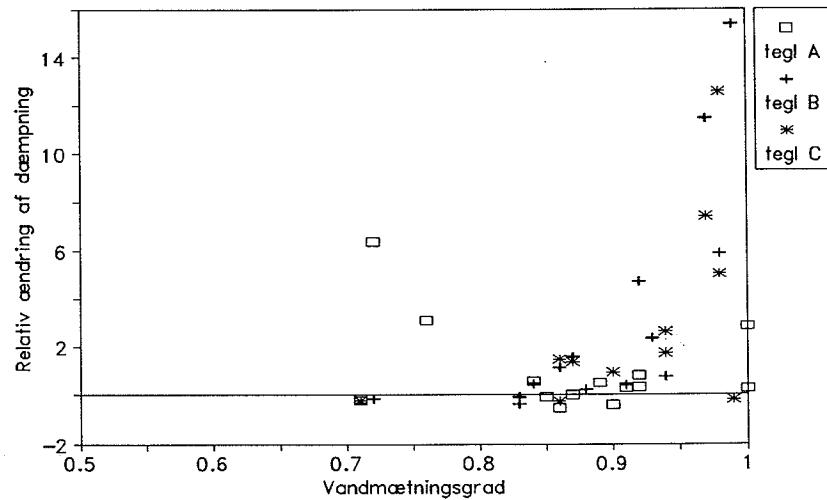
I figur 13 og 14 ses værdier for E_n/E_0 der er større end 100 % (1,0), men der ses også et tydeligt knæk på de to kurver. Fagerlund konstaterer på basis af egne forsøg [Fagerlund,72], at værdier over 100 % kan skyldes hydratisering, især hvis forsøget har strakt sig over flere uger eller længere. Selv for vandmætningsgrader på 60 % (0,6) kan hydratisering have betydning. Effekten vil dog være størst for cementbaserede materialer. Se også afsnit 7.



Figur 14. Relativ E-modul, bestemt ved måling af resonansfrekvens, som funktion af vandmætningsgrad. Tegl, data fra [Ejsing 93].

På tilsvarende måde kan den relative ændring af dæmpningen afbildes som funktion af vandmætningsgraden, som vist i figur 15. Figur 15 viser, med få undtagelser, ligeledes en sammenhæng mellem den målte størrelse (dæmpning) og vandmætningsgraden, således at en kritisk vandmætningsgrad kan bestemmes mere eller mindre præcist.

Sammenlignes figur 14 og figur 15 ses, at forløbet "knækker" ved omtrent samme værdi for vandmætningsgraden.



Figur 15. Relativ ændring af dæmpning som funktion af vandmætningsgrad. Tegl, data fra [Ejsing 93].

7. Diskussion af målemetoder

Et antal faktorer har betydning for, hvor pålidelig den bestemte resonansfrekvens er. Et centralt problem ved anvendelse af resonansfrekvenser til skadesdetektering ved frostprøvning er, hvorvidt det er nødvendigt at tørre emnerne ud inden måling.

Faktorer af betydning for resultatets nøjagtighed samt egne erfaringer med, hvor præcist resonansfrekvensen kan bestemmes diskuteres i dette afsnit. For hjælp i forbindelse med egentlig fejlhåndtering af udstyr samt forkert indstilling af apparatur henvises til bilag 2 og 4 samt afsnit 3-5.

Mikrofonplacering

Forkert placering af mikrofonen (accelerometeret) er ikke en egentlig fejl, men kan være årsag til usikker bestemmelse af f_e (mindre udslag), jf afsnit 2.2.1 og 3.1.3. Mikrofonplaceringen *kan* dog få betydning pga revnemønstret (se efterfølgende).

Revnemønstret i materialet

To tilsyneladende ens emner kan give vidt forskellige resultater afhængig af, hvor eventuelle skader opstår. Et emne, der får en revne eller en afskalning i et hjørne vil få en forholdsvis lille mindskning af stivheden, sammenlignet med et emne, der får en revne midt igennem. På den måde vil der ske en fejlprioritering af emnerne. For at imødegå denne usikkerhed er det nødvendigt at arbejde med flere emner der "belastes" på samme måde - fx testes for frostbestandighed med samme vandmætningsgrad.

Fugt (måling på våde og tørre emner)

Fugtindholdet influerer på E_{DYN} og dermed på f_e . Fagerlund [1972] har undersøgt sammenhængen mellem vandmætningsgrad (S) og resonansfrekvens (f_e). Teoretisk set bør f_e aftage med stigende S , idet emnet bliver tungere. Følgende udtryk kan udledes

$$\left(\frac{f_e}{f_{e,d}}\right)^2 = \frac{1}{1 + S_e \frac{P \cdot 1000}{\rho_d}} \quad (13)$$

P er porøsiteten, ρ_d er tørdensiteten, $f_{e,d}$ er resonansfrekvensen for tørt materiale. Der er god overensstemmelse med eksperimentelle resultater. Man skulle derfor kunne korrigere for et fugttab vha (13).

Arbejdes med forseglede prøver vil fugttabet være så lille, at det ingen betydning får for f_e .

Det diskuteres, om det er nødvendigt at måle på tørre emner i stedet for at måle på emner med det fugtindhold, de frostprøves med. Fugtens tilstedeværelse *kan* betyde, at eventuelle revner kun vanskeligt detekteres, idet apparaturet har vanskeligere ved at skelne mellem det uskadte fast-

1. Hvorfor benytte ikke-destruktiv prøvning ?

Der er i tidens løb udfoldet store bestræbelser for at udvikle metoder til in-situ, ikke-destruktiv prøvning af fx beton og i dag findes et meget stort antal metoder til mange forskellige formål, [Malhotra,84], [CRC Handbook,91], [Teodoru & Mommens,91]. Sådanne metoder udvikles for at kunne bestemme styrken og holdbarheden af beton i en virkelig konstruktion, ofte hvor initialværdier af fx trykstyrke ikke findes. Et argument mod at benytte styrkebestemmelse i laboratorieforsøg er, at der er tale om en destruktiv prøvning og at det derfor er nødvendigt at belaste til brud for at få de nødvendige oplysninger. Hvis man fx vil benytte styrkebestemmelse til at følge frostnedbrydning af beton, kræves et stort antal emner og meget arbejde, ligesom måleresultaterne vil udvise en forholdsvis stor spredning pga betonens inhomogenitet.

Benyttes ikke-destruktiv prøvning til laboratorieforsøg kan man ofte benytte forholdsvis få emner, idet det enkelte emne kan "genbruges". Det har desuden den fordel, at man kan følge det *enkelte* emnes udvikling, hvilket specielt for et materiale som beton er vigtigt. Det er også muligt at lave målinger in-situ vha ikke-destruktive metoder. På den måde kan man tage hensyn til bla den aktuelle efterbehandlings betydning for kvaliteten af den udstøbte beton, hvilket ikke er muligt ved bestemmelse af trykstyrke i laboratoriet.

Der skelnes i dag mellem semidestruktive og ikke-destruktive metoder. Førstnævnte resulterer i en lokal beskadigelse af overfladen, dog således at metoderne kan opfattes som ikke-destruktive i forhold til hele konstruktionen, mens sidstnævnte er "ægte" ikke-destruktive metoder.

Uanset hvilken form for prøvning man benytter, det være sig destruktiv eller ikke-destruktiv, er det vigtigt at holde sig for øje, at der er tale om *stikprøvemåling*. Resultatet af en betonprøvning vil således afhænge af betonens sammensætning og alder, fugtforholdene, placering af eventuel armering etc. Ikke-destruktiv prøvning er derfor først og fremmest egnet til sammenlignende målinger. Det kan være undersøgelser af materialets homogenitet eller undersøgelse af ændring af materialeegenskaber, fx som følge af frost-tø-blastning.

1.1 *Semi-destruktiv prøvning*

Et eksempel på en semidestruktiv in-situ-metode er den dansk udviklede LOK-test; en såkaldt "udtræksprøvning". Små stålankre indstøbes i betonen og trækkes ud, når betonen er hærdnet. Udtræksstyrken benyttes til at vurdere trykstyrken. En variant af denne metode er den såkaldte CAPO-test, hvor man i stedet for at indstøbe ankre i betonen fræser et hul og monterer ankeret i den hærdnede beton. Man behøver således ikke at planlægge omfanget af sådanne prøvninger inden betonen støbes ud, ligesom ældre konstruktioner kan undersøges.

1.2 Måling af ultralydhastighed

Mange metoder til ikke-destruktiv prøvning bygger på måling af egenskaber vha hvilke man indirekte kan foretage skøn over trykstyrke, E-modul eller et andet mål for holdbarhed.

Et meget kendt og brugt eksempel på dette er måling af ultralydhastighed, som det fx er beskrevet i [ASTM C597] og [DS 423.33]. Ultralydmåling er baseret på, at der sendes kortvarige, højfrekventelydimpulser gennem materialet fra en sender til en modtager. Afhængig af materiale-sammensætning mv vil signalet nå gennem emnet med en bestemt hastighed (c), som derfor i mange sammenhænge kan benyttes til at skønne det dynamiske E-modul (E_{DYN}) jf (1), [Timoshenko,34], [Love,27].

$$c = \sqrt{\frac{E_{DYN}}{\rho} \frac{1-v}{(1+v)(1-2v)}} \quad (1)$$

v er Poissons forhold, ρ er densiteten af materialet. For at bestemme E_{DYN} vha (1) kræves kendskab til de aktuelle værdier af v og ρ . I lange, tynde konstruktioner kan der ses bort fra v . I så fald kan (2) anvendes.

$$\frac{E_{DYN,n}}{E_{DYN,0}} = \left(\frac{c_n}{c_0}\right)^2 \quad (2)$$

Indices 0 og n refererer til referencemåling henholdsvis måling efter en given påvirkning, fx n frost-tø-cykler. Dog skal det bemærkes, at en halvering af v for ikke-frostbestandig beton som følge af materialets nedbrydning er observeret [Trudsø,58A]. Det er derfor forbundet med en vis usikkerhed at benytte et udtryk af typen (2) til at vurdere ændringer i materialets E-modul som følge af frost-tø-påvirkning.

1.3 Bestemmelse af resonansfrekvens

En anden metode, der især er brugt ved laboratorieundersøgelser, er bestemmelsen af resonansfrekvensen, som denne rapport handler om. Både Trudsø [1958A] og Warris [1964] viser, at resonansfrekvens er en mere følsom metode end ultralydmåling, når det gælder indikering af frostskader.

Resonansfrekvens har været anvendt til bestemmelse af dynamisk E-modul siden midten af 1930'erne jf [Powers,38]. Powers arbejdede videre med princippet og udviklede en simpel, hurtig metode, hvor han slog på materialet med en hammer og sammenlignede lyden med toner fra forskellige stemmegafler. Resonansfrekvensen skulle på denne måde kunne bestemmes med en usikkerhed på 2-3 %. Denne trods alt meget subjektive metode blev grundlaget for arbejder af Hornibrook [1939], Thomson [1940], Obert & Duvall [1941], Stanton [1944] mfl, der alle satte materialet i svingninger vha en vibrator. Selv om bestemmelse af resonansfrekvens således har mange år på bagen, har metoden ikke været benyttet så meget uden for laboratoriet som fx ultralyd har. Det skyldes

stof og revner, der er mere eller mindre vandfyldte. Desuden kan man risikere, at vandet ikke er fordelt på samme måde før og efter frost-tø-prøvning, således at resonansfrekvensen påvirkes.

Problemet ved at benytte tørre emner er, at det ikke er muligt at genskabe det enkelte emnes fugttilstand efter en tørring og dermed muliggøre flere målinger på emnet i våd tilstand. Det gælder uanset om der er tale om grov- eller finporøse materialer. Konsekvensen af at benytte tørre emner er derfor, at materialebehovet øges, da det enkelte emne kun kan benyttes én gang, udover referencemålingen.

Herved forsvinder én af fordelene ved at benytte en ikke-destruktiv metode fremfor en semi-destruktiv eller en destruktiv metode, nemlig et mindsket materialeforbrug.

Egne erfaringer med måling på våde og tørre emner

Egne erfaringer med våde kontra tørre emner er noget modstridende. Målinger på danske tegl i våd tilstand viser ofte store spredninger på aflæsningerne af f_e både før og efter prøvning, [de Place & Schmidt,89]. Kun i ganske få tilfælde var forskellen mellem $f_{e,0}$ og $f_{e,n}$ tilstrækkelig tydelig til, at en mindskning af f_e og dermed E_{DYN} kunne konstateres.

Til disse forsøg er frekvensgeneratoren (afsnit 3) benyttet. Desuden blev mikrofonen placeret modsat vibratoren jf figur 6, hvilket ikke er den optimale placering for bestemmelse af resonansfrekvenser.

IPh.D.projektet "Byggematerialers frostbestandighed" er målt på beton i såvel våd som tør tilstand. I begge tilfælde kan resonansfrekvensen bestemmes ret præcist. Sammenhænge som vist i figur 14 kan fås, dog er knækket på kurven mere markant ved målinger på tørre emner.

Den tilsyneladende modstrid mellem erfaringerne fra de to projekter kan skyldes, at opstillingen beskrevet i afsnit 4 gør bestemmelsen af resonansfrekvensen mere præcis end opstillingen beskrevet i afsnit 3. Signalanalysatoren gør bestemmelsen af resonansfrekvensen mere overskuelig, ligesom brugen af et mindre accelerometer og en anden måde at påvirke emnet på, kan have betydning.

Hydratisering

For cementbaserede materialer kan hydratiseringen spille ind på E-modulet, [Fagerlund,72], afhængigt af materialets alder. E_{DYN} og dermed f_e øges som følge af hydratiseringen. Det betyder, at (13) ikke kan benyttes uden videre.

Således viser egne målinger på beton gennemgående *højere* værdier af f_e for emner i opfugtet tilstand i forhold til de samme emner efter udtørring, under i øvrigt sammenlignelige forhold.

Også for tegl kan man ved høje vandmætningsgrader ($S > 0.80$) opleve, at f_e vokser, uden at der er fundet en tilbundsgående forklaring. Det viser sig dog, at man også for tegl kan tale om en form for hydratisering, [Sandford,70]. "Friske" flader er mere aktive mht krystallisation end "gamle" flader, der er dækket af en tynd vandfilm, som forsinker frysningen pga større underafkøling.

Fordele/ulemper ved måleudstyr

Det er tidligere nævnt, at signalanalysatoren gør bestemmelsen af resonansfrekvenser mere overskuelig, ikke mindst fordi resultatet vises som en kurve, hvor man direkte kan aflæse resonansfrekvensen. Desuden er målingen mindre tidskrævende sammenlignet med måling med frekvensgenerator, hvor man skal dreje sig frem til resonansfrekvensen.

Mindre komponenter (hammer og accelerometer) bevirket desuden, at mindre emner kan benyttes. Derved opnås en materialebesparelse og en lettelse i prøvehåndtering. I relation til bestemmelse af den kritiske vandmætningsgrad har prøvestørrelsen særlig betydning, idet mindre prøver gør det lettere at undgå store temperaturforskelle og dermed undgå at vandet flyttes rundt i prøven under forsøget.

[Gaidis & Rosenberg,86] fremhæver de samme fordele ved brug af signalanalysator, dvs hurtigere resultater og mulighed for at arbejde med mindre prøver, men konstaterer også, at der er en væsentlig forskel i anskaffelsessum i forhold til frekvensgeneratoren.

8. Symboliste

A	amplitude (figur 2)	
D_{KR}	kritisk tykkelse	[mm]
	Emner med en tykkelse mindre end D_{KR} kan ikke fryse i stykker uanset vandmætningsgraden.	
E	(statisk) elasticitetsmodul	[GPa]
E_{DYN}	dynamisk elasticitetsmodul; den reelle del af det komplekse E-modul.	
E^*	komplekst E-modul jf formel (4): $E^* = E' + E'' = E'(1+jd)$	
E'	den reelle del af E^* , dvs det elastiske modul	
E''	den imaginære del af E^* , også kaldet dæmpningsmodulet	
K_n	konstant, der benyttes til at beskrive sammenhængen mellem resonansfrekvenser ved forskellige svingningsmodi for emner udsat for bøjningssvingninger, jf formel (7).	
P	porositet	[m ³ /m ³]
S	vandmætningsgrad. Angiver hvor stor en del af et porevolumen, der er vandfyldt.	
S_{KR}	kritisk vandmætningsgrad. Må ikke overskrides i materialets levetid, hvis dette skal kunne regnes for frostbestandigt.	
S_e	vandmætningsgrad, hvor kun fordampeligt vand medregnes (figur 3, figur 13)	
$S_{e,KR}$	kritisk vandmætningsgrad for fordampeligt vand (figur 3)	
c	ultralydhastighed	[m/s]
d	materialets dæmpning, formel (5)	
f_e, f_0	resonansfrekvens	[Hz]
$f_{e,d}$	resonansfrekvens for et tørt emne	
f_1, f_2	frekvenser, der indgår i bestemmelsen af materialets dæmpning, figur 2.	
f_n, f_{n+1}	resonansfrekvens i n'te henholdsvis n+1'te "mode", formel (7)	
j	den imaginære enhed i en kompleks størrelse jf formel (4)	
k	konstant, der indgår i formel (8): $E_{DYN} = k w f_e^2$ k afhænger af: - emnets geometri - svingningsmåden (bøjnings-, vridnings- eller længdesvingninger) - svingningens "mode". Grundfrekvens eller frekvens af højere orden, jf figur 5. - Poissons forhold, ν	
	Sidstnævnte kendes ikke altid og er for betons vedkommende afhængig af alder, sammensætning mv, hvilket giver en usikkerhed på bestemmelsen af E . Usikkerheden kan få betydning ved bestemmelse af E_{DYN} i forbindelse med frostnedbrydning, men er generelt af begrænset betydning, [Trudsø,58A].	

Symboliste

k defineres nærmere i [ASTM C215], [Pickett,45] mfl. Pickett opstiller tabeller og grafer, hvori k kan aflæses direkte for nærmere definerede emner og forudsætninger.

- k_1 konstant, der udtrykker E-modulets afhængighed af vægtændring jf formel (9).
 k_2 konstant, der udtrykker E-modulets afhængighed af længdeændring jf formel (9).
 k_3 konstant, der udtrykker at ekspansionen først giver anledning til mindskning af E-modulet, når brudtøjningen det pågældende sted overskrides jf formel (9).
Både k_2 og k_3 er afhængig af pastainholdet i beton, [Warris,64].

l	længde	[mm]
w	vægt	[kg]
w/c	vand-cement-forhold	
δ	tabsvinkel, formel (5)-(6). Tabsvinklen kaldes også logaritmisk dekrement.	
ε	tøjning, relativ længdeændring	
ν	Poisson's forhold	
ρ	densitet	[kg/m ³]
ρ_d	tørdensitet	[kg/m ³]
σ	spænding	[MPa]

Indices

Hvor ikke andet er angivet har indices følgende betydning

- 0 referencemåling / referencetilstand
 n måling / tilstand efter n påvirkninger, fx n frost-tø-cykler

9. Litteraturliste

ASTM C215: *Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal and Torsional Frequencies of Concrete Specimens. ASTM C 215-91.* Annual book of ASTM Standards, vol.04.02. American Society for Testing and Materials, dec 1991.

ASTM C597: *Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete. ASTM C 597-83.* Annual book of ASTM standards, vol.04.02. American Society of Testing and Materials, dec 1983.

Bergström, S.G.: *Frysforsök med cementbruk.* Bulletin 32. Swedish Cement and Concrete Research Institute. Stockholm 1955.

Brandt E.: Skriftlig kommunikation, dec 1993.

Cheng C. & Sansalone M.: *The impact-echo response of concrete plates containing delaminations: numerical, experimental and field studies.* Materials and Structures, vol.26, no.159, pp.274-285, june 1993.

Christaras B., Auger F. & Mosse E.: *Determination of the elasticity of rocks. Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods with direct static methods.* Materials and Structures, vol.27, no.168, pp.222-228, may 1994.

CRC Handbook: *CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete.* (V.M.Malhotra, N.J.Carino: editors). CRCPress, Boca Raton, Ann Arbor, Boston, 1991.

DS 423.33: *Betonprøvning. Hærdnet beton. Ultralydhastighed.* DS 423.33. Dansk Standardiseringsråd. 1.udgave, marts 1984.

Døssing O.: *Structural testing. Part 1. Mechanical mobility measurements.* Brüel & Kjær, Nærum, Denmark. Revision april 1988.

Fagerlund G.: *Kritiska vattenmättnadsgrader i samband med frysning av porösa och spröda material.* Thesis. Rapport 34, Inst f Byggnadsteknik, Lunds Tekniska Högskola. Lund 1972.

Fagerlund G.: *Significance of critical degrees of saturation at freezing of porous and brittle materials.* Rapport 40, Inst f Byggnadsteknik, Lunds Tekniska Högskola. Lund 1973. Also: ACI SP-47, pp.13-65, 1975.

Fagerlund G.: *The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete.* CBIra 6:77, Cement och Betong Institutet. Stockholm 1977. Also: Materials and Structures, vol.10, no.58, pp.217-253, 1977.

$$\frac{E_n}{E_0} = \frac{f_{e,n}^2}{f_{e,0}^2} \quad (10)$$

Indices 0 og n refererer til referencemåling henholdsvis måling efter en given påvirkning, fx n frost-tø-cykler. Ved at arbejde med forseglede emner kan vægttab som følge af fordampning af vand minimeres, [Fagerlund,72]. (10) vil da kunne benyttes til at udtrykke skadesgraden som en reduktion af det dynamiske E-modul.

Vægttab som følge af afskalning *kan* betyde, at (10) må benyttes med en vis usikkerhed jf ovenfor. Fagerlund [1972] foreslår, at man benytter

$$\frac{E_n}{E_0} = \frac{f_{e,n}^2}{f_{e,0}^2} \frac{w_n}{w_0} \quad (11)$$

med en forudsætning om, at afskalning sker jævnt over hele fladen.¹

I principippet betyder enhver mindskning af E_{DYN} , at materialet er skadet, men da bestemmelsen af E_{DYN} trods alt er forbundet med en vis usikkerhed, må en mindskning med 5-10 % kunne accepteres uden at materialet kasseres. Warris [1964] konkluderer på den baggrund, at indre skader ikke vil kunne afsløres, før de har nået en størrelse svarende til en mindskning af E_{DYN} med 10 %. Warris konstaterer samtidig, at det er vanskeligt at sætte en generel grænse, idet en mindskning med 10 % vil have forskellig betydning for materialets indre sammenhæng. Dette gælder således for betoner med forskelligt pastaindhold, idet indre skader (revnedannelse) normalt opstår i pastaen.

Dæmpning forholder sig på en anden måde til E_{DYN} end resonansfrekvensen gør, jf (5) og (6), afsnit 2.1. Det bevirket, at man ikke kan opstille udtryk af typen (10) for at vurdere skadesgraden. Man kan heller ikke sætte et krav for, hvor stor dæmpning eller ændring af denne, der kan accepteres før materialet kan siges at være skadet.

I stedet kan man afbilde $(f_2-f_1)/f_0$ som vist på figur 3 eller $(\delta_n-\delta_0)/\delta_0$, hvor δ er tabsvinklen jf (6). Sidstnævnte udtryk har den fordel, at det er en normeret størrelse, hvilket gør det lettere at sammenligne resultater for forskellige materialer. Udtrykket benyttes i Ph.D.projektet "Byggematerialers frostbestandighed".

Eksempler på anvendelse af resonansfrekvens og dæmpning til skades-dtektering er vist i afsnit 6.

¹ Fagerlund skriver ganske vist w_0/w_n , men det må være en fejl, idet et vægttab netop vil undervurdere ændringen i E-modulet, hvis der ikke tages højde for det.

Gaidis, J.M. & Rosenberg M.: *New test for determining fundamental frequencies of concrete.* Cement and Concrete Aggregates, vol.8, no.2, pp.117-119, 1986.

Hornibrook, F.B.: *Application of sonic method to freezing and thawing studies of concrete.* ASTM Bulletin no.101, p.5ff, dec 1939.

Jehrbo Jensen, J.Kr.: *Resonansfrekvensmålinger på beton.* Inst f Bygningsteknik, Aalborg Universitetscenter. Aalborg 1985.

Klieger P.: *Studies of the effect of entrained air on the strength and durability of concretes made with various maximum sizes of aggregate.* Proceedings of the Highway Research Board, vol.31, pp.177-201, 1952.

Larsen, E.S.: Skriftlig kommunikation, dec 1993.

Love, A.E.H.: *Mathematical theory of elasticity.* 4th Edition, Cambridge Univ. Press. London 1927.

Malhotra, V.M.: *In situ/Non-destructive testing of concrete - A global review.* ACI SP-82, pp.1-16. American Concrete Institute. Detroit 1984.

Malhotra, V.M. & Sivasundram V.: *Resonant frequency methods.* pp.147-168 in: CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete. (V.M.Malhotra, N.J.Carino: editors). CRCPress, Boca Raton, Ann Arbor, Boston, 1991.

Obert L. & Duvall, W.I.: *Discussion of Dynamic Methods of Testing Concrete with Suggestions for Standardization.* Proc. ASTM, vol.41, pp.1053-1071, 1941.

Pickett G.: *Equations for Computing Elastic Constants from Flexural and Torsional Resonant Frequencies of Vibration of Prisms and Cylinders.* PCA Bulletin no. 7, Chicago 1945. Reprint from Proc.ASTM, vol.45, Philadelphia, 1945.

Powers, T.C.: *Measuring Young's Modulus of Elasticity by means of Sonic Vibrations.* Proc. ASTM, vol.38, part II, pp.460-469, 1938.

Pratt D. & Sansalone M.: *Impact-Echo signal interpretation using artificial intelligence.* ACI Mat. Journal, vol.89, no.2, pp.178-187, march-apr 1992.

Sandford F.: *Supercooling of water in the pore system of bricks.* CTH-handlingar 330, Chalmers Tekniska Högskola. Göteborg 1970.

Sansalone M. & Carino, N.J.: *Detecting delaminations in concrete slabs with and without overlays using the Impact-Echo method.* ACI Mat. Journal, vol.86, no.2, pp.175-184, march-apr 1989.

Schlägel A.: *Measurements of modulus of elasticity and loss factor for solid materials.* pp.1-11 in: Complex modulus of Elasticity. Technical Review. Teletechnical, Acoustical and Vibrational Research. Brüel & Kjær, no.4, oct 1957. Reprint oct 1960.

Sellevold, E.J. & Radjy F.: *Dynamic mechanical response of water adsorbing microporous materials at low temperature.* pp.50-55 i Materialnyt 2:1975. Dansk Selskab for Materialprøvning og -forskning. Kbh. 1975.

Sellevold, E.J. & Radjy F.: *Low temperature dynamic response of Vycor glass as a function of moisture content.* Journal of Materials Science, vol.11, pp.1927-1938, 1976.

Stanton, T.E.: *Tests comparing the modulus of elasticity of portland cement concrete as determined by the dynamic (sonic) and compression (secant at 1000 psi) methods.* ASTM Bulletin no.131, p.17ff, dec 1944.

Teodoru, G.Y.M. & Mommens A.: *Non-destructive testing in the quality control of buildings: why, what and how?* pp.367-376 in: Quality control of concrete structures. Proc. 2nd Int. Symp. 12-14/6 1991, Gent, Bruxelles. London, E & FN Spon, 1991 (L.Taerwe, H.Lambotte: editors).

Thomson, W.T.: *Measuring changes in physical properties of concrete by the dynamic method.* Proc. ASTM, vol.40, p.1113ff, 1940.

Timoshenko S.: *Theory of elasticity.* McGraw-Hill Book Co, Inc. New York, N.Y., 1934.

Trudsø E.: *Experiments on Concrete Bars. Freezing and thawing tests.* Committee on Alkali Reactions in Concrete. Progress Report K2. The Danish National Institute of Building Research and the Academy of Technical Sciences. Copenhagen 1958.

Trudsø E.: *Lydtekniske metoder anvendt på byggematerialer.* Ingeniøren årgang 67, nr.2, pp.73-80, 1958. SBI særtryk no.93. Kbh. 1958.

Trudsø E.: *Betonkvalitet målt ved resonansfrekvens.* pp.23-37 i : Prøvningsmetoder for beton. Indlæg på møde 1.3.1978. Publikation 4:1978, Dansk Betonforening, København, nov 1978.

Vinkeloe R.: *Prüfverfahren zur Ermittlung des dynamischen Elastizitätsmoduls von Betonprismen.* Tonindustrie Zeitung, vol.86, heft 10, pp.272-276, 1962.

Warris B.: *The influence of air-entrainment on the frost resistance of concrete. Part B: Hypothesis and freezing experiments.* Proceedings no.36, Svenska Forskningsinstitutet för cement och betong vid Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm (CBI). Stockholm 1964.

Projekter hvor LBMs resonansfrekvensudstyr er benyttet:

Ejsing S.: *Frostbestandighed. Eksperimentel bestemmelse af kritisk vandmætningsgrad for porøse bygningsmaterialer.* Eksamensprojekt. LBM, DTH, forår 1993. (Signalanalysator og hammer)

Laugesen C.: *Træs fugtafhængige krybning.* Eksamensprojekt. LBM, DTH, forår 1993. (Frekvensgenerator og Complex Modulus Apparatus)

Olsen M.: *Flyveaske cementmørtlers egenskaber.* Eksamensprojekt. LBM, DTH, juli 1977. (Frekvensgenerator og Complex Modulus Apparatus)

de Place Hansen, E. & Schmidt, L.: *Tegls frostbestandighed.* Teknisk Rapport 203/89, LBM, DTH, feb 1990. (Frekvensgenerator og vibrator)

Rathkjen L.: *Træs rheologi - en undersøgelse af Clousers krybningsfunktion ved alternative forsøgsmetoder.* Eksamensprojekt. LBM, DTH, efterår 1984. (Frekvensgenerator og Complex Modulus Apparatus)

Sellevold, E.J.; Radjy F.; Hoffmeyer P. & Bach L.: *Low temperature internal friction and dynamic modulus for beach wood.* Wood and Fiber, vol.7, no.3, fall 1975. (Frekvensgenerator og Complex Modulus Apparatus)

se også [Sellevold & Radjy, 76]

Desuden benyttes det i forbindelse med følgende igangværende projekter:

Ernst de Place: *Byggematerialers frostbestandighed.* Ph.D.projekt, Statens Byggeforskningsinstitut og Lab for Bygningsmaterialer (signalanalysator og hammer).

Niels Morsing: *Densification of wood perpendicular to the grain.* Ph.D.projekt, Lab for Bygningsmaterialer (signalanalysator og Complex Modulus Apparatus).

Mette Seifert & Lotte V. Andreassen: *Materialeprøvning med svingningsudstyr.* Eksamensprojekt, Lab f Bygningsmaterialer (signalanalysator, Complex Modulus Apparatus og hammer).

Manualer til resonansfrekvensudstyr:

Type 2010: *Instruction Manual 2010. Heterodyne Analyzer Type 2010.* Brüel & Kjær, Nærum, revideret jan 1982.

Bemærk at der er tale om manual til type 2010 og *ikke* type 5122. Se også bilag 2, tabel 6.

Type 3930: *Instructions and Applications. Complex Modulus Apparatus Type 3930.* Brüel & Kjær, Nærum, Danmark. reprint oct 1968.

Type 4810: *Instruction Manual 4810. Mini Shaker Type 4810.* Brüel & Kjær, Nærum, revideret jan 1979.

B&KManual: *Technical documentation. Multichannel Analysis System Type 3550.* Brüel & Kjær, dec 1992.

Vol.1: Guided Tours. Vol.2: Operation, Reference & Hardware (2 dele).
Vol.3: User-Definable Functions. Vol.4: IEEE/IEC Interface.

Bilag 1 Lynvejledning til frekvensgenerator

1. Etablér forsøgsopstilling incl understøtning mv jf figur 6, afsnit 3.
2. Forbind mikrofon (accelerometer) til frekvensgenerator via DIRECT INPUT.
3. Forbind vibrator til frekvensgenerator via BFO OUTPUT.
4. Tilslut evt et oscilloskop via RECORDER.
5. Tænd for frekvensgenerator (POWER) og et evt oscilloskop.
Påregn mindst 1 minuts opvarmningstid for frekvensgeneratoren.
6. Indstil knapper på frekvensgenerator som angivet i tabel 1, afsnit 4.2.
(6a. Indstil oscilloskop; ikke behandlet i denne rapport).
7. Bring vibrator og accelerometer i kontakt med emnet som vist på figur 6 og figur 7, afsnit 3.
8. Drej på FREQUENCY SCALE til et "peak" ses på METER SCALE eller en ellipse/cirkel/ret linie ses på oscilloskopet.
Finindstil på FREQUENCY INCREMENT.
Peakhøjde kan justeres vha INPUT ATTENUATOR og om nødvendigt vha OUTPUT ATTENUATOR.
9. Notér frekvensen (f_e).

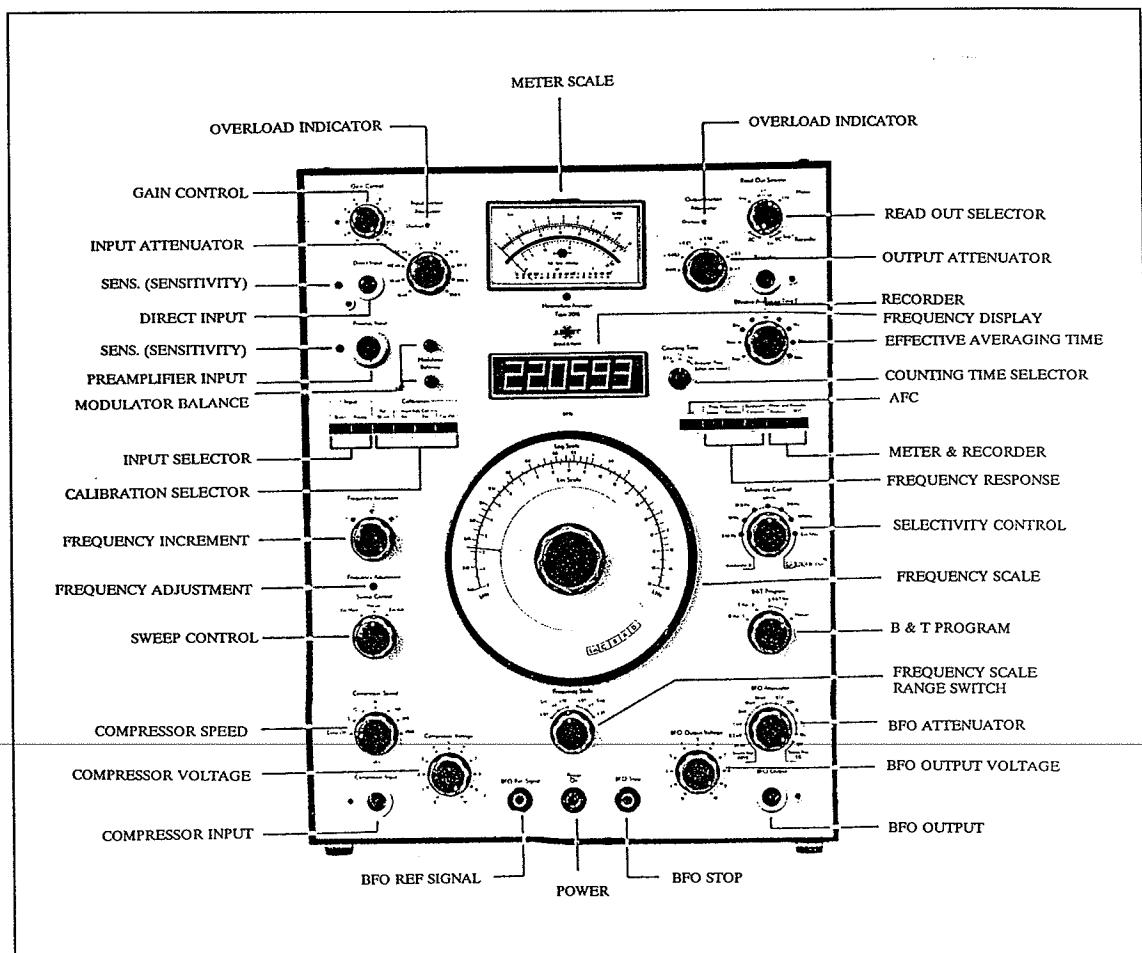
10. Drej væk fra peaket, tag evt accelerometeret helt væk fra emnet og anbring det igen på omtrent samme sted.
11. Gentag pkt 8-10 minimum fire til fem gange.
12. Drej FREQUENCY SCALE tilbage til nul og anbring et nyt emne.
13. Sluk efter brug.

Se også [Type 2010], især afsnit 3.6 og 4.

Bilag 2 Gennemgang af frekvensgenerator

I dette bilag gennemgås frekvensgeneratorens frontpanel i følge figur 16, der svarer til figur 9, afsnit 4.1. Gennemgangen starter øverst til venstre og går mod uret. I øvrigt henvises til [Type 2010].

Indstillingen af knapper kan både benyttes ved opstilling med vibrator (afsnit 3.1) og med Complex Modulus Apparatus (afsnit 3.3).



Figur 16. Frekvensgenerator, frontpanel.

Tabel 4. Frontpanel, frekvensgenerator.

Knap	Indstilling	Bemærkninger
GAIN CONTROL	CAL	Jf [Type 2010] afsn 3.6.
INPUT ATTENUATOR	Så langt mod venstre at udslag kan ses på METER SCALE.	Benyttes til justering af meterets følsomhed mht amplitudens størrelse, jf afsn 4.2.
OVERLOAD INDICATOR (lampe tilknyttet INPUT ATTENUATOR)		For at undgå overbelastning skal INPUT ATTENUATOR drejes med uret, hvis lampen lyser.
DIRECT INPUT		Her tilsluttes mikrofon (accelerometer).
SENS (SENSITIVITY) ¹ (tilknyttet DIRECT INPUT)		Justeres vha skruetrækker. Benyttes til at kompensere for forskelle i transduceres følsomhed, samt i forbindelse med kalibrering.
PREAMPLIFIER INPUT	Benyttes ikke.	Ekstra forstærker unødvendig. DIRECT INPUT benyttes.
SENS (SENSITIVITY) (tilknyttet P.I.)		Se ovenfor.
MODULATOR BALANCE	Benyttes ikke.	Kun aktuel ved meget lave frekvenser.
INPUT SELECTOR	DIRECT	Jf mikrofonens tilslutning.
CALIBRATION SELECTOR ¹	OFF	Øvrige indstillinger af C.S. kun aktuelle i forbindelse med kalibrering af frekvensgeneratoren.
FREQUENCY INCREMENT		Finindstilling af frekvensen.
FREQUENCY ADJUSTMENT		Justeres vha skruetrækker. Benyttes ved kalibrering af FREQUENCY SCALE i forhold til FREQUENCY DISPLAY.
SWEEP CONTROL	MANUAL	Muliggør manuel skift af frekvenssskala, foregår ellers vha externt udstyr.

1 Se nærmere i [Type 2010], afsnit 3.1.6 og 3.2.

Tabel 5. Frontpanel, frekvensgenerator (fortsat).

Knap	Indstilling	Bemærkninger
FREQUENCY SCALE		Med denne knap reguleres den påtrykte frekvens, der desuden kan aflæses digitalt over skalaen (FREQUENCY DISPLAY).
FREQUENCY SCALE RANGE SWITCH		Valg mellem lineær og logaritmisk skala, samt om aflæsning skal ske med en faktor 0.1, 1 eller 10.
COMPRESSOR SPEED	OFF	COMPRESSOR INPUT benyttes ikke.
COMPRESSOR VOLTAGE		Indstilling uden betydning, da COMPRESSOR SPEED ikke benyttes.
COMPRESSOR INPUT ¹		Benyttes ikke.
BFO REF SIGNAL ²		Et "reference"signal udsendes, når knappen trykkes ind.
POWER	ON	Her tændes frekvensgenerator.
BFO STOP ²		Signalet (lyden) forsvinder et øjeblik (kort afbrydelse af BFO), når knappen trykkes ind.
BFO OUTPUT		Her tilsluttes vibratoren.
BFO OUTPUT VOLTAGE (Beat Frequency Oscillator) ¹	Sættes så højt at lyden tydeligt kan høres.	Regulerer lydstyrken på BFO OUTPUT (outputsignalet til vibrator).
BFO ATTENUATOR (findeler)	10 V Source imp. 5Ω	Benyttes anden indstilling forsvinder lyden (forudsat der ikke pilles ved andre knapper).
B & T PROGRAM ³ (B - bandwidth, T - time)	MANUAL	MANUAL betyder, at B og T kan vælges uafhængigt af hinanden vha SELECTIVITY CONTROL og EFFECTIVE AVERAGING TIME. Benyttes andre indstillinger vil B eller T eller BxT være konstant.

1 Se nærmere i [Type 2010], afsnit 3.7.

2 Se også [Type 2010], afsnit 2.1.3.

3 Se også [Type 2010], p.4-5.

Bilag 2 Gennemgang af frekvensgenerator

Tabel 6. Frontpanel, frekvensgenerator (fortsat).

Knap	Indstilling	Bemærkninger
SELECTIVITY CONTROL (valg af B, jf B & T PROGRAM)	100 Hz	100 Hz giver en optimal filtrering af signalet. ¹ S.C. er kun aktiv, når FREQUENCY RESPONSE står i SELECTIVE mode. S.C. benyttes desuden ved kalibrering af filtrene følsomhed. ² Hvis externt filter tilsluttet er det unødvendigt at benytte S.C.
FREQUENCY RESPONSE	SELECTIVE	Muliggør en filtrering af det indkommende signal. Filtrering kan foretages i selve apparatet eller vha et externt filter jf SELECTIVITY CONTROL. Stilles knappen på LINEAR sker der ingen filtrering af signalet. BANDWIDTH COMP. benyttes til særlige målinger. ³
METER & RECORDER ⁴	ANALYZER	Output-amplituden vises på skærmen.
AFC ⁵ (Automatic Frequency Control)	"ude"/"inde"	Aktiveret når knappen er inde og FREQUENCY RESPONSE er i SELECTIVE mode.
COUNTING TIME SELECTOR	"ude"	Denne knap er den eneste synlige forskel på Type 2010 (manual) og Type 5122 (apparat). Type 2010: valg mellem 0.1 og 1 sek. Type 5122: knappen kan være "ude" eller "inde" (giver 1 decimal mere på FREQUENCY DISPLAY).
EFFECTIVE AVERAGING TIME (valg af T, jf B & T PROGRAM)	FAST	IEC standard for "precision sound level meters". ⁶

1 Jf [Type 2010], figur 2.

2 Se nærmere [Type 2010], afsnit 3.1.6.

3 Jf [Type 2010], p.4.

4 Se også [Type 2010], afsnit 2.1.2.

5 Se nærmere [Type 2010], p.8 og afsnit 3.9.

6 Se også [Type 2010], afsnit 3.6.

Tabel 7. Frontpanel, frekvensgenerator (fortsat).

Knap	Indstilling	Bemærkninger
RECORDER		Her tilsluttes et eventuelt oscilloskop.
OUTPUT ATTENUATOR	Drejes så langt mod højre som muligt.	For at sikre det bedst mulige signal-støj-forhold (dB). O.A. skal dog justeres nedad (mod venstre), hvis inputsignalet ikke kan findeles tilstrækkeligt på INPUT ATTENUATOR (s.d.)
OVERLOAD INDICATOR (lampe tilknyttet OUTPUT ATTENUATOR)		For at undgå overbelastning skal OUTPUT ATTENUATOR drejes med uret, hvis lampen lyser.
READ OUT SELECTOR		
- METER	LINEAR	Giver lineært udslag på meteret.
- RECORDER	AC	Betydning for, i hvilken form signalet sendes til et eventuelt tilsluttet oscilloskop.
METER SCALE		Her aflæses niveauet (amplituden) for det "svar" som registreres af accelerometeret. Ved resonansfrekvenser ses særligt stort udslag. En lysende lampe angiver, hvilken skala der skal benyttes.
FREQUENCY DISPLAY		Her aflæses den påtrykte frekvens digitalt.

Der er ikke foretaget nogen form for kalibrering eller justering i forbindelse med de forsøg, der er beskrevet i [de Place & Schmidt,89]. Disse foranstaltninger bør foretages af fagfolk og er formentlig sjældent nødvendige.

Bilag 3 Lynvejledning til signalanalysator

1. Etablér forsøgsopstilling jf figur 8 med ophængning i femtedelspunkterne.
2. Sæt accelerometer sammen og forbind det til ACC INPUT, CHANNEL B på signalanalysatoren vha medfølgende overgangsstik.
3. Sæt hammeren sammen og forbind den til ACC INPUT, CHANNEL A vha medfølgende overgangsstik.
4. Tænd for signalanalysatoren (POWER). Apparatet "varmer op" og udfører en self-test.
5. En diskette placeres i disketteredrevet og diskettens indhold kaldes frem vha <LIST>. I anden linie vælges RECALL. I følgende felt på samme linie vælges ALL SETUP og i feltet ved siden af vælges WILL OVERWRITE EXISTING TRANSDUCER SETUP. Herefter udpeges den ønskede setup-fil og <RECALL>-tasten trykkes ned. Når der svares med "done" er konfigureringen afsluttet. Tryk <LIST> eller <RESET> hvis skærmbilledet derefter ikke automatisk vender tilbage.

Har man ikke lavet et setup henvises til bilag 4 og [B&K Manual,92]. Det gælder også, hvis man vil ændre i sit TRANSDUCER SETUP (se nedenfor).

6. Accelerometeret fastgøres til emnet vha bivoks el lign. Placing afhænger af, hvilken svingningstype, der ønskes undersøgt jf figur 4.
7. Tryk på <RESET> efterfulgt af <START> og måling kan begynde.
8. Slå med hammeren på emnet indtil det ønskede antal målinger er godkendt. Slås for hårdt svares med "overload in ch.A". Meget bløde slag registreres ikke. Vises der konstant "overload ch.A and ch.B", skal følsomheden justeres (se nedenfor).
Hvor på emnet der skal slås afhænger af, hvilken svingningstype, der ønskes undersøgt jf figur 4.
9. Målingen er afsluttet, når grøn lampe i <START>-tasten slukkes.
10. Ved at trykke på <AUTO-SCALE-Y> tilpasses grafens y-akse efter den største amplitude. Ved at trykke på <GRAPH FORMAT> fylder grafen hele skærmbilledet.

I Guided Tours, [B&K Manual,92] vol 1, findes en række øvelser, hvormed man introduceres til forskellige anvendelser af analysatoren. Øvelserne kan gennemføres vha de medfølgende Guided Tours - disketter samt B&K Simulator Unit Type ZZ 0220.

Filhåndtering

Gemme filer

Større eller mindre dele af et setup kan gemmes 1) på harddisken, 2) på en diskette.

Filer gemmes på *harddisken* vha <SAVE SETUP>, hvorefter man vælger et filnummer (fx for en Measurement Setup Version) og afslutter med <ENT> og <COMMAND/EXECUTE>. Harddisken har begrænsede lagringsmuligheder og bør kun benyttes til en *foreløbig* opbevaring.

Filer gemmes på en *diskette*, der er puttet i disketterdrevet, ved at trykke på <STORE> og <MENU>. Man kan vælge at gemme hele sit setup (ALL SETUP) eller dele af det (fx TRANSDUCER SETUP). Giv filen et navn og tryk på <COMMAND/EXECUTE>, hvorefter den er gemt på disketten. Filen kaldes frem igen som beskrevet i pkt 5 ovenfor.

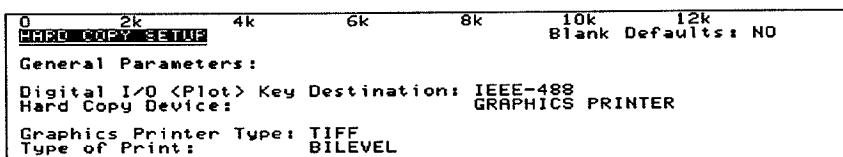
Slette filer

Filer på diskette er beskyttet mod uden videre at blive slettet. Det angives ved betegnelsen PROT i fillisten. Filer kan kun slettes ved at placere cursoren på PROT, trykke <MENU> og vælge at PROT skal ophæves. Derefter kan filen slettes vha <DELETE>. Afslut med <RESET>.

Gemme skærmbillede

Det aktuelle skærmbillede kan gemmes som en TIFF-fil, som kan hentes ind i WordPerfect som grafik.

1. Tryk på <SYSTEM SETUPS> og vælg HARD COPY SETUP, der nu dukker op på nederste del af skærmbilledet. Figur 17 viser, hvordan HARD COPY SETUP skal se ud for at gemme målinger som TIFF-filer.



Figur 17. Udseende af HARD COPY SETUP, når skærmbillede gemmes som TIFF-fil.

2. Med piletaster og <MENU> tilpasses skærmbilledet, hvis det ikke svarer til figur 17. Afslut med <RESET>.
3. Kald det aktuelle målesetup frem jf lynvejledning. Tryk på <STORE> og vælg DUMP PLOT vha <MENU>.
4. Navngiv filen vha <ALPHA> + et navn + <ENTER> eller benyt det navn programmet foreslår. Gem filen vha <COMMAND/EXECUTE>.

I [B&K Manual,92] vol 2, kap 31 beskrives andre muligheder for at præsentere setup mv.

Transducer setup

I det såkaldte TRANSDUCER SETUP indtastes oplysninger om de komponenter, der benyttes til den aktuelle måling, fx hammer og accelerometer.

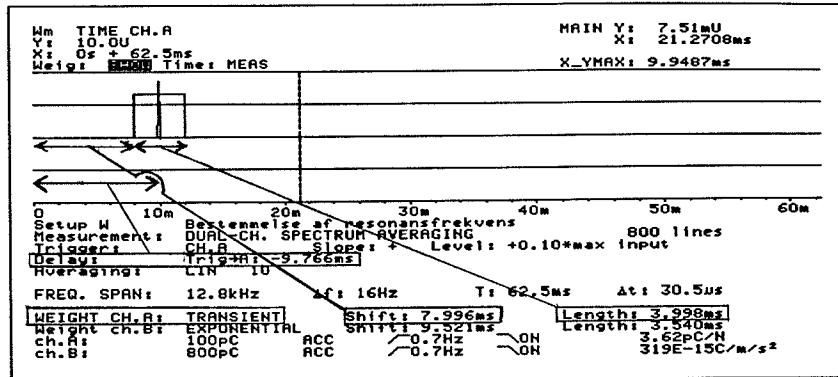
1. Tast to gange <SYSTEM SETUPS>, derefter <MENU> og vælg TRANSDUCER SETUP.
2. Cursor flyttes til Channel A.
I første felt skrives 1.00 for absolutværdier.
I det følgende felt skrives krafttransducerens følsomhed i tal. For Impact Hammer Type 8203 skrives 3.62p (p for pico = 10^{-12}).
I det tredje felt skrives "C/" for ladning, og i det fjerde "N" for kraft. "C" "/" og "N" skrives ved at aktivere <ALPHA>-tasten (se bilag 4 under "Tastatur").
Sidste felt er et tekstfelt. Her kan man skrive navn og nummer på den pågældende transducer (fx "Hammer 8203").
3. Cursor flyttes til Channel B.
Det benyttede accelerometer (Type 4393) har en følsomhed på 319E-15 (E-15 for nano = 10^{-15}).
I det fjerde felt skrives "m/s²" for acceleration.
I øvrigt benyttes samme indtastning som ved Channel A.
4. Der afsluttes med et tryk på <SYSTEM SETUPS>. Husk at gemme opsætningen.

Indstilling af delay-tid og vægtningsfunktioner

For at sikre sig at den interessante del af hammerslaget registreres, skal en delay-tid vælges og der skal ske en vægtning af hammerslag og reaktion. Understregede numre henviser til gennemgang af skærmbilleder i bilag 4.

1. Vælg TIME CH A (felt 3 og 4) og SHOW (felt 22), samt vægtnings-funktioner (felt 42 og 45). For hammer vælges TRANSIENT (felt 42) og for accelerometer vælges EXPONENTIAL (felt 45).
2. Slå på emnet og hammerslagets tidskurve vises på skærmen. Der skal evt trykkes på <AUTOSCALE Y> først. I figur 18 ses et eksempel på en tidskurve for kanal A. Udseendet af kurven - næsten ingen udstrækning i tid - er typisk for stive materialer som beton.

Bilag 3 Lynvejledning til signalanalysator

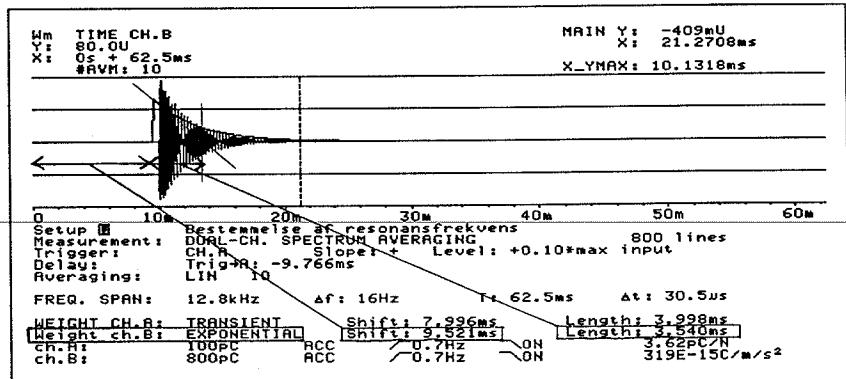


Figur 18. Skærmbillede med tidskurve for hammerslag (kanal A).

Delay: Trig → A (felt 31) gives en værdi der sikrer, at starten af signalet registreres. En negativ værdi vil være en fordel. En negativ værdi bevirket desuden, at signalet ikke afbildes yderst til venstre på skærmbilledet.

Derefter fastlægges Shift (felt 43) og Length (felt 44) for vægtningsfunktionen, således at man fx undgår at registrere dobbeltslag.

- Vælg TIME CH B. Tidskurven for svaret (registreret af accelerometeret) vises. Et eksempel er vist i figur 19, der markant afviger fra forløbet i figur 18. Tidskurven vises inklusiv den eksponentielle vægtning. Den oprindelige kurve "dør" langsomme ud, jf figur 33.



Figur 19. Skærmbillede med tidskurve for accelerometer (kanal B).

Shift (felt 46) og Length (felt 47) kan nu fastlægges. Sættes Length for lavt vil signalet trunkeres, hvorved frekvensresponskurven vil få et "uldet" udseende jf [B&K Manual,92] vol.2 kap.28 og [Døssing,88]; spidser på kurven vil blive for brede og lave. Problemet er størst ved meget spidse peaks. Sættes Length for højt vil uvedkommende støj blive "talt med". Det kan være nødvendigt at prøve sig frem for at finde en passende Length.

I bilag 4 under "Skærmbillede" gives flere oplysninger om de nævnte felter.

Indstilling af følsomhed (Auto-Range)

Analysatorens følsomhed skal afpasses efter styrken af hammerslagene, så man undgår, at uønsket støj så vidt muligt ikke registreres, samtidig med at voldsomme påvirkninger sorteres fra (overload).

1. Etablér opstillingen jf figur 8, afsnit 3.2, fastgør accelerometeret til emnet og tænd for analysatoren.
2. Fremkald eller lav et setup til den aktuelle opgave jf lynvejledning.
3. I felt 30 vælges en grænse for, hvor kraftigt et hammerslag skal være for at "tælle med". På den måde sorteres meget svage slag og anden form for svag støj fra.
4. Tryk på <INPUT AUTORANGE> og slå et antal slag med hammeren hurtigt efter hinanden indtil lampen i <CONT.> skifter fra grøn til gul og lampen i <INPUT AUTORANGE> og i <START> slukkes. Holder man øje med skærmen imens vil man se, at værdierne i felt 48 og 54 (Max Input A og Max Input B) ændres indtil følsomheden er afpasset styrken af hammerslaget.
5. Målingen kan begynde (lynvejledning fra pkt 7).

Denne procedure skal normalt kun gennemføres når man starter en ny måleserie.

Bilag 4 Gennemgang af signalanalysator

I dette afsnit gennemgås signalanalysatorens tastatur og skærbillede med udgangspunkt i forsøg til bestemmelse af resonansfrekvens. For flere oplysninger henvises til [B&K Manual,92].

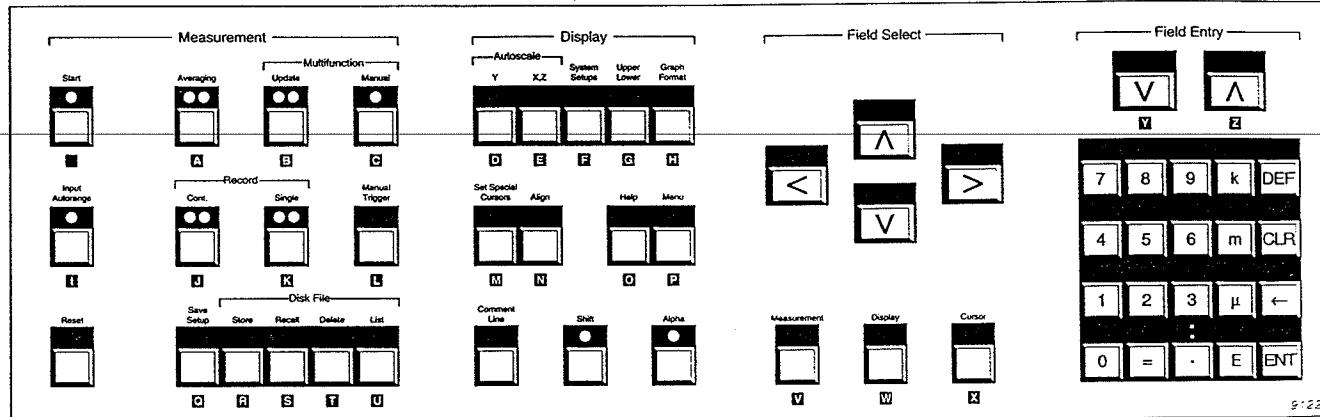
Tastatur

Tastaturet er delt i to dele, et der trækkes ud under skærmen som vist på figur 20, og et der er placeret på analysatorens forside ved siden af skærmen som vist på figur 21.

Tasternes funktion beskrives kort, i øvrigt henvises til [B&K Manual,92] vol 1, kap 0 og vol 2, kap 51. De fleste taster har to funktioner jf figur 20 og figur 21, idet samtlige bogstaver i alfabetet samt en række specialtegn kan skrives vha tasterne. Denne sekundære funktion "kaldes frem" vha <ALPHA>-tasten.

Tastatur i skuffe (figur 20)

Tastaturet i skuffen under skærmen er delt op i fire områder: MEASUREMENT, DISPLAY, FIELD SELECT og FIELD ENTRY jf figur 20. Desuden findes en række underområder; se parenteser ved de enkelte taster i det følgende.



Figur 20. Tastatur i skuffe under skærm.

MEASUREMENT

Dette område indeholder taster, der benyttes i forbindelse med selve målingen.

Tabel 8. MEASUREMENT-taster - oversigt.

Tast	Funktion
START ¹	Sætter måling i gang. Alle aktive lamper skifter til grønt.
INPUT AUTORANGE ¹	Optimizerer det tilladte maximumpeak ⁴ , så det afpasses den aktuelle måling, dvs tilpasset hvor hårdt man normalt slår med hammeren.
RESET ²	Nulstiller måling - både igangsat og afsluttet måling. Aktive lamper skifter til gult. Fungerer i øvrigt som en almindelig fortryd-knap ("tilbage til forrige menu"). <i>OBS!! RESET 9. Rydder hele analysatorens interne hukommelse. Filer på diskette forstyrres dog ikke.</i>
AVERAGING ¹	Skal være aktiveret (gul lampe) for at kunne foretage en midling af signaler.
UPDATE (MULTIFUNCTION) MANUAL (MULTIFUNCTION)	Ikke tilgængelig med den foreliggende version af analysatoren.
CONT (RECORD) ¹	Skal være aktiveret (gul lampe) ved kontinuert måling. I denne sammenhæng opfattes et antal hammerslag også som en kontinuert måling.
SINGLE (RECORD) ¹	Skal være aktiveret (gul lampe) hvis man kun mäter ét signal.
MANUAL TRIGGER	Anvendes ikke sammen med hammer.
SAVE SETUP ³	Gemmer setup på harddisk.
STORE (DISK FILE) ³	Gemmer setup på diskette.
RECALL (DISK FILE) ³	Kalder fil frem fra diskette.
DELETE (DISK FILE) ³	Sletter fil på diskette.
LIST (DISK FILE) ³	Kalder filliste frem fra diskette.

1 Disse taster kan slås fra vha <SHIFT> <tast>. Det er relevant når man benytter autosekvenser ([B&K Manual,92] vol 2, kap 11 og 33).

2 Se desuden [B&K Manual,92] vol 2, kap 51.3.

3 Se også [B&K Manual,92] vol 2, kap 32.3 - 32.5 samt kap 34.

4 Se beskrivelse af felt 48 og 54 under "Skaærbilleder" nedenfor.

DISPLAY

Dette område indeholder taster, der benyttes til at lave et målesetup og til at arbejde med grafer.

Tabel 9. DISPLAY-taster - oversigt.

Tast	Funktion
Y (AUTOSCALE)	Tilpasser y-aksen efter største amplitude.
X, Z (AUTOSCALE)	Benyttes bla til automatisk at indstille felt <u>14</u> og <u>15</u> (se under "Skærbilleder").
SYSTEM SETUPS ¹	Benyttes hvis man vil lave særlige setup eller supplere de indbyggede med ekstra parametre. Benyttes desuden i forbindelse med Transducer Setup mm. (s.d.).
UPPER, LOWER	Benyttes til bytte om på to grafer på skærbilledet, forudsat at man ændrer skærbilledet vha GRAPH FORMAT (s.d.).
GRAPH FORMAT	Tryk én gang og aktuel graf vises på hele skærmen (fuld format). Tryk to gange og skærbilledet deles op i to grafer. Man kan nu sammenligne kurver fra to forskellige målinger eller den samme måling afbildet på to forskellige måder. Der er også mulighed for at lægge to grafer oven i hinanden i samme figur. ²
SET SPEC CURSORS	Benyttes i forbindelse med specielle cursortyper (se felt <u>18</u> under "Skærbilleder").
ALIGN	Benyttes til at "sammenkæde" felters indhold. ³ Har man to grafer på sit skærbillede kan man vha ALIGN bevæge sig rundt på de to grafer samtidig.
HELP	Aktiverer on-line hjælp.
MENU	Giver adgang til menuen for det felt man "står på".
COMMENT LINE	Giver sammen med ALPHA adgang til kommentarlinien; felt <u>24a</u> .
SHIFT	Anvendes bla til at skrive store bogstaver.
ALPHA	Anvendes når tastaturet skal bruges til at skrive bogstaver mm.

1 SYSTEM SETUP beskrives detaljeret i [B&K Manual,92] vol 2, kap 31.

2 Jf [B&K Manual,92] vol 2, kap 31.13.

3 Jf [B&K Manual,92] vol 2, kap 51.16.

FIELD SELECT

Tasterne i dette område benyttes, når man skal bevæge sig rundt på skærmen eller i de enkelte menuer. Se også [B&K Manual,92] vol 1, side 0-18.

Tabel 10. FIELD SELECT-taster - oversigt.

Tast	Funktion
Λ, V, <, >	Benyttes til bevæge sig rundt på skærmen eller i de enkelte menuer. Kan også kombineres med <SHIFT>.
MEASUREMENT	Bringer én til nederste halvdel af skærmen. Trykker man to gange flyttes cursor til felt <u>24</u> Measurement Setup Version (se under "Skærbilledede").
DISPLAY	Bringer én til øverste halvdel af skærmen. Trykker man to gange flyttes cursor til felt <u>1</u> Display Setup Version (se under "Skærbilledede").
CURSOR	Bringer én til felt <u>13</u> Cursor (se under "Skærbilledede").

FIELD ENTRY

Tasterne i dette område benyttes først og fremmest ved indtastning af værdier i Numeric Type Fields.

- numeriske taster, et minustegn, et decimaltegn (.)
- k (10^3), m (10^{-3}), μ (10^{-6}), E (bruges til andre 10-potenser)
- DEF (default). Ændrer til standardindstilling i det aktuelle felt, forudsat en sådan findes.
- CLR (clear), ← (rette-tast), ENT (enter)

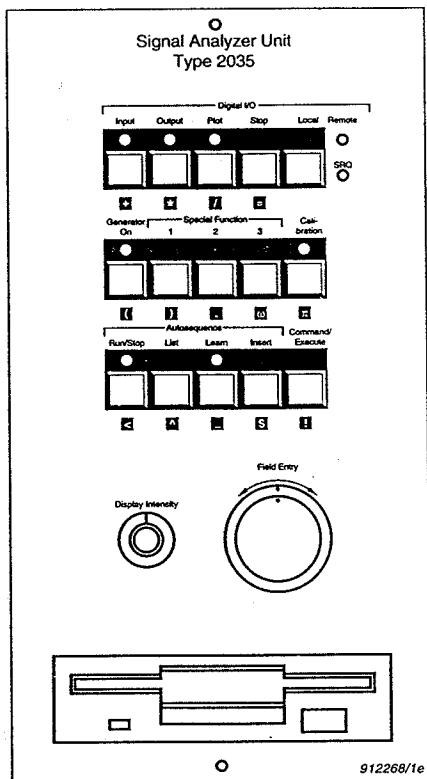
- Λ og V, to piletaster, der har samme funktion som FIELD ENTRY-knappen (se sidst i afsnittet om tastatur). Disse piletaster må ikke forveksles med tilsvarende taster nævnt under FIELD SELECT.

Tastatur til højre for skærm (figur 21)

Tastaturet til højre for skærmen er ordnet i to områder: DIGITAL I/O og AUTOSEQUENCE samt tasterne COMMAND/EXECUTE, GENERATOR ON, SPEC FCT 1,2,3 (tre taster) og CALIBRATION jf figur 21. En oversigt gives i tabel 11.

Af disse taster har jeg kun benyttet COMMAND/EXECUTE.

Figur 21. Tastatur til højre for skærm.



Tabel 11. Tastatur til højre for skærm - oversigt.

Tast/område	Funktion
DIGITAL I/O	Består af fem taster og to lamper. Benyttes til input/output-operationer ved brug af RS-232-C og IEEE/IEC Interfaces (fx til PC).
GENERATOR ON	Her slås den indbyggede generator til/fra.
SPEC FCT 1,2,3	Benyttes til at udføre specielle funktioner fx programmeret vha PC.
CALIBRATION ¹	Benyttes i forbindelse med kalibrering af instrumentet.
AUTOSEQUENCE ²	Består af fire taster. Benyttes, når autosekvenser skal skrives og/eller udføres. Autosekvenser er små brugerdefinerede programmer, hvor tasteoperationer automatiseres.
COMMAND/EXECUTE ³	Gør analysatoren i stand til at udføre en række standard-kommandoer (gemme, slette, flytte ...) i forbindelse med setup og filhåndtering.

1 Se nærmere i [B&K Manual,92] vol 2, kap 12.

2 Se nærmere i do, kap 11 og 33.

3 Se nærmere i do, kap 32.2.

Til højre for skærmen er desuden placeret to vigtige *drejeknapper*:

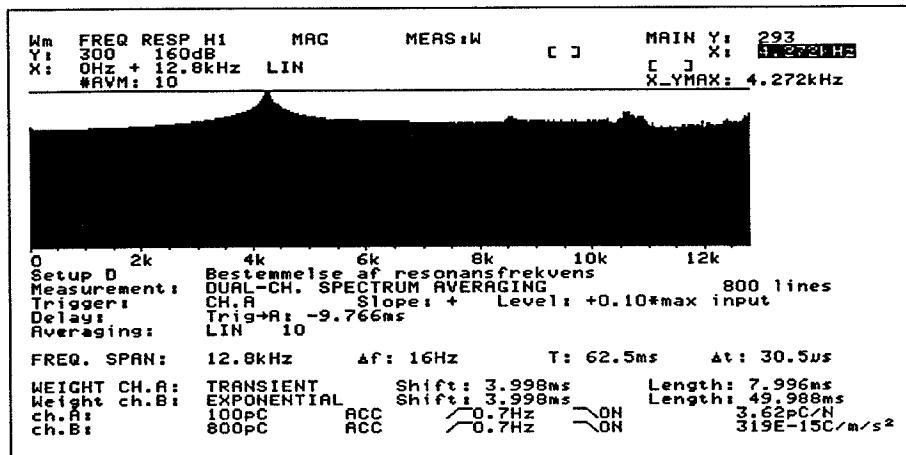
DISPLAY INTENSITY, der benyttes til regulere lysstyrken på skærmen.

FIELD ENTRY, der benyttes til

- at "vandre" rundt på en kurve, forudsat man "står på" cursoren.
- at skifte indstilling, når man står på et bestemt felt, uden at behøve at trykke på <MENU>. Til gengæld kan man ikke se valgmulighederne.
- at kalde specialtegn frem ved at trykke på <ALPHA> og dreje FIELD ENTRY til højre eller venstre. Ved at trykke på <ALPHA> eller <RESET> kommer man tilbage til skærmbilledet. Dette kan *ikke* udføres vha de to FIELD ENTRY - piletaster.

Skærmbilleder

Et typisk skærmbillede er delt i tre dele, øverst en række felter med hver sin menu, i midten en graf og nederst etter en række felter. Et eksempel er vist i figur 22.



Figur 22. Eksempel på et skærmbillede, som det ser ud ved bestemmelse af resonansfrekvens. Resonansfrekvensen aflæses til 4.272 kHz øverst til højre ("X_YMAX:") og ses desuden som kurvens toppunkt.

I det følgende gennemgås skærmbilledet med udgangspunkt i de indstillinger, der er benyttet til bestemmelse af resonansfrekvens og dæmpning i Ph.D.projektet "Byggematerialers frostbestandighed". De enkelte felter kommenteres. Gennemgangen er mest rettet mod forsøg, hvor formålet er at bestemme resonansfrekvens og beslægtede størrelser. For detaljer må henvises til [B&K Manual,92].

Når der i det følgende tales om at "befinde sig i et skærmbillede" eller "stå i et skærmbillede" menes et skærmbillede som vist nedenfor. Går man i gang med at ændre indholdet i et eller flere felter ved at kalde en menu frem, beskrives det ved at man "står i en menu". Hvert felt har et navn, svarende til overskriften for det pågældende felts menu.

Det må understreges, at skærmbilledet kan indeholde andre funktioner/felter end de viste afhængigt af, hvilke type målinger man foretager.

Alle de felter, hvor indholdet kan ændres umiddelbart, betegnes i det følgende ved et understreget nummer. I langt de fleste tilfælde giver analysatoren en række valgmuligheder, hvoraf nogle ikke er tilgængelige med den foreliggende version. Disse angives ved et foranstående minus.

[] eller tomt felt betyder normalt, at feltet ikke er aktiveret eller at der benyttes en standardindstilling.

UD(F) betyder User Definable Functions, dvs at man kan indlægge "hjemmelavede" funktioner/størrelser.

"numeric type field" henholdsvis "alpha type field" betyder, at man frit kan vælge værdier (tal eller bogstaver) vha tastaturet.

Om indholdet af felter på skærbilledet der ikke har et nummer gælder, 1) at det ikke kan ændres, 2) at det styres af informationer i andre felter, 3) at det fastlægges på anden vis.

Typisk kan det første ord på en linie ikke ændres. Dette ord er normalt en slags beskrivelse af linien.

Som et eksempel på et felt, hvis indhold styres af andre informationer kan nævnes Δf (se figur 22), der får en anden værdi, når felt 15 eller 27 ændres.

De vigtigste felter, hvis indhold fastlægges på anden vis, er felterne til højre for 53 og 59, hvor følsomhed af transducere angives. Se nærmere under "Transducer Setup" i bilag 3.

Display Setup, Cursor Setup

På øverste del af skærbilledet, figur 23, vælges hvordan man ønsker sine resultater vist på grafen, med hvilke enheder, akser osv. Indholdet af disse felter kan ændres *efter* en måling uden at man behøver at lave målingen om.

Wm	FREQ RESP H1	MAG	MEAS:W	MAIN Y:	293
Y:	300 160dB			X:	4.272kHz
X:	0Hz + 12.8kHz LIN				
#AVM:	10			X_YMAX:	4.272kHz

Figur 23. Skærbillede, Display Setup, Cursor Setup. Udseende ved bestemmelse af resonansfrekvens ved slag med hammer.

Visse felter og linier er skjult og ses kun når man "står på" dem. Hvilke det drejer sig om vil fremgå af gennemgangen.

Kommentarer til de enkelte felter

12	3	4	5	6	7
Wm	FREQ RESP H1	MAG	MEAS:W	MAIN Y:	293
Y:	300 160dB			X:	4.272kHz

Figur 24. Udsnit af Display og Cursor Setup. Understregede numre henviser til efterfølgende forklaringer.

- 1 **Display Setup Version.** Standard er W (Working Setup). Der er mulighed for at gemme op til 10 display setup (nummereret 1-10) på harddisk (som alternativ til diskette).
- 2 **Display Function Type** (skjult felt). Benyttet indstilling: tomt felt. Tomt felt betyder, at en række standardfunktioner kan benyttes i det efterfølgende felt (3).
- 3 **Display Function.** I dette felt angives hvordan resultaterne skal vises, dvs hvilken funktion y-værdierne på grafen skal repræsentere.

De mest interessante i denne forbindelse er:

AUTOSPEC CH.A, AUTOSPEC CH.B: Disse funktioner viser kraften (hammerslaget) henholdsvis accelerationen (reaktionen) som funktion af frekvensen.

COHERENCE: viser sammenhængen mellem signalet i kanal A og signalet i kanal B angivet ved værdier fra 0 til 1. Denne funktion er et udtryk for kvaliteten af målingen. En konstant værdi på 1 betyder, at det signal, der registreres i B kommer fra A. En værdi på 0 svarer til, at B kun registrerer støj. Ved resonansfrekvenser er der ikke lineær sammenhæng mellem A og B. Kohärensen kan derfor være forholdsvis lille omkring en resonansfrekvens.

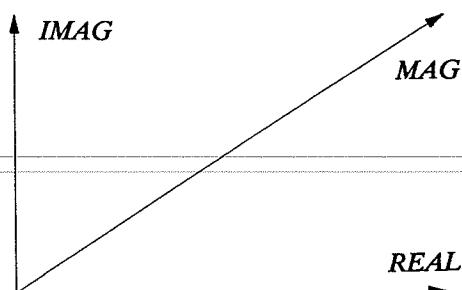
FREQ RESP: Angiver kort sagt AUTOSPEC B divideret med AUTOSPEC A, kaldet *overføringsfunktionen*. Ved at vælge FREQ RESP normeres reaktionen i forhold til hammerslagets styrke.

Dette er afgørende for at kunne midle over et større antal hammerslag samt til sammenligning af resultater for forskellige emner.

FREQ RESP er benyttet ved bestemmelse af resonansfrekvens i Ph.D.projektet "Byggematerialers frostbestandighed".

TIME: Benyttes i forbindelse med filtrering af hammerslag, jf felt 42-47. Se også under "Indstilling af delaytid" i bilag 3.

- 4 **Display Function Estimate.** Når FREQ RESP er valgt i felt 3, angiver felt 4, hvordan overføringsfunktionen beregnes i praksis. Dette kan gøres på tre måder. Primært skal der tages højde for at AUTOSPEC A kan blive nul.
- 5 **Function coordinates.** Analysatoren regner komplekst, hvilket betyder at man kan vælge at vise fx realdelen (REAL) af signalet, den imaginære del (IMAG) eller det komplekse signals numeriske værdi (MAG). MAG kaldes også størrelsen af det samlede signal, dvs længden af en vektor bestemt som vist i figur 25.

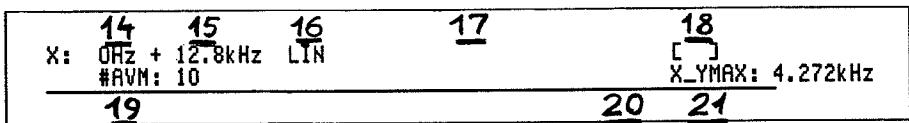


Figur 25. Illustration af komplekst signal. REAL angiver signalets reelle del, IMAG den imaginære del og MAG signalets numeriske værdi.

PHASE kan med fordel benyttes sammen med FREQ RESP, da der gerne skal være faseskift ved resonansfrekvens.

Vælges NYQUIST fås et cirkeldiagram, hvor både reel del og imaginær del vises. Antallet af cirkler svarer til antallet af

- resonansfrekvenser i det valgte frekvensspektrum. NYQUIST kan sammenlignes med oscilloskopets funktion, jf afsnit 4.
- 6 **Data Source.** Angiver hvor data til grafen hentes fra; fil eller aktuel måling (MEAS). Kun MEAS kan vælges. 6 vises kun, når en måling er afsluttet eller man "står på" linien.
- 7 **Cursor Type.** Koordinatsystemets format. For x-y koordinatsystemet kan *kun* vælges formatet MAIN.
- 8 **Y Full Scale Value** (numeric type field). Maksimal værdi for y-akse.
- 9 **Y Lin Log Annotation.** Enhed på y-akse. Vælges dB i felt 11 fås automatisk en logaritmisk skala.
- 10 **Y Log Display Range.** "Spænd" på logaritmisk y-akse. 80 dB vil normalt være tilstrækkeligt.
- 11 **Y Lin Log Display.** Valg af aksetype; logaritmisk (dB) eller lineær.
- 12 **j- ω -Weighing.** $\omega = 2\pi f$, hvor f er frekvensen. ω er vinkelhastigheden [s^{-1}]. Felt 12 har samme funktion som felt 53 og 59 (s.d.). Felt 12 kan benyttes til at afbilde den *aktuelle* måling på en anden måde. En ændret indstilling af felt 53 og 59 har først virkning for den *følgende* måling.
- 13 **Cursor.** Når man står på dette felt kan man vha FIELD ENTRY - drejeknappen bevæge sig langs kurven.



Figur 26. Udsnit af Display og Cursor Setup. Understregede numre henviser til efterfølgende forklaringer.

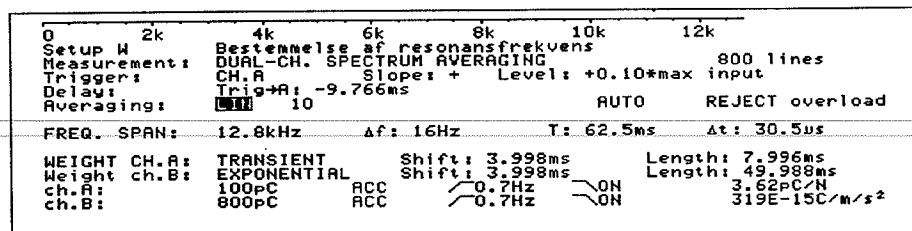
- 14 **X-Start** (numeric type field). Startværdi for x-aksen. Sættes automatisk til nul, hvis man benytter samme værdi i felt 15 og felt 38.
- 15 **X-Width** (numeric type field). Slutværdi for x-akse. Det viste spektrum, som kan være et udsnit af det målte, bliver intervallet mellem X-Start og X-Width. X-Start og X-Width kan sættes automatisk vha <AUTOSCALE X,Z>.
- 16 **X-Lin-Log-Oct.** Valg af aksetype.
- 17 **Delay Compensation** (skjult felt). Benyttet indstilling: tomt felt. Kan benyttes til at kompensere for forsinkelsen i et signal, fx hvis man mäter på et langt rør. Kendes forsinkelsen mere eksakt bør den noteres i felt 32. Pt. ikke anvendt. 17 ses kun når man "står på" linien.
- 18 **Special Cursortype.** Kan fx benyttes til at "highlighte" et frekvensbånd. 18 vises kun, når en måling er afsluttet eller man "står på" linien eller i Cursor Setup-området.
- 19 **Averaging Counter.** Tæller. []: tæller slået fra. #AVM: angiver antallet af accepterede målinger. #AVG: angiver hvor mange målinger den aktuelle graf bygger på. Slår man hurtigt efter hinanden vil AVG reagere langsommere end AVM, idet det tager længere tid at opdatere en graf end at registrere

- en måling. Ellers har det ingen betydning, hvilken af de to indstillinger, der benyttes i det aktuelle setup.
- 20 Auxiliary Information Type** (skjult felt). Benyttet indstilling: tomt felt. Tomt felt betyder, at en række standardfunktioner kan benyttes i det efterfølgende felt (**21**).
 Hvis man ønsker at benytte andre funktioner skal indholdet af felt **20** ændres. Andre funktioner er såkaldte User Definable Functions, der som navnet antyder, er funktioner man selv definerer. Se nærmere i [B&K Manual,92] vol 3.
- 21 Auxiliary Information.**
X_Y MAX betyder, at man i dette felt direkte kan aflæse x-værdien hørende til det største peak på kurven, dvs resonansfrekvensen. Det sker med en nøjagtighed, der er bestemt af hvor stort et frekvensspekter man studerer, samt hvor stor oplosning man har valgt (felt **26** og **37**).
YMAX betyder, at man kan aflæse den største amplitude-værdi.
 Felt **21** benyttes ofte i sammenhæng med **7** eller **18**.
- 22 Show Weighing** (skjult linie, se figur 18). Vægtningen af hammer-slaget (felt **40**) vises (SHOW) eller ej. Kan slås fra og til vha piletaster (FIELD ENTRY, til højre på skuffe-tastatur).
 Visning har primært interesse i forbindelse med defineringen af, hvordan hammerslaget skal filtreres jf felt **42 - 44** samt "Indstilling af delay-tid og vægtningsfunktioner" under bilag 3.
- 23 Frequency Weighing Source** (skjult linie, se figur 18). Kan benyttes til at studere vægtning af et signal, forudsat felt **22** står i SHOW.

Felterne i Display Setup og Cursor Setup beskrives i detaljer i [B&K Manual,92] vol 2, kap 29 og 30.

Measurement Setup

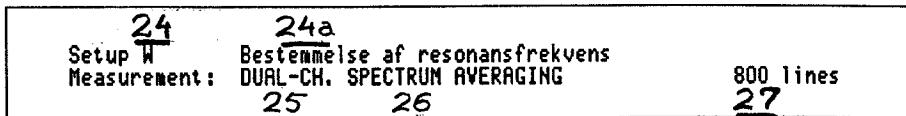
Nederste halvdel af skærmbilledet, figur 27, består af det såkaldte Measurement Setup. Her defineres de parametre, der kontrollerer målingen. Disse felter skal være korrekt indstillet *inden* målingen for at få det ønskede resultat.



Figur 27. Skærmbillede, Measurement Setup. Udseende ved bestemmelse af resonansfrekvens ved slag med hammer.

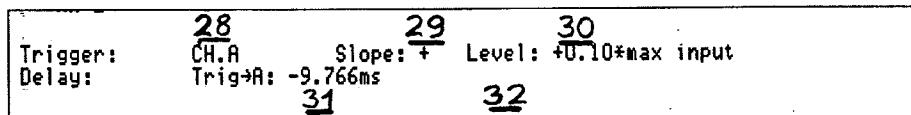
Visse felter og linier er skjult og ses kun når man "står på" dem. Hvilke det drejer sig om vil fremgå af gennemgangen.

Kommentarer til de enkelte felter



Figur 28. Udsnit af Measurement Setup. Understregede numre henviser til efterfølgende forklaringer.

- 24 **Measurement Setup Version.** Standardindstilling er W (Working Setup). Arbejder man med flere forskellige measurement setup kan de gemmes under numre fra 1 til 4 på harddisk. Se også under "Filhåndtering" i bilag 3.
- 24a **Tekst felt.** Aktiveres vha <ALPHA> <COMMENTLINE>. Ifeltet er der plads til at beskrive det aktuelle setup i få ord.
- 25 **Measurement Channel.** Her vælges om man mäter på begge kanaler eller kun én kanal.
- 26 **Measurement Mode.** Her vælges hvilken type mätning man vil foretage. Valgmulighederne for flere af de øvrige felter styres af indholdet af dette felt.
- 27 **Spectral lines.** Her vælges hvor nøjagtigt frekvensen skal kunne aflæses, som en brøkdel af det spektrum der arbejdes ved. 800 linier betyder således, at man kan aflæse frekvensen med spring på 1/800 af bredden af frekvensspektret.



Figur 29. Udsnit af Measurement Setup. Understregede numre henviser til efterfølgende forklaringer.

- 28 **Trigger Source.** Her angives fra hvilken kanal eller extern kilde triggersignalet - det udløsende signal - kommer, eller om der skal ske en kontinuerlig mätning fx af støj i et lokale.
- 29 **Trigger Slope (+ / -).** + betyder, at værdien af Trigger Level (felt 30) er en minimumgrænse, - at det er en maximumgrænse.
- 30 **Trigger Level (numeric type field).** Kan vælges frit som en brøkdel af Max Input (felt 48). Angiver det svageste/kraftigste triggersignal (hammerslag), der kan accepteres. Sikrer, at uønsket svag/kraftig støj filtreres fra.
- 31 **Delay After Trigger (numeric type field, enhed [ms]).** Sætter tids-punktet for hvornår mätningen skal starte i forhold til trigger-tidspunktet.
Det er en fordel at benytte en negativ værdi, idet man så er sikker på at få registreret hele signalet. Se også bilag 3 under "Indstilling af delay-tid".
- 32 **Delay Between Channels (do, enhed [ms]; skjult felt).** Sætter tids-punktet for hvornår mätning i kanal B skal begynde i forhold til kanal A. Aktuelt når der mäter på mere end én kanal.

Bilag 4 Gennemgang af signalanalysator

Averaging:	<u>33</u>	<u>34</u>	<u>35</u>	<u>36</u>
	<u>10</u>		AUTO	REJECT overload
FREQ. SPAN:	12.8kHz	Δf: 16Hz	T: 62.5ms	Δt: 30.5μs

Figur 30. Udsnit af Measurement Setup. Understregede numre henviser til efterfølgende forklaringer.

- 33 **Averaging Type.** Valg af hvordan midling skal foregå, dvs hvordan de enkelte hammerslag skal vægtes i forhold til hinanden.
- 34 **Averaging Number** (numeric type field). Antallet af slag, der skal midles over (tal mellem 1 og 32767).
- 35 **Averaging Auto or Manual** (skjult felt). Midling af signaler kan foregå automatisk eller manuelt. Ved at vælge manuel midling har man mulighed for at sortere signaler fra, der ikke skal midles over.
- 36 **Av. Overload Accept** (skjult felt). Her vælges, om signaler der overstiger Max Input (felt 48 og 54), skal accepteres (ACCEPT) eller ej (REJECT).
- 37 **Freq Span or Tracking.** *Kun F.S.* kan vælges i det aktuelle setup og til almindelig frekvensanalyse i øvrigt.
- 38 **Frequency Span.** Valg af bredden af frekvensspektret. Der kan vælges mellem et antal faste bredder: 1.56 Hz, 3.13 Hz, ..., 51.2 kHz, 102.4 kHz.

FREQ. SPAN:	12.8kHz	Δf: 16Hz	T: 62.5ms	Δt: 30.5μs
<u>BASEBAND</u>			INT SAMPL	<u>40</u>

Figur 31. Udsnit af Measurement Setup. Understregede numre henviser til efterfølgende forklaringer.

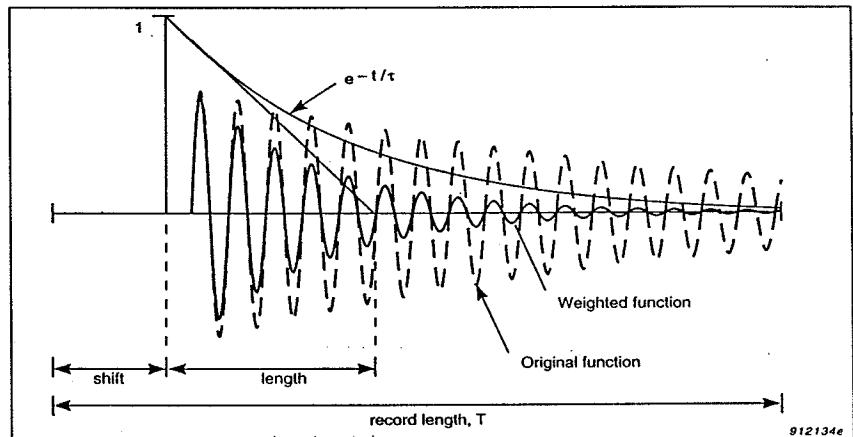
- 39 **Baseband Zoom Envelope** (skjult linie). Her vælges om hele spektret fra 0 Hz skal vises, eller om man ønsker at zoome ind på et udsnit.
- 40 **External Sampling** (skjult linie). Ikke aktuelt.

<u>41</u>	<u>42</u>	<u>43</u>	<u>44</u>
WEIGHT CH.A:	TRANSIENT	Shift: 3.998ms	Length: 7.996ms
Weight ch.B:	EXPONENTIAL	Shift: 3.998ms	Length: 49.988ms

Figur 32. Udsnit af Measurement Setup. Understregede numre henviser til efterfølgende forklaringer.

- 41 **Weighing A or Tacho.** "Weight Ch A" betyder, at man har mulighed for at benytte forskellige vægtningsfunktioner (felt 42 og 45) for kanal A og B.
- 42 **Weighing Function A.** Vægtning af hammerslag. Her har man mulighed for at vægte tidsforløbet af hammerslaget således, at uønsket støj filtreres fra. TRANSIENT betyder, at kun den del af hammerslaget der ligger indenfor tidsrummet valgt vha felt 43 og 44 tælles med. Der sker ikke yderligere vægtning. Se også "Indstilling af delay-tid og vægtningsfunktioner" i bilag 3.
- 43 **Weighing Shift A** (numeric type field, enhed [ms]). Kan vælges frit. Starttidspunkt for vægtning af det indkommende signal.

- 44 **Weighing Length A** (numeric type field, enhed [ms]). Kan vælges frit. Angiver tidsperioden for vægtning.
- 45 **Weighing Function B and Common.** Vægtning af reaktion på hammerslaget. EXPONENTIAL benyttes for at sikre, at signalet fra accelerometeret dør tilstrækkelig hurtigt ud, således at det ikke forstyrres af uvedkommende støj. Se også "Indstilling af delay-tid og vægtningsfunktioner" i bilag 3.
Figur 33 illustrerer, hvilken virkning en vægtning med EXPONENTIAL har.



Figur 33. Tidskurve, kanal B. Vægtning vha EXPONENTIAL, definition af Length. [B&K Manual, 1992].

- 46 **Weighing Shift B and Common** (numeric type field). Svarer til felt 43.
- 47 **Weighing Length B and Common** (do.). Svarer til felt 44.
Definitionen af Length i forbindelse med vægtningsfunktionen EXPONENTIAL illustreres i figur 33. Det fremgår, at Length ikke svarer til signalets varighed.

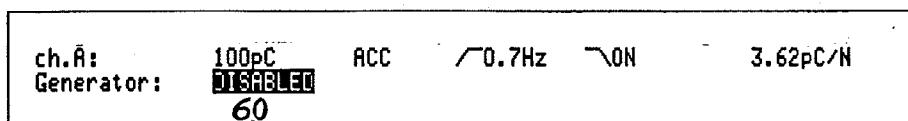
ch. A:	48	49	50	51	52	53	3,62pC/N
ch. B:	100pC	HCC	0.7Hz	ON	ON		319E-15C/m/s ²
	800pC	ACC	0.7Hz				
	54	55	56	57	58	59	

Figur 34. Udsnit af Measurement Setup. Understregede numre henviser til efterfølgende forklaringer.

- 48 **Max Input A.** Hammerslag med en kraft større end svarende til den angivne værdi afvises (overload). Se også "Indstilling af følsomhed" i bilag 3. Værdien vil afhænge af det aktuelle forsøg.
- 49 **Polarity A** (skjult felt). Kan være + eller -. + er standard. Signalet regnes positivt.
- 50 **Input Source A.** Her angives, hvilken indgang i kanal A, der benyttes.
- 51 **High Pass A.** Støjfilter. Uønskede støjkilder filtreres fra.
- 52 **Low Pass A. do.**
- 53 **Integration Differentiation A** (skjult felt). Der kan vælges mellem ∫∫, ∫, [], d og dd. Her har man mulighed for at angive, om hammer-slaget skal integreres eller differentieres op til to gange.
Tomt felt betyder at hammerslaget angives som en kraft.

- 54 **Max Input B.** Reaktion med en acceleration større end svarende til den angivne værdi afvises (overload). Svarer til felt 48.
- 55 **Polarity B** (skjult felt). Kan være + eller -. Svarer til felt 49.
- 56 **Input Source B.** Svarer til felt 50.
- 57 **High Pass B.** Svarer til felt 51.
- 58 **Low Pass B.** Svarer til felt 52.
- 59 **Integration Differentiation B** (skjult felt). Der kan vælges mellem $\int \int$, \int , [], d og dd. Svarer til felt 53.
Tomt felt betyder at reaktionen angives som en acceleration. $\int \int$ betyder, at reaktionen regnes som en flytning.

Felter til højre for 53 og 59: Angivelse af transduceres følsomhed, se under "Transducer Setup", bilag 3.



Figur 35. Udsnit af Measurement Setup. Understregede numre henviser til efterfølgende forklaringer.

- 60 **Generator Waveform** (skjult linie). Her angives om, hvilken svingningsform generatoren skal arbejde ved eller om generatoren skal kobles helt fra (DISABLED).

Felterne i Measurement Setup beskrives i detaljer i [B&K Manual,92] vol 2, kap 28.

Bilag 5 Tekniske specifikationer

I dette bilag gives tekniske specifikationer på det anvendte udstyr, dvs kun for apparatur omtalt i afsnit 3.1 og 3.2. Specifikationer for accelerometer Type 4367 omtalt i afsnit 3.1 mangler. Se i øvrigt manualer og øvrig information leveret sammen med udstyret.

B&K Mini Shaker Type 4810

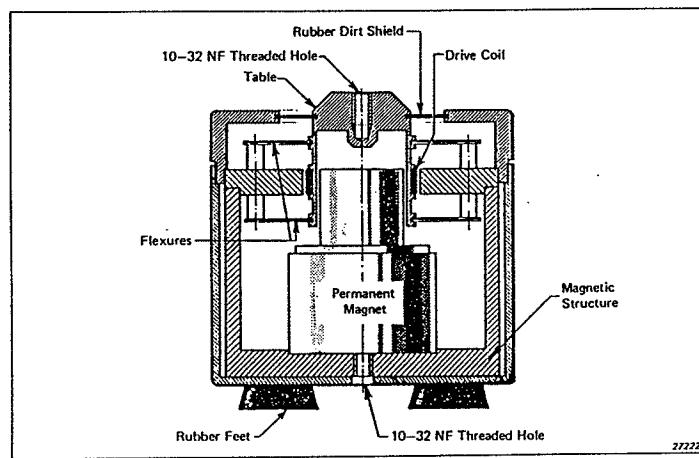


Fig.1. Sectional drawing of the Mini-Shaker Type 4810

Frequency Range: DC to 18 kHz	Dynamic Flexure Stiffness: 2 Newton/mm (11,5 lbs/in)	Table Size: 14 mm (0,55 in) diameter
First Major Armature Resonance: Above 18 kHz	Dynamic Weight of the Moving System. 18 grams	Fastening Thread: NF 10 — 32
Force Rating (Peak): 10 Newton (2,25 lbf). 65 Hz to 4 kHz 7 Newton (1,5 lbf). 65 Hz to 18 kHz	Magnetic Field: Permanent magnet	Weight: 1,1 kg (2,4 lb)
Max. Bare Table Acceleration (Peak): 550 ms ⁻² (65 Hz to 4 kHz) 383 ms ⁻² (4 kHz to 18 kHz) (1 ms ⁻² = 0,102 g)	Max. Input Current: 1,8 A. RMS	Dimensions: Diameter: 76 mm (3 in) Height: 75 mm (2,9 in)
Max. Displacement (Peak-to-Peak): 6 mm (0,236 in)	Coil Impedance: 3,5 Ω at 500 Hz	Accessories Available: Cable for connection of Mini-Shaker to Power Amplifier AO 0069
	Connection: Microsocket NF 10 — 32	Mounting Accessories (includes isolated studs YP 0150 and non-isolated studs YQ 2960) UA 0125

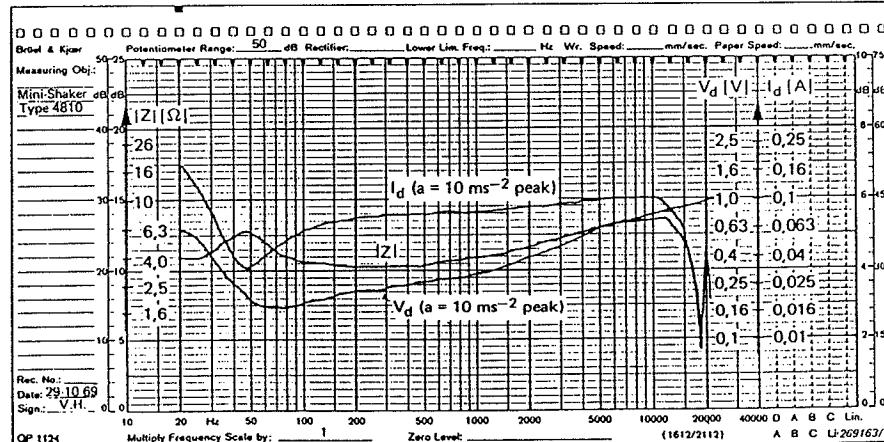


Fig.2. Frequency response of the 4810 for Impedance (Z), current (I) and voltage (V)

B&K Heterodyne Analyzer Type 2010

Specifikationer gælder for type 2010, men synes også at kunne anvendes på type 5122, der er benyttet til projekter på LBM.

Specifications 2010

ANALYZER SECTION		
Frequency Range: 2 Hz to 200 kHz in three linear and logarithmic ranges Pos. x0.1: 2 Hz to 2 kHz Pos. x1: 20 Hz to 20 kHz Pos. x10: 200 Hz to 200 kHz	Dynamic Range: > 85 dB (in bandwidths 3.16 to 100 Hz) > 75 dB (in bandwidths 316 and 1000 Hz)	DC Linear mode: Output voltage: 4.5 V at full deflection ~ 10 V RMS AC Max. voltage: 15 V Dynamic range: -50 dB to + 10 dB re. full meter deflection Crest factor capability: Up to 5 at full deflection decreasing to 1.4 at + 10 dB Accuracy of RMS indication: ± 0.5 dB for crest factors up to 5 Linearity of RMS indication: ± 0.3 dB in the range -40 dB to 0 dB and ± 0.5 dB over the entire range Output impedance: < 10 Ω Load impedance: ≥ 5 kΩ Averaging times: 0.1, 0.3, 1, 3, 10, 30, 100 sec.
Frequency Response: Linear Mode: ± 0.2 dB (10 Hz to 50 kHz) ± 0.5 dB (2 Hz to 200 kHz) Selective Mode: 1: Six constant bandwidth band-pass filters 2: A, B, C and D weighting networks 3: External filter	Distortion (Input section and filter) < 0.01% (60 Hz to 50 kHz) < 0.03% (20 Hz to 100 kHz)	DC Logarithmic mode: Output voltage: 4.5 V at full deflection ~ 31.6 V AC. Lin/log conversion ratio 0.09 V (DC)/dB (AC) Dynamic range: -50 dB to 0 dB re. 4.5 V Crest factor capability: Up to 5 at -10 dB decreasing to 1.4 at 0 dB Accuracy of RMS indication: ± 0.5 dB for crest factors up to 5 Linearity: ± 0.5 dB Output impedance: < 10 Ω Load impedance: ≥ 5 kΩ Averaging times: As for linear mode
Sensitivity: 10 μV to 300 V for full deflection in 10 dB steps	Weighting Networks: Curve A, B and C in accordance with IEC standard (IEC 179) Curve D in accordance with proposed standard.	AFC: Active in the Bandwidths 3.16 Hz to 100 Hz “PULL IN” Range: 10 Hz to 1 kHz depending on bandwidth and frequency range. See table inside leaflet
Input Section: Input Impedance: 1 MΩ//80 pF (direct input) Output Impedance (to ext. filter): < 25 Ω Max. Output Voltage: 5 V PEAK Input Amplifier Gain: 40 dB Gain Control: 0 dB (cal) to -10 dB Input Attenuator range: 90 dB in 10 dB steps Accuracy of attenuator ± 0.1 dB relative to “0.1 V” at 1 kHz. Distortion: < 0.01% (20 Hz to 50 kHz, output voltage ≤ 1 V) < 0.03% (20 Hz to 100 kHz, output voltage ≤ 1 V)	Output Section: Input Impedance (from ext. filter): 146 kΩ Output Amplifier Gain: 80 dB Output Attenuator Range: 60 dB in 10 dB steps Accuracy of steps ± 0.1 dB relative to the x1 position at 1 kHz	Overload Indicators: Overload indicators for input and output amplifiers Lamps light for overload pulse longer than 0.2 msec, remain lit for min. 0.5 sec Relay output of overload function
Noise: With max. amplification and input short circuited. Center frequency ≥ 2 x bandwidth. Bandwidths 3.16 to 100 Hz: < 0.6 μV Bandwidths 316 to 1000 Hz: < 1.2 μV A, B and C weighting: < 2 μV D weighting: < 5 μV Linear (2 Hz to 200 kHz): < 7 μV	Meter: Full Scale deflection: 10 V RMS at Recorder Output (linear) 31.6 V RMS at Recorder Output (logarithmic) Scale range (log mode): 50 dB Averaging times: “Fast” and “Slow” according to IEC 179 and 0.1, 0.3, 1, 3, 10, 30, 100 sec Scales: Interchangeable, for direct reading of voltage, dB, dB Lin/Log, sound level, acceleration, power spectral density, absorption coefficient, dB/dBm, using different transducers and accessories. Scales can be custom made to order.	Reference Voltage (built-in oscillator): 50 mV RMS at 1000 Hz sinusoidal Amplitude stability: ± 0.2 dB Frequency stability: ± 2% Distortion: < 2%
Constant Bandwidth Filters: Type: Double 2 pole butterworth 3.5 dB Bandwidths (Effective noise bandwidths): 3.16 Hz, 10 Hz, 31.6 Hz, 100 Hz, 316 and 1000 Hz 3 dB bandwidth = effective noise bandwidth × 0.96 Accuracy of bandwidths: ± 5% Shape factor of filter characteristic: $\frac{BW_{60 \text{ dB}}}{BW_{3 \text{ dB}}} \leq 7$	Recorder Output: AC: Output voltage: 10 V RMS at full deflection (linear meter mode) Max. voltage: 50 V Peak Output impedance: < 50 Ω in series with 32 μF Load impedance: ≥ 12 kΩ Frequency of Output Signal: 30 kHz (in 316 Hz and 1000 Hz bandwidth) – 750 Hz (3.16 – 100 Hz bandwidth) – signal frequency in linear and A, B, C and D filter mode	B & T Program: Automatic switching of bandwidth B and averaging time T (see text). Input socket for external control

Bilag 5 Tekniske specifikationer

Specifications continued

BFO SECTION																																		
Frequency Range: 2 Hz to 200 kHz (Identical to analyzer)	adjustable. Output impedance 5 Ω Max. Output Power: 0.75 W at 140 Ω load	pressor voltage within 1 dB) Frequency Response: ± 0.3 dB (2 Hz to 200 kHz) Compressor Input Voltage: min. 0.5 V Compressor Speed: 3 – 10 – 30 – 100 – 300 – 1000 dB/sec																																
Accuracy of Output Frequency: see frequency read-out section	Distortion: < 0.015% (20 Hz to 50 kHz) < 0.03% (20 Hz to 100 kHz)																																	
Amplitude Linearity: ± 0.2 dB (2 Hz to 200 kHz)	Noise: < -70 dB																																	
Output Voltage: Attenuator Output: 100 μV to 10 V variable continuously and in 10 dB steps. Output impedance is 600 Ω in all attenuator positions. Accuracy of steps ± 0.1 dB relative to 10 V position Direct Output: 0 to 10 V continuously	Hum: < -80 dB	Reference Voltage: When the knob "BFO REF. Signal" is pressed the frequency of the BFO output signal is changed to 100 Hz in the x 0.1 range, to 1 kHz in the x 1 range and to 10 kHz in the x 10 range. The output voltage having the value set by the output attenuator and output voltage knobs																																
FREQUENCY READ-OUT																																		
Frequency Counter: Six Digits Accuracy: ± 1 on last digit + 20 ppm of tuning frequency Counting Time: 0.1 sec (five digits) and 1 sec	Sensitivity of VCO with external mechanical drive: Full scale sweep: 30 rotations with sweep drive gear in 1:1 300 rotations with sweep drive gear in 1:10	Frequency Marker: Output for event marker on recorder for exact chart calibration																																
Frequency Scale: Lin. and Log scale	Frequency Accuracy: 0.3% of scale range (lin scale) 3% of reading + 25 ppm of scale range (log scale)	Frequency Stability: Measured over 8 hours after 1 hour warm-up																																
External Frequency Control: Sensitivity of VCO with external voltage: Full scale sweep: 0 to 10 V DC Lin scale x 0.1 : 0.2 kHz/V Lin scale x 1 : 2 kHz/V Lin scale x 10 : 20 kHz/V Log scale: 0.3 decade/V corresponding to 1 octave/V	Linearity of Voltage to Frequency conversion: 0.03% of scale range (Lin scale)	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th colspan="3">Low end of scale</th></tr> <tr> <th>Scale</th><th>2 Hz</th><th>20 Hz</th><th>200 Hz</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Lin</td><td>0.15 Hz</td><td>1.5 Hz</td><td>15 Hz</td></tr> <tr> <td>Log</td><td>0.15 Hz</td><td>1.5 Hz</td><td>15 Hz</td></tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th><th colspan="3">High end of scale</th></tr> <tr> <th>Scale</th><th>2 kHz</th><th>20 kHz</th><th>200 kHz</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Lin</td><td>1 Hz</td><td>10 Hz</td><td>100 Hz</td></tr> <tr> <td>Log</td><td>4 Hz</td><td>40 Hz</td><td>400 Hz</td></tr> </tbody> </table>		Low end of scale			Scale	2 Hz	20 Hz	200 Hz	Lin	0.15 Hz	1.5 Hz	15 Hz	Log	0.15 Hz	1.5 Hz	15 Hz		High end of scale			Scale	2 kHz	20 kHz	200 kHz	Lin	1 Hz	10 Hz	100 Hz	Log	4 Hz	40 Hz	400 Hz
	Low end of scale																																	
Scale	2 Hz	20 Hz	200 Hz																															
Lin	0.15 Hz	1.5 Hz	15 Hz																															
Log	0.15 Hz	1.5 Hz	15 Hz																															
	High end of scale																																	
Scale	2 kHz	20 kHz	200 kHz																															
Lin	1 Hz	10 Hz	100 Hz																															
Log	4 Hz	40 Hz	400 Hz																															
GENERAL																																		
Operating Temperature: 10° to 40°C (50° to 104°F)	Accessories Included: 2 coaxial cables AO 0013 * { 1 control cable (2305) AQ 0027 or 1 control cable (2307) AQ 0035 2 coaxial plugs JP 0101 1 7-pin plug JP 0703 1 8-pin plug JP 0802 1 voltage and dB scale (fitted on delivery) SA 0051	1 power cord Various lamps and fuses																																
Power Supply: 100 – 115 – 127 – 150 – 220 – 240 V (± 10%) 50 to 400 Hz, 50 W	1 dB scale SA 0052 1 log scale SA 0053 1 P.S.D. scale SA 0055 1 scale for 1" microphone SA 0056 1 scale for 1/2" microphone SA 0057 1 scale for acceleration measurement SA 0058 (6 to 17 mV/g) 1 Log/Lin dB scale SA 0059 1 uncalibrated scale (0 to 100) SA 0087 1 flexible shaft UB 0041	Additional Scales Available: SA 0054: Absorption Coefficient scale SA 0060: 0.8 to 2.6 mV per N/m² microphone scale SA 0083: 0.28 to 1.6 mV per N/m² microphone scale SA 0084: dB/dBm scale SA 0142: 1.7 to 6 mV/g accelerometer scale SA 0143: 17 to 60 mV/g accelerometer scale SA 0144: 60 to 170 mV/g accelerometer scale Scales can be custom made to order																																
Cabinet: Supplied as model A (light-weight metal cabinet), B (model A in mahogany cabinet) or C (as A but with flanges for standard 19" racks)																																		
Dimensions (A model): Height: 48 cm (19 in) Width: 38 cm (15 in) Depth: 20 cm (8 in)																																		
Weight: 21 kg (46.7 lbs)																																		
		*) Specify Level Recorder Type 2305 or Type 2307 when ordering																																

B&K Accelerometer Type 4393

Calibration Chart for Accelerometer Type 4393



Serial No. 1731853 Brüel & Kjær

Reference Sensitivity at 159,2Hz ($\omega = 1000\text{s}^{-1}$),
 100ms $^{-2}$ and 23 °C
 Charge Sensitivity* 0,219 pC/ms $^{-2}$ or 3,13 pC/g
 Voltage Sensitivity* (incl. AO 0283) 0,412 mV/ms $^{-2}$ or 4,04 mV/g
 (Voltage Preampl. Input Capacitance: 3,5pF)

Capacitance (incl. AO 0283) 775 pF

Typical Capacitance of cable AO 0283 132 pF

Maximum Transverse Sensitivity (at 30Hz, 100ms $^{-2}$) 0,5 %

Typical Undamped Natural Frequency 85kHz

Typical Mounted Resonance Frequency 55kHz
 See reverse side of chart for frequency response curve

Typical Transverse Resonance Frequency, using Exciter Table 4290, with accelerometer mounted on a titanium cube by a M3 steel screw, mounting torque 0,6Nm and greased surfaces: 18kHz

Polarity is positive on the center of the connector for an acceleration directed from the mounting surface into the body of the accelerometer

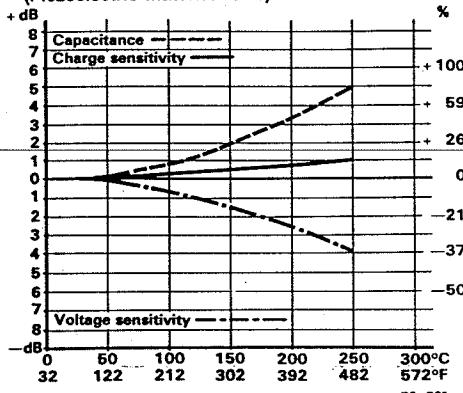
Resistance minimum 20000MΩ at room temperature

Date: 93-04-14 Signature: O.M.

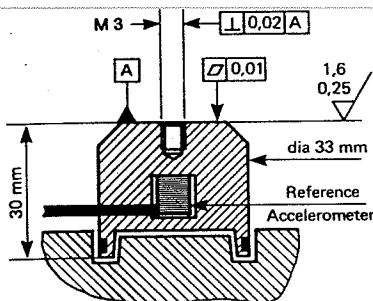
1 g = 9,807ms $^{-2}$ or 10ms $^{-2}$ = 1,02g

* This calibration is traceable to the National Bureau of Standards Washington D.C.

Typical Temperature Sensitivity Deviation: (Piezoelectric Material PZ23)



Schematic Drawing of Exciter 4290: (Modified laboratory reference)



841464

Material: Beryllium

Mass of Exciter table: 38 gram

Environmental:

Humidity: Welded, Sealed

Temperature Range: -74 to +250°C (-100 to +482°F)

Max. Shock Acceleration: 250000 ms $^{-2}$ peak

Typical Magnetic Sensitivity (50Hz - 0,03 T):

30ms $^{-2}/T$

Typical Acoustic Sensitivity: 0,04ms $^{-2}$ at 154dB SPL (2

- 100Hz)

Typical Base Strain Sensitivity (at 250με in base plane): 0,005ms $^{-2}/\mu\epsilon$

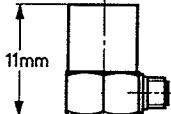
Typical Temperature Transient Sensitivity (3Hz LLF):

5ms $^{-2}/^{\circ}\text{C}$

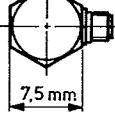
Specifications obtained in accordance with ANSI S2.11-

1969

Physical:



Electrical Connector: Coaxial M3



Material: Titanium, ASTM Grade 2

Sensing Element: Piezoelectric, type PZ23

Weight: 2,2 gram excl. cable

Construction: Delta Shear

Mounting Thread: M3

Mounting Stud: M3 × 8mm, steel

Mounting Surface Flatness: <3μm

Mounting Torque: Normal 0,6Nm. Max. 1,0Nm

Min. 0,3Nm.

Seismic Mass: 0,67 gram

Center of Gravity of Seismic Mass: 7,1mm from

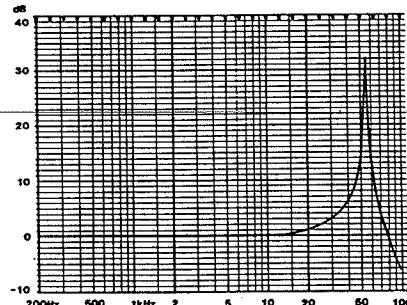
mounting surface on central axis

Center of Gravity of Accelerometer: 5,4mm from

mounting surface on central axis

For further information see B&K "Piezoelectric Accelerometer and Preamplifier" handbook

Typical Frequency Response Curve of 4393 (Corrected for response of 4290):



Mounting Technique:

Examine the mounting surface for cleanliness and smoothness.

If necessary, machine surface to tolerances shown in schematic drawing of Calibration Exciter 4290.

Fasten the 4393 using a 3mm stud. Take care not to exceed the recommended mounting torque and that the stud does not bottom in the mounting holes.

A thin film of oil or grease between the accelerometer and the mounting surface helps achieve good contact and improves mounting stiffness.

For other types of mounting, see B&K "Piezoelectric Accelerometer and Preamplifier" handbook.

B&K Force Transducer Type 8203



Brüel & Kjær

Serial No.....1539165.....

Reference Sensitivity at 159,2 Hz ($\omega = 1000 \text{ s}^{-1}$) and
room temperature: 362 pC/N

Max. Static Forces:
Tension: 250 N
Compression: 1000 N
Compression without preloading nuts: 1250 N

Linearity: typically better than $\pm 1\%$ of max. force or
 $\pm 5\%$ of measured force, whichever is smaller.

The frequency response curve for constant applied force shown on the attached sheet is obtained by mounting type 8203 on a vibration exciter and loading it by a mass of 2 grams (1,35 grams + accelerometer type 4374, 0,65 grams). By keeping a constant acceleration on the mass the force to the transducer is kept constant.

Polarity: Positive for compression

Leakage Resistance: $> 10^5 \text{ M}\Omega$ at room temperature

Capacitance: 9 pF (without cable)

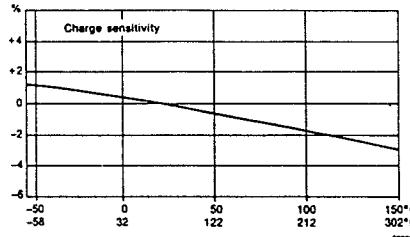
Note: The preloading nuts are assembled with a force of approx. 1000 N measured as 3600 pC output from the 8203. If disassembled and reassembled the same force should be applied. (A mounting torque of 0,6 Nm may be used).

Date 91.12.13..... Signature J. Ul.

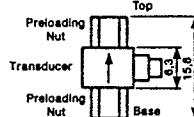
BC 0189-13

**Calibration Chart for
Force-Transducer
Type 8203**

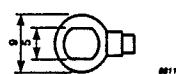
Typical Temperature Sensitivity Error in % rel. to the Reference Value.



Physical:



Weight: 3,2 grams
Material: Titanium, ASTM Grade 2
and Stainless Steel, AISI 303
Mounting Thread: M3

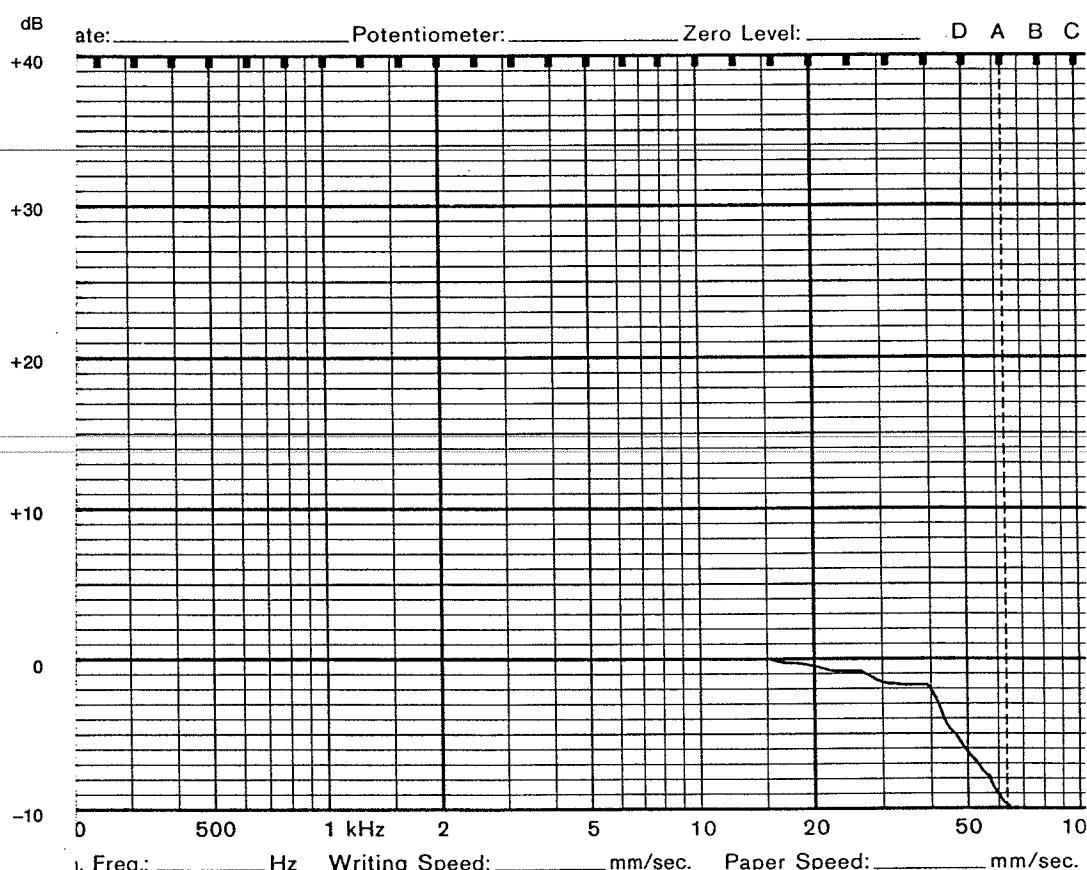


Electrical Connector:
Coaxial M3

Environmental:
Humidity: Sealed
Temperature Range: -196° to + 150°C
(-321 to +302°F)
Typical Magn. Sensitivity: 0,1 N/T
Max. Shock Acceleration: 10000 g* $\approx 100.000 \text{ m/s}^2$
Max. Vibration (peak): 1000 g* $\approx 10000 \text{ ms}^{-2}$
Max. Base Bending Sensitivity
0,002 N/µstrain with preloading nuts

For further information see B & K "Piezoelectric Accelerometer and Preamplifier" Handbook.

* 1 g = 9,807 m/s² or 10 ms⁻² = 1,02g



B&K Signal Analyzer Unit Type 2035

Analysatoren er et "samlesæt" bestående af:

1 stk Signal Analyzer Unit Type 2035 - selve analysatoren - med en 12" skærm, et tastatur samt et disketterrev for 3.5" disketter.

1 stk 100 kHz/Multichannel Zoom Processor Type 3157 - muliggør at der kan arbejdes med udsnit af frekvensspektret.

2 stk 100 kHz Input Module Type 3020 - med de nødvendige tilslutningsmuligheder for hammer, accelerometer o lign.

1 stk Generator & Sampling Module Type 3106 - kan generere forskellige former for svingninger.

Tekniske specifikationer for hver enkelt del findes i det følgende. Se i øvrigt [B&K Manual,92].

<p>Signal Analyzer Unit Type 2035 is a mainframe unit fitted with a 12" raster scan screen, a disk drive and a keyboard. It houses the signal and display processors, the memories and hardware needed for analysis and system control.</p>	<p>Parallel Poll PP0 Device Clear DC1 Device Trigger DT1 Controller C1, C2, C28</p>	<p>GENERAL: Cabinet: Supplied as model A (lightweight metal cabinet), or C (as model A but with flanges for standard 19" racks) Dimensions (A-cabinet without feet): Height: 310.4mm (12.2in) Width: 430mm (16.9in) Depth: 500mm (19.7in) Weight: 34kg (75lb) without modules 36kg (79lb) when fitted with: 2 25kHz Input Modules Type 3019 Generator & Sampling Module Type 3106 25kHz Zoom Processor Type 3156</p>
<p>DISPLAY: Type: Built-in 12" TV-raster scan monitor Picture Resolution: 290×512 dots, where graph area is 512 or 401 dots wide Scale Lines: Horizontal scale lines and x-axis with check marks</p>	<p>RS-232-C INTERFACE: (Only output) Conforms to EIA standard RS-232-C (equivalent to CCITT V.24). Coupled as a "Data Terminal Equipment" (DTE) Connector: 25pin D-range (male) Mode of operation: Full duplex Number of data bits: 8/7 Number of stop bits: 1/2 Baud rates: 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 19200 Parity: None/Even/Odd Synchronization methods: Hardwired/ (X-on/X-off)</p>	
<p>MASS STORAGE: Built-in floppy disk drive for storage of measured data, setups and programs Data Media: Removable 3-1/2 inch dual-sided, high-density micro-floppy disk Data Format: Compatible with PC/MS-DOS from version 3.2, except subdirectories Formatted Capacity: 1.44Mbytes File List: Contains disk identification, with user-definable disk name and file list sorting key. Each file is identified by user-definable file name, data type, size, and time of store</p>	<p>INPUT/OUTPUT: Serial Interface 1 and 2: Up to two 2816 can be connected directly to 2035 using 1 cable AO0370 per 2816 Simulator Unit: 7-pin DIN socket for powering the simulator unit ZZ0220 Keyboard: 5-pin socket for connecting a standard "QWERTY" keyboard NP0028 Video Output: For video hard copy units, recorders and monitors. Composite video signal, 1V peak-to-peak into 75Ω Vertical Scan Frequency: 50Hz Output Impedance: 75Ω</p>	<p>POWER REQUIREMENTS: Voltage: 90-140V AC or 180-264V AC Frequency: 47.5-420Hz Power Consumption: 300-350VA when fitted with: 2 25kHz Input Modules Type 3019 Generator & Sampling Module Type 3106 25kHz Zoom Processor Type 3156</p>
<p>IEEE/IEC INTERFACE: Conforms to IEEE-488.1 and IEC625-1 standards Functions Implemented: Source Handshake SH1 Acceptor Handshake AH1 Talker T5 Listener L3 Service Request SR1 Remote/Local RL1</p>		<p>Technical Documentation: Vol. 1: Guided Tours Vol. 2: Operation and Reference Vol. 3: User-definable Functions Vol. 4: IEEE/IEC Interface ACCESSORIES AVAILABLE: Rack Mounting Flanges KS0027 Modification to Safety Class I of IEC601-1 WH2692</p>

B&K 100 kHz Input Module Type 3020

FREQUENCY RANGE: 3019: 0 to 25.6 kHz 3020: 0 to 102.4 kHz	COMMON-MODE REJECTION: Direct Input: 0 to 1 kHz: 80 dB for 1mV to 800mV input range 60 dB for 1 to 80V input range 1 kHz to 25.6 kHz: 60 dB for 1mV to 800mV input range 50dB for 1 to 80V input range 25.6 kHz to 102.4 kHz: 50dB for 1mV to 800mV input range 40dB for 1 to 80V input range Acc. Charge Input: 0 to 102.4 kHz: 40 dB	SAMPLING: Maximum Rate: 65.6 kHz (3019) or 262.5 kHz (3020) A/D Conversion: 14bit
DIRECT INPUT: BNC socket Maximum Peak Input Voltage: 35 ranges from 1mV to 80V in a 1, 1.5, 2, 3, 4, 6, 8 sequence Single-ended or differential Input Impedance: $1M\Omega // <100pF$	CROSSTALK: (Voltage source: 50 Ω , Charge source: 1 nF) Between any two Connectors on a Module: -100 dB up to 25.6kHz -80 dB up to 102.4kHz Between any two Input Modules: -120 dB	OVERLOAD DETECTION: On both common-mode and differential signals; applied before filters
Coupling: 3019: DC 3020: DC or AC Input zeroing for automatic DC-offset compensation High-pass Filters: 0.7Hz or 22.4Hz Maximum Input Voltage: 250V RMS Max. Induced Common-mode Voltage: 10V peak for maximum peak input voltage from 1mV to 800mV 42V RMS for maximum peak inputs from 1V to 80V Supply for Photoelectric Probe MM0012 and MM0024: +8V DC on inner shield (short-circuit proof)	ATTENUATOR LINEARITY: $\pm 0.1\text{dB}$	NOISE: At least 80 dB below the maximum peak input voltage/ $\sqrt{1/3 \text{ octave}}$, or $1\mu\text{V}/\sqrt{1/3 \text{ octave}}$, whichever is greater up to 20kHz 1/3 octave band
PREAMP INPUT: Standard B&K 7-pin preamplifier input Maximum Peak Input Voltage: 35 ranges from 1mV to 80V in a 1, 1.5, 2, 3, 4, 6, 8 sequence Microphone Polarization: 0, 28 or 200V from 2M Ω source Heater Voltage: +6V (at 200mA) from 45 Ω source +12V (at 200mA) from 15 Ω source High-pass Filters: 0.7Hz or 22.4Hz Acc. Charge Input: TNC connector Maximum Peak Input Charge: 42 ranges 0.1 pC to 80 nC in a 1, 1.5, 2, 3, 4, 6, 8 sequence Single-ended or floating High-pass Filters: 0.09Hz, 0.7Hz or 22.4Hz Max. Induced Common-mode Voltage: 10V peak for maximum input setting 0.1pC to 8nC, 1V peak for maximum input setting 10nC to 80nC	HIGH-PASS FILTERS: 0.09Hz, -3dB: Slope 6dB/octave 0.7Hz, 0.1dB ripple cutoff frequency: Slope 18dB/octave -3dB frequency 3019: 0.5Hz 3020: 0.3Hz 22.4Hz, 0.1dB ripple cutoff frequency: Slope 18dB/octave -3dB frequency 3019: 16.1Hz 3020: 7.0Hz	DYNAMIC RANGE: All distortion (intermodulation and harmonic) and spurious at least 80dB below maximum input for maximum peak input $>10\text{pC}$ or $>10\text{mV}$
SAFETY: The system complies with safety class II of IEC 348. Safe operation in accordance with IEC 348 is obtained if the voltage of the signal ground, relative to earth, does not exceed 42V RMS (sine). To ensure safe operation in accordance with IEC 348 at higher voltages, the user must limit all input currents to 0.7mA peak.	LOW-PASS FILTERS: 6.4kHz, 0.1dB ripple cutoff frequency: Slope 18dB/octave -3dB frequency 3019: 8.9kHz 3020: 15.4kHz	OVERALL FREQUENCY RESPONSE: $\pm 0.15\text{dB}$ from lower frequency limit (0.7 or 22.4Hz) or 0Hz to upper frequency limit (6.4kHz, 12.8kHz, 25.6kHz, 51.2kHz or 102.4kHz)
	ANTIALIASING FILTER: Cutoff Frequency: 3019: 12.8kHz or 25.6kHz 3020: 51.2kHz or 102.4kHz The filter provides at least 80 dB attenuation of those input frequencies which can cause aliasing The filter can be bypassed	AMPLITUDE LINEARITY: $\pm 0.1\text{dB}$ or $\pm 0.015\%$ of maximum input, whichever is greater, measured using a sine wave For measurements more than 40dB below maximum input the measuring sine wave is accompanied by another sine wave of a lower frequency, having an amplitude not less than 20 dB below maximum input
		AMPLITUDE MEASUREMENT STABILITY: Voltage: $\pm 0.1\text{dB}$ Charge: $\pm 0.15\text{dB}$
		CHANNEL TO CHANNEL MATCH: Maximum Gain Difference: 0.1dB from Lower Frequency Limit $f_L = (0.7$ or 22.4Hz) or 0Hz, to Upper Frequency Limit $f_U = (6.4\text{kHz}, 12.8\text{kHz}, 25.6\text{kHz}, 51.2\text{kHz}$ or 102.4kHz)
		Maximum Phase Difference: $1.1^\circ - 0.1^\circ \times (f/f_L)$ from f_L to $10 \times f_L$ 0.1° from $10 \times f_U$ or 0 to $0.1 \times f_U$ f/f_U from $0.1 \times f_U$ to f_U
		ACCESSORIES INCLUDED: 1 TNC shielding plug DD0424 1 Front panel kit (3019) UA1139 1 Front panel kit (3020) UA1141

B&K Generator & Sampling Module Type 3106

<p>These features are valid only in conjunction with 7649 software</p> <p>MAIN FEATURES:</p> <ul style="list-style-type: none"> Frequency Range: Two generator modes: 25.6 kHz 102.4 kHz OUTPUT WAVEFORMS: Sine, Dual-sine, Swept Sine, Dual-swept Sine, Random, Multisine, Pseudo-Random, Periodic Random, Pulse and User-definable waveform Buffer Memory: 64 k word for waveform specified in time or frequency domain D/A Converter: 16 bit Analogue Smoothing Filters: At least 84dB attenuation of mirror-frequencies Cutoff Frequency: 25.6 kHz or 102.4 kHz Pink Filter: -3dB/octave attenuation from 22.4Hz to 102.4kHz Gain: 0dB at 1kHz Output Level: (load >10kΩ, <1nF) -5V to +5V peak (AC+DC) AC LEVEL RANGE: <ul style="list-style-type: none"> Sine: 1μV to 3.5VRMS Random: 1μV to 1.0 VRMS Multisine: 1μV to 2.5VRMS Pseudo-random: 1μV to 1.8VRMS Periodic Random: 1μV to 1.4 VRMS Pulse: 1μV to 5V peak Selectable Dc Offset: -5V to +5V Output Differential Impedance: 50Ω Maximum Output Current: ±10mA peak (short-circuit proof) Output Type: Floating or single-ended Maximum Common Mode Voltage: ±1V ACCURACY: <ul style="list-style-type: none"> Relative Amplitude Accuracy: ±0.1dB re. level at 1V from 1mV to 5V Frequency Accuracy and Stability: ±0.01% DC Offset Error: automatic compensation. Max. error (within 1hour, ±5°C): 0.1mV or 50dB below peak signal level, whichever is greater PINK FILTER: <ul style="list-style-type: none"> Gain Accuracy: ±0.1dB at 1kHz Frequency Response: ±0.2dB from 22.4Hz to 102.4kHz COMMON MODE REJECTION: <ul style="list-style-type: none"> 0 to 1kHz: 60dB 1kHz to 102.4kHz: 40dB CONTROL: <ul style="list-style-type: none"> BURST MODE: For sine tone burst and burst random Burst Width: 61μs to 64s (resolution 25 kHz mode: 15μs; 100 kHz mode: 4μs) Burst Repetition: 1 to 9999, or continuous Repetition Period: 488μs to 64s (resolution: 25 kHz mode: 15 μs; 100 kHz mode: 4μs) PATTERN REPETITION: For single-swept sine, pseudo-random, multisine, periodic random, pulse, user-definable waveforms 	<p>Number of Pattern Repetitions: 1 to 9999 or continuous. (For single swept sine with log bi-directional sweep and swept dual-sine, repetition is only continuous)</p> <p>SOFT START AND STOP: (25.6 kHz mode only): Ramps the signal level up/down exponentially on start/stop</p> <p>Start/Stop Time: 0 to 99.9s, resolution 0.1s</p> <p>Start/Stop Range: 0 to 80 dB, resolution 1 dB</p> <p>TRIGGER: To synchronize recording with the generator</p> <p>Swept Sine: At start of sweep</p> <p>Pulse: On the positive slope</p> <p>Multisine, Pseudo-random, repetitive User-definable waveform: At start of each sequence</p> <p>Periodic Random: At start of last sequence of each period</p> <p>Burst Mode: At start of burst</p> <p>PRE-DEFINED WAVEFORMS:</p> <p>SINE:</p> <ul style="list-style-type: none"> Frequency Range: 1mHz to 102.4kHz Frequency Setting Resolution: 1mHz Frequency Accuracy: ±(0.01% +1mHz) Absolute Amplitude Accuracy: ±0.05dB at 992Hz, 1VRMS, 20°C ±0.1dB at 992Hz, 1mV to 3.5VRMS Frequency Response: ±0.1dB re. 992Hz 1mHz to 25.6kHz ±0.2dB re. 992Hz 25.6kHz to 102.4kHz Harmonic & Spurious Distortion Products: (excl. DC): at least 80dB below signal level or 1μV, whichever is greater <p>DUAL-SINE: Two sine waveforms with individually selectable frequency and level, as for sine above.</p> <p>SWEEP SINE:</p> <ul style="list-style-type: none"> Linear or logarithmic sweep Sweep Range: <ul style="list-style-type: none"> Linear sweep or logarithmic uni-directional sweep: 1mHz to 102.4kHz (resolution 1mHz) Logarithmic bi-directional sweep: 10 Hz to 102.4 kHz (resolution 1 mHz) Sweep Rate: <ul style="list-style-type: none"> Linear sweep: 1mHz/s to 999kHz/s (resolution 1mHz/s) Log uni-directional sweep: 0.02 dec/s to 9999dec/s (resolution 0.02dec/s) Log bi-directional sweep: 25.6 kHz mode: 0.1 dec/s to 9999 dec/s (resolution 0.02 dec/s) 102.4 kHz mode: 2 dec/s to 9999 dec/s (resolution 0.02 dec/s) Sweep Direction: Up or down Sweep Mode: Uni- or Bi-directional Repetition: Single, 1 to 9999 or continuous (for bi-directional log sweep only continuous) <p>DUAL-SWEPT SINE: Choice of two signal combinations:</p> <ul style="list-style-type: none"> One fixed sine and one swept sine Two swept sines with fixed frequency difference <p>Sweep Range:</p>	<p>Linear sweep: 1 mHz to 102.4 kHz (resolution 1 mHz)</p> <p>Logarithmic sweep: 10 Hz to 102.4 kHz (resolution 1 mHz)</p> <p>Sweep Rate:</p> <p>Linear sweep: 1 mHz/s to 999 kHz/s (resolution 1 mHz/s)</p> <p>Logarithmic sweep: 25.6 kHz mode: 0.1 dec/s to 9999 dec/s (resolution 0.02 dec/s) 102.4 kHz mode: 2 dec/s to 9999 dec/s (resolution 0.02 dec/s)</p> <p>Repetition: Continuous</p> <p>Frequency Difference: 1mHz to 9kHz (resolution 1mHz)</p> <p>RANDOM: Random noise, can be band-limited and band-translated to match the selected frequency span (25.6 kHz mode only)</p> <p>Frequency Range:</p> <p>25.6kHz mode: Low-pass or band-pass 14 frequency spans from 3.13 Hz to 25.6 kHz Band-pass centre frequency resolution: 1 mHz</p> <p>102.4 kHz mode: 51.2 kHz or 102.4 kHz low-pass noise.</p> <p>Frequency Response: Flat ±0.2dB within selected span</p> <p>Generator Type: Pseudo-random</p> <p>Sequence Length: 8192s minimum</p> <p>Amplitude Distribution: Symmetrical Gaussian</p> <p>Phase Distribution: Uniform</p> <p>Crest Factor: Selectable from 2.5 to 6 (25.6 kHz low-pass frequency span only)</p> <p>Burst Mode: Selectable width, number and period (25.6 kHz mode only)</p> <p>PSEUDO-RANDOM: Waveform can be band-limited and band-translated to match the selected frequency span. Number and spacing of spectral lines can be selected to coincide with analysis lines. Phase spectrum is adjusted to achieve Symmetrical Gaussian amplitude distribution.</p> <p>Frequency Range: As Random</p> <p>Number of Spectral Lines: Constant line spacing: 50, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200, 6400</p> <p>Frequency Response: Flat ±0.2dB within selected span</p> <p>MULTISINE: The same as Pseudo-random, except that the phase spectrum is adjusted to minimize the crest factor. The spectral line spacing can be constant within the selected frequency span, or it can be relative to the octave centre frequency but constant within the octave with 44 lines per octave</p> <p>CONSTANT LINE SPACING:</p> <p>Frequency Range: As Random</p> <p>Crest Factor: <2</p> <p>RELATIVE LINE SPACING (25.6 kHz mode only)</p> <p>Frequency Range: From 1 to 14 octaves from 1.6 Hz to 20 kHz octave</p>
--	---	--

<p>PERIODIC RANDOM: (25.6 kHz mode only) Sequences of pseudo-random signals. Number of periods of identically pseudo-random signals are selectable (same number of periods in each sequence)</p> <p>Frequency Range: Number of periods <10: 25.6 kHz low-pass Number of periods ≥10: Low-pass or band-pass, 14 frequency spans from 3.13 Hz to 25.6 kHz. Band-pass centre frequency resolution: 1 mHz</p> <p>Number of Spectral Lines: 50, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200</p> <p>Number of Periods: 4 to 99</p> <p>PULSE:</p> <p>Waveforms: Rectangular, Hanning or Gaussian</p> <p>Pulse Width:</p> <p>25.6 kHz mode: From 15 µs to 64 s (resolution 15 µs)</p> <p>102.4 kHz mode: From 4 µs to 64 s (resolution 4 µs)</p> <p>Width can be selected to match one analysis sample period</p> <p>Repetition Time:</p> <p>25.6 kHz mode: From 46 µs to 64 s (resolution 15 µs)</p> <p>102.4 kHz mode: From 11 µs to 64 s (resolution 4 µs)</p> <p>Analogue Smoothing Filter: Can be bypassed</p> <p>USER-DEFINABLE WAVEFORMS:</p> <p>Frequency Range: 25.6 kHz mode: 14 frequency spans from 3.13 Hz to 25.6 kHz</p> <p>102.4 kHz mode: 51.2 kHz to 102.4 kHz</p> <p>USER-DEFINABLE TIME FUNCTIONS: Load and replay time functions up to 64Ksamples. Complex frequency spectra can be transformed to time and replayed. The time function can be repeated.</p>	<p>Off-time: 0 to 64 s (resolution 4 µs)</p> <p>Analogue Smoothing Filter: Can be bypassed</p> <p>USER-DEFINABLE AUTOSPECTRUM: With selectable phase spectrum is transformed to a time sequence up to 2 Ksamples</p> <p>Phase Spectrum:</p> <p>25.6 kHz mode: 0°, pseudo-random or periodic random</p> <p>102.4 kHz mode: 0°, or pseudo-random</p> <p>Number Of Spectral Lines: 64, 128, 256, 512, 1024</p> <p>Time Sequence: 128, 256, 512, 1024, 2048 samples</p>	<p>Sampling Input/output: BNT connector for output of the system sampling frequency or, when set to external sampling, input of the external sampling frequency</p> <p>Sampling Input: Maximum Frequency: 262.5 kHz</p> <p>Threshold Level: Adjustable from 0.1V to 5V (factory setting 1.2 V)</p> <p>Input Impedance: 50Ω (>100 kΩ selectable internally)</p> <p>Maximum Input: 5 V RMS @ 50 Ω, 15 V RMS @ >100 kΩ</p> <p>When set to external sampling, all absolute frequency values in the 3550 system must be multiplied by a factor c: c = Actual external sampling frequency/262.144 kHz</p> <p>Sampling Output: Frequency: 262.144 kHz</p> <p>Level: TTL compatible</p> <p>Output Impedance: 50Ω (short-circuit proof)</p> <p>TRIGGER INPUT:</p> <p>BNT connector for input of external trigger, measurement start, update and stop</p> <p>Trigger Level: Adjustable from 0.1V to 5V (factory setting 1.2 V)</p> <p>Input Impedance: >100 kΩ</p> <p>Maximum Input: 15 V RMS</p> <p>Supply for Tachometer Probe: MM0012 and MM0024: +8V DC on inner shield (short-circuit proof)</p>
		<p>ACCESSORIES INCLUDED:</p> <p>1 Front Panel Kit UA1145</p>

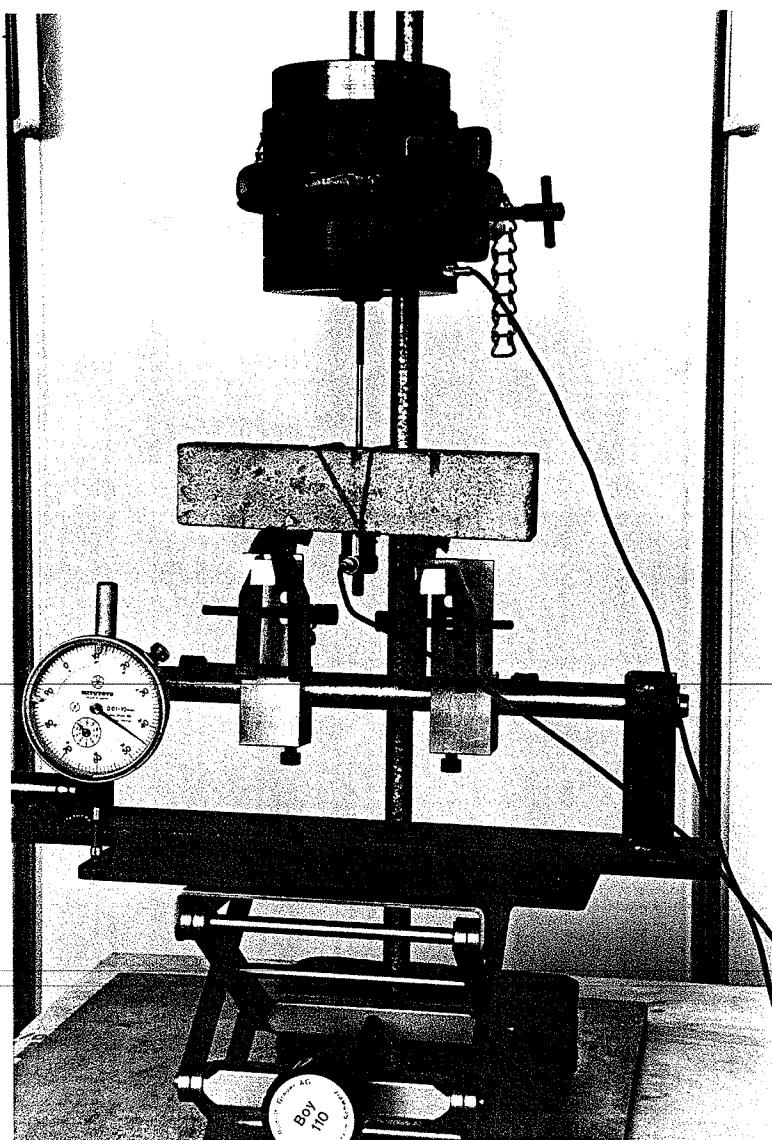
B&K 100 kHz/Multichannel Zoom Processor Type 3157

<p>These specifications are only valid in conjunction with 7640 software</p> <p>MAXIMUM NUMBER OF ACTIVE CHANNELS: Depends on type of input module and the upper frequency limit (baseband or zoom) for the selected frequency span:</p> <table border="1" data-bbox="219 1662 620 1908"> <thead> <tr> <th>Input Module</th><th>Upper Frequency Limit</th><th>Maximum Number of Channels</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>100kHz</td><td>51.2kHz to 102.4kHz up to 51.2kHz</td><td>2 4</td></tr> <tr> <td>25kHz</td><td>12.8kHz to 25.6kHz up to 12.8kHz</td><td>8 16</td></tr> </tbody> </table>	Input Module	Upper Frequency Limit	Maximum Number of Channels	100kHz	51.2kHz to 102.4kHz up to 51.2kHz	2 4	25kHz	12.8kHz to 25.6kHz up to 12.8kHz	8 16	<p>REAL-TIME PROCESSING CAPABILITY: Maximum total input/data rate: 524.288 kHz</p> <p>OUTPUT FREQUENCY RANGE: Baseband or Zoom</p> <p>17 Frequency Spans: from 1.56 Hz to 102.4 kHz with an output sample rate of 2.56 × frequency span for absolute frequency measurements</p> <p>17 Frequency Spans: from 781 mHz to 51.2 kHz with an output sample rate of 10.24 × frequency span for order measurements</p> <p>ZOOM CENTRE FREQUENCY: Resolution: 1 mHz in all frequency spans</p> <p>LOW-PASS FILTERS:</p> <p>Ripple in Pass Band: <0.04 dB</p> <p>Attenuation in Stop Band: >95 dB</p>	
Input Module	Upper Frequency Limit	Maximum Number of Channels									
100kHz	51.2kHz to 102.4kHz up to 51.2kHz	2 4									
25kHz	12.8kHz to 25.6kHz up to 12.8kHz	8 16									

Bilag 6 Fotos af opstillinger

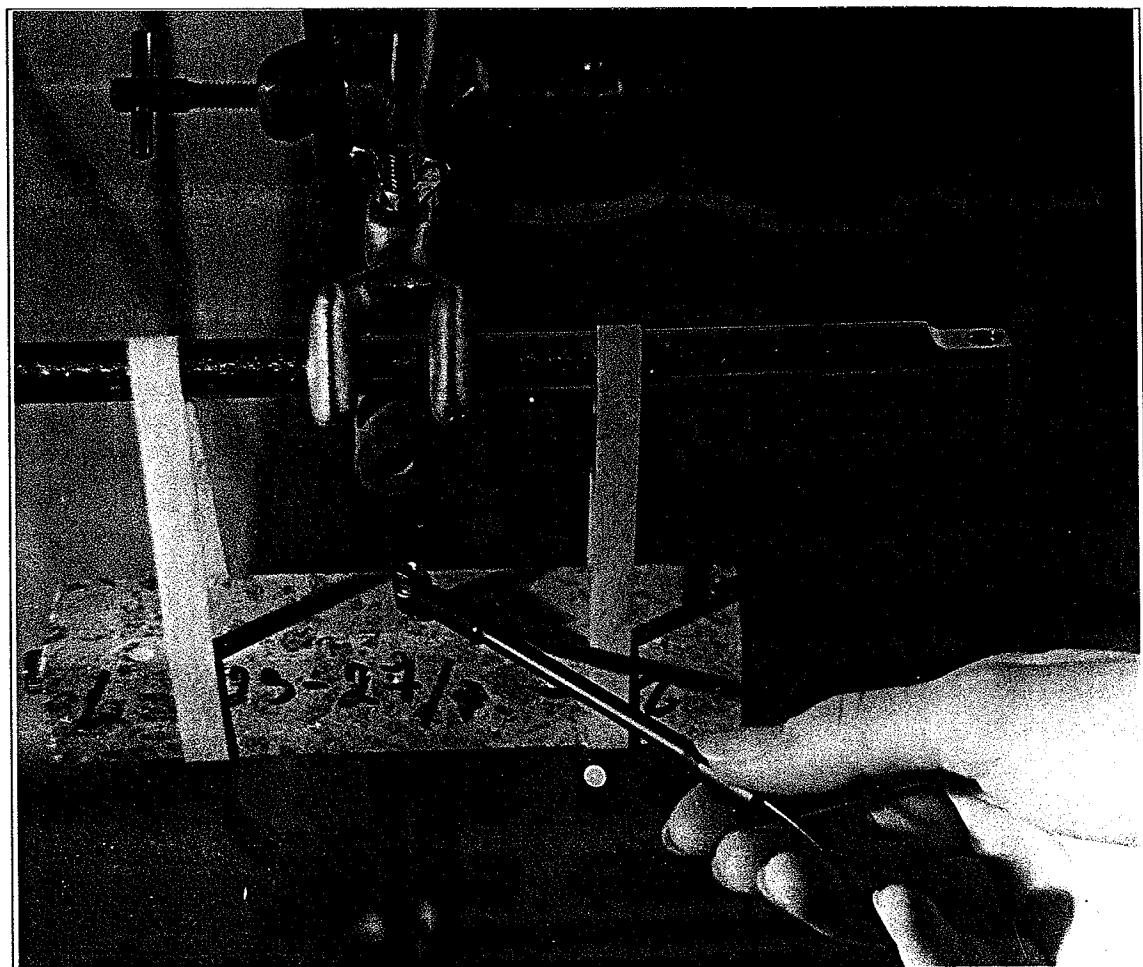
De beskrevne opstillinger illustreres hver med et foto, der ikke suppleres med yderligere kommentarer. I stedet henvises til gennemgangen i afsnit 3.

Opstilling med frekvensgenerator



Figur 36. Opstilling med frekvensgenerator.

Opstilling med signalanalysator



Figur 37. Opstilling med signalanalysator.

Bilag 7 Udstyrsliste - LBM

LBM råder over følgende udstyr, der kan anvendes i forbindelse med bestemmelse af resonansfrekvens, hvor (6.x) og (8.x) henviser til figur 6 henholdsvis figur 8. De nævnte typenumre refererer til Brüel & Kjær-komponenter.

Opstilling med frekvensgenerator:

- Heterodyne Analyzer Type 5122 (frekvensgenerator) incl strømkabel
(pt lånt af Lab f Akustik / Afd f Bærende Konstruktioner, DTU)
 (6.1)
- PM Mini Shaker Type 4810 (vibrator) incl "forlængerpinde"
 (6.2), (6.3)
- 2 koaksialstik for tilslutning af accelerometer og vibrator til frekvensgenerator
- specialfremstillet holder (incl knivblade og skumgummipuder)
 (6.5-7)
- klemmer til at gøre Mini Shaker fast til et stativ
- stativ til ophængning af Mini Shaker, evt med en tung klods som ballast
 (6.13),(6.14)
- elevatorbord
 (6.12)
- måleur + stativ med magnetholder
 (6.9),(6.10),(6.11)
- diverse plader til at lægge under opstillingen
 (6.17),(6.18)

Opstilling med signalanalysator:

-
- Multichannel Analysis System Type 3550 (analysatoren) (8.1)
 - Force Transducer/Impact Hammer Type 8203 (lille hammer) (8.2)
samtidig med miniature-stik (Type JP 0012)
 - Force Transducer/Impact Hammer Type 8202 (stor hammer) med forskellige hoveder
 - 2 stk overgangsstik (TNC Input Adaptorer) (Type JP 0162), der følger med hammer (Type 8202) og accelerometer (Type 4393)
 - stativ til ophængning af emne
 (8.4-5)

Udstyr der kan benyttes til begge opstillinger:

-
- Accelerometer Type 4367 (mikrofon) (6.4)
Bedst til emner med en større masse end 200 g.
 - Accelerometer (Miniature Delta Shear) Type 4393 (mikrofon) (8.3)
samtidig med miniature-stik (Type JP 0012)
 - fedt/bivoks til at sikre kontakt mellem mikrofon (accelerometer) og emne. Bivoks leveres sammen med accelerometer 4393; ellers kan fx universalfedt fra ultralyddudstyr benyttes.
 - Complex Modulus Apparatus Type 3930
 - 2 stk Magnetic Transducer Type MM 0002
 - Capacitive Transducer Type MM 0004

Bilag 7 Udstyrsliste - LBM

- metalbrikker (både med og uden gevindstuds) til at lime på ikke-magnetiske materialer (ved brug af magnetiske transducere eller hvis accelerometer (Type 4367/4393) skal fastholdes vha magnet eller gevind)
- div overgangsstik for tilslutning af miniature-stik til instrument-indgange

Transducere og accelerometre leveres i små trææsker med div tilbehør.

- diverse X-Y recordere. Aktuelt hvis man vil lave en egentlig dataopsamling på med frekvensgenerator som beskrevet i [Type 2010] afsnit 4.

Desuden omtaler Rathkjen [1984]

- udstyr specielt til lavfrekvens-måling.

