



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Rapport

R48:1990

Buller från värmepumpar och kylmaskiner

**Lokalisering av ljudbryggor genom
mätning av mekanisk intensitet**

Sten Ljunggren

Per Sahlin

Melker Johansson

V-HUSETS BIBLIOTEK, LTH



15000

400135454

Bygghälsningsrådet

R48:1990

TEKNISKA HOGSKOLAN I LUND
SEKTIONEN FOR VAG- OCH VATTEN
BIBLIOTEKET

BULLER FRÅN VÄRMEPUMPAR OCH KYLMASKINER

Lokalisering av ljudbryggor genom mätning
av mekanisk intensitet

Sten Ljunggren
Per Sahlin
Melker Johansson

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag
871170-6 från Statens råd för byggnadsforskning
till DNV Ingemansson AB, Stockholm.

REFERAT

Mätningar har utförts i värmepumps- och kylmaskinanläggningar för att lokalisera de kontaktpunkter mellan aggregat och byggnadsstomme där strukturljud överförs. Vid dessa mätningar har använts en tämligen ny mätmetodik med en speciell, vridbar mätprob innehållande två accelerometrar. Proben har monterats på bjälklaget i ett antal punkter runt om den misstänkta ljudbryggan. Tillsammans med en tvåkanalig FFT-analysator har därigenom strukturljudets intensitet i bjälklaget kunnat bestämmas till storlek och riktning i mätpunkterna, vilket gjort det möjligt att identifiera ljudbryggorna. Syftet med föreliggande arbete har varit att närmare studera mätmetodens användbarhet under de ganska besvärliga förhållanden som råder i värmepumps- och kylmaskinanläggningar.

I rapporten redovisas erfarenheter beträffande pejlingsteknik, probplaceringar och vilka kompletterande mätningar som kan vara lämpliga. Vidare ges några exempel på fall där det är svårt eller omöjligt att tillämpa metoden.

I Byggeforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

Denna skrift är tryckt på miljövänligt, oblekt papper.

R48:1990

ISBN 91-540-5206-8

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

gotab Stockholm 1990

INNEHÅLL

	SAMMANFATTNING	5
1	INLEDNING	7
2	GRUNDLÄGGANDE TEORI	8
2.1	Balkar	8
2.2	Plattor	11
2.3	Mekanisk intensitet i balkar.	13
2.4	Mekanisk intensitet i plattor	14
2.5	Inverkan av exponentiella närfält	16
2.6	Inverkan av longitudinella plattvågor	18
2.7	Inverkan av Lambmoder	19
3	MÄTTEKNIK	20
3.1	Grundläggande samband	20
3.2	Använd utrustning	20
4	NÅGRA PRAKTIKFALL	22
4.1	Praktikfall A	22
4.2	Praktikfall B	27
4.3	Praktikfall C	31
4.4	Praktikfall D	35
5	LITTERATUR	39

SAMMANFATTNING

Mätningar har utförts i värmepumps- och kylmaskin-anläggningar för att om möjligt lokalisera de kontaktpunkter mellan aggregat och byggnadsstomme där strukturljud överförs. Vid dessa mätningar har använts en ny, och i sammanhanget tidigare oprövd mätteknik. Denna bygger på en speciell, vridbar mätprob innehållande två accelerometrar. Proben monteras på bjälklaget i ett antal punkter runt om den misstänkta ljudbryggan. Tillsammans med en tvåkanalig FFT-analysator kan därigenom strukturljudets intensitet i bjälklaget bestämmas till storlek och riktning i mätpunkterna, vilket i princip gör det möjligt att identifiera ljudbryggorna.

Syftet med det här redovisade arbetet har varit att närmare studera mätmetodens användbarhet i samband med värmepumps- och kylanläggningar. Dessa anläggningar är speciella, dels genom att det normalt finns en stor mängd potentiella ljudbryggor, och dels genom att det aktuella ljudet består av rena toner. Närvaro av rena toner är betydelsefullt eftersom tidigare erfarenheter indikerar svårigheter att tyda mätresultaten i sådana fall.

I rapporten redovisas resultat från mätningar vid tre anläggningar. Några absolut säkra slutsatser kan naturligt nog inte dras från ett så begränsat underlag, men slutresultatet bedöms ändå som mycket positivt.

I de flesta av undersökta fallen har det sålunda varit möjligt att lokalisera dominerande delkälla. Detta är ett viktigt resultat, som gör metoden intressant från praktisk synpunkt. En förutsättning är dock ett tillräckligt stort antal mätpunkter används och att dessa ligger på en sluten mätlinje. Vid de här redovisade mätningarna har använts 10 punkter vid stora källor och 4 punkter vid mindre källor. Resultaten från enstaka mätpunkter är däremot uppenbart mycket vanskliga att använda.

Problem har uppstått när avståndet mellan mätproben och källan varit stort och när den aktuella plattan (bjälklaget) varit liten. Några problem med små avstånd har däremot inte observerats vid de här aktuella fallen. En viss försiktighet är dock nödvändig i vissa fall, som diskuteras i rapporten.

Resultaten indikerar att det ofta räcker att mäta intensiteten i radiell riktning ut från den misstänkta källan. En pejlingsteknik har testats, men inte visat sig ge bättre resultat än mätning i två ortogonala riktningar; pejlingstekniken är däremot ofta tidsödande.

Diskontinuiteter i plattan har visat sig kunna ge kraftiga reflexer av ett riktat energiflöde. Dessa reflexer har en sådan karaktär att de skulle kunna misstolkas som ett flöde ut från en källa.

Mätningar av bjälklagets punktmobilitet har i två av fallen väsentligt förenklat tydningen av resultatet.

1 INLEDNING

Bullerproblem är inte ovanliga vid värmepumps- och kylmaskininstallationer. Detta förvånar ingen akustiker eftersom dessa installationerna oftast byggs upp kring ett flertal starka bullerkällor, kompressorer, pumpar, värmeväxlare, fläktar etc. Speciellt har strukturljudet, d v s det ljud som överförs direkt från installationerna till byggnadsstommen visat sig kunna ge problem. Problemet kompliceras också av att ljudet kan transporteras från den ursprungliga källan till byggnadsstommen via ett stort antal kontaktpunkter: maskinfötter, pumpfundament, rörinfästningar, uppställningar av värmeväxlare, fläktar m m. Normalt kan man lokalisera den primära ljudkällan, men det kan vara mycket svårt att med konventionell teknik bestämma transmissionsvägen.

Det stora antalet transmissionsvägar är också viktigt ur en annan synvinkel. Normalt upphandlas installationerna med funktionskrav på bullernivån. Oftast är dock flera entreprenörer inblandade på så sätt att exempelvis värmepumpen eller kylmaskinen med kringutrustning installeras av en entreprenör, ventilationsanläggningen av en annan och rörsystemet av en tredje. Svårigheten att bestämma transmissionsvägarna gör då att man får motsvarande svårigheter att klargöra ansvarsförhållandena om bullerproblem uppstår.

En ny mätmetodik, där man enkelt kan lokalisera och inbördes värdera de ljudbryggor där strukturljudet överförs till byggnadsstommen, vore därför värdefull. Idén med detta projekt är att utnyttja tekniken för intensitetsmätningar för att lokalisera kontaktpunkterna. Denna teknik är tämligen välkänd och kan i princip användas för att bestämma styrkan hos en strukturljudkälla. Ett praktiskt problem med tekniken är dock att man i princip behöver många givare i mätpunkten för att man entydigt skall kunna bestämma intensiteten.

I byggakustiska sammanhang har tekniken använts bland annat för att bestämma flanktransmission (Kruppa, 1986) samt för att lokalisera ljudbryggor i en dubbelvägg (Maysenhölder & Schneider, 1988) och i ett flytande golv (Sorainen & Rytönen, 1989). I samtliga fall har därvid använts en tämligen enkel mätprob bestående av två accelerometrar. Detta har varit möjligt, bland annat genom lämpligt val av mätpunkternas lokalisering.

Det är väl känt, att de mättekniska svårigheterna är större vid mätning av rena toner än vid de relativt breda frekvensband som varit aktuella i ovan nämnda arbeten. I det här aktuella fallet med värmepumps- och kylinstallationer är de dominerande störningarna smalbandiga. Avsikten med detta arbete är därför att testa om tekniken med mätning av mekanisk intensitet med två accelerometrar fungerar även i detta fall.

2 GRUNDLÄGGANDE TEORI

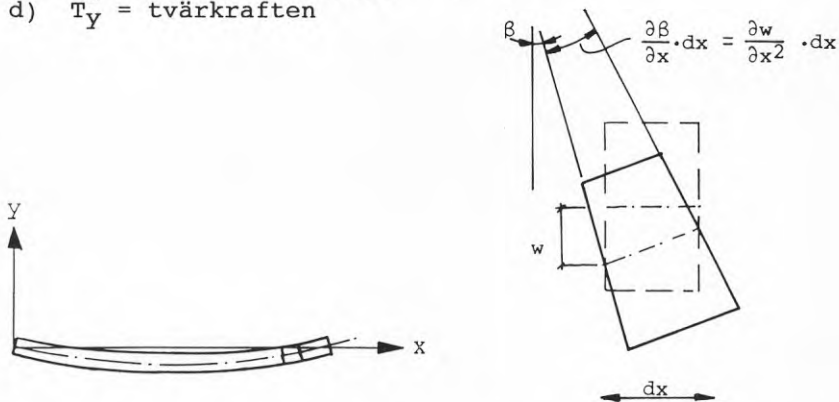
I detta avsnitt redovisas definitioner och en del grundläggande teori för mekanisk intensitet hos plana propagerande böjvågor i balkar och plattor.

Teorin förutsätter homogent material, konstant tvärsnittsarea samt linjärt spännings-töjningssamband, dvs materialet måste följa Hookes lag. Redovisningen till och med avsnitt 2.5 innehåller inget nytt eget material utan bygger i hög grad på arbeten av Pavic (1976) och Rasmussen (1983). Avsnitten 2.6 och 2.7 är däremot nyskrivna för denna rapport.

2.1 Balkar

Böjvågor beskrivs vanligtvis med fyra variabler, nämligen

- v_y = den transversella hastigheten hos ett element
- ω_z = vinkelhastigheten (kring z-axeln)
- M_z = böjande momentet
- T_y = tvärkraften



Figur 2.1. Den vänstra figuren visar koordinatsystemets läge medan den högra visar förflyttningar och deformationer vid böjning.

Den transversella förflyttningen, w , och rotationen med vinkeln β är relaterade genom följande samband

$$\beta = \partial w / \partial x. \quad (1)$$

Vinkelhastigheten fås ur tidsderivatan av rotationen β vilket ger

$$\omega_z = \partial \beta / \partial t = \partial^2 w / \partial x \partial t. \quad (2)$$

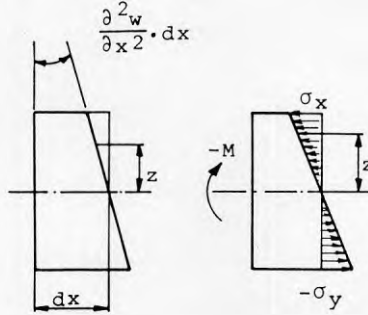
Vidare behövs ett uttryck för hastigheten i y -riktningen. Detta kan skrivas som

$$v_y = \partial w / \partial t. \quad (3)$$

För små deformationer gäller nu att

$$\partial w_z / \partial x = \partial^2 v_y / \partial x^2 = \partial / \partial t (\partial^2 w / \partial x^2). \quad (4)$$

För att finna en relation mellan förskjutning och böjande moment studeras töjnings- och spänningsfördelningen enligt figur 2.2.



Figur 2.2. Fördelning av töjning (vänstra figuren) och spänning (högra figuren) över ett tvärsnitt.

Töjningen i axiell riktning, ϵ_x , ökar linjärt med avståndet y från medellinjen,

$$\epsilon_x = -y \partial^2 w / \partial x^2. \quad (5)$$

Minustecknet anger att kompression sker ovan medellinjen. Av samma anledning får spänningen ett negativt tecken

$$\sigma_x = E \cdot \epsilon_x = -E y \partial^2 w / \partial x^2. \quad (6)$$

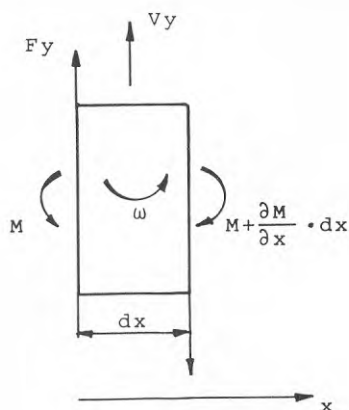
E betecknar här elasticitetsmodulen.

Momentjämvikt för elementet, se figur 2.2, ges av sambandet

$$\begin{aligned} M_z &= \int_S \sigma_x y dS = -E \partial^2 w / \partial x^2 \int_S y^2 dS = \\ &= -EI \partial^2 w / \partial x^2, \end{aligned} \quad (7)$$

där I betecknar tröghetsmomentet.

Ett uttryck för sambandet mellan tvärkraften, T_y , och det böjande momentet M_z kan erhållas från statisk böjningsteori. Man förutsätter därvid att momentjämvikt skall innehållas för ett balkelement med längden dx , se figur 2.3.



Figur 2.3. Definition av positiva riktningar för fältvariablerna kring ett balkelement.

Momentjämvikt ger här att

$$M_Z - (M_Z + \partial M_Z / \partial x \cdot dx) - T_Y \cdot dx = 0, \quad (8)$$

vilket leder till att

$$T_Y = - \partial M_Z / \partial x. \quad (9)$$

Slutligen behövs även ett samband mellan tvärkraften och hastigheten i transversell riktning. Ett sådant samband erhålls genom tillämpning av Newtons andra lag på ett balkelementet i figur 2.3,

$$T_Y - (T_Y + \partial T_Y / \partial x \cdot dx) = m \cdot dx \partial v_Y / \partial t, \quad (10)$$

där m är massan per längdenhet. Ekvation (10) kan också skrivas på följande sätt

$$- \partial T_Y / \partial x = m \cdot \partial v_Y / \partial t. \quad (11)$$

Ekvation (7) kan skrivas om enligt

$$M_Z = - \partial^2 w / \partial x^2 EI, \quad (12)$$

vilket tillsammans med ekvation (9) ger

$$T_Y = \partial^3 w / \partial x^3 \cdot EI. \quad (13)$$

De fyra fältvariablerna är nu alla formulerade som funktion av w . Därmed är det enkelt att finna samband mellan förskjutningen w och de variabelprodukter vi kommer att behöva senare.

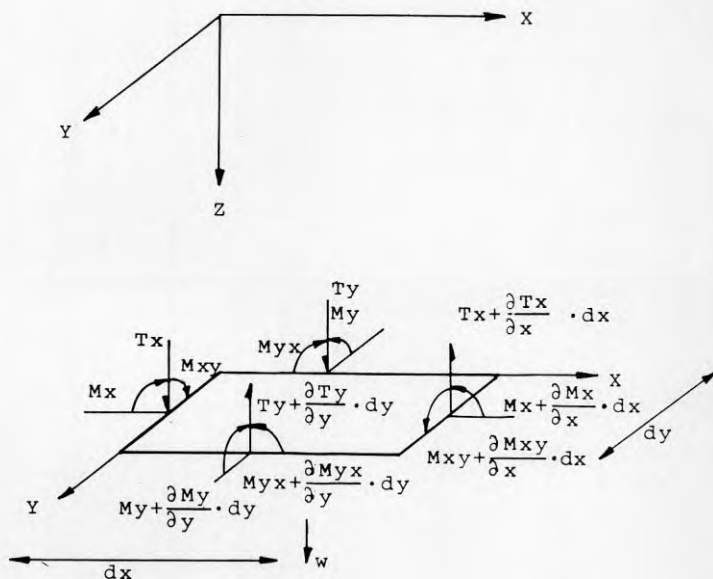
2.2 Plattor

För att fullständigt beskriva deformationstillståndet i en punkt är det tillräckligt att beskriva töjningarna i tre ortogonala riktningar samt de tre skjuvningarna i resp riktningar. Dessa deformationskomponenter är i en punkt (x, y, z) relaterade till förskjutningarna u, v, w (i x -, y - resp z -riktningen) genom

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= \partial u / \partial x, \\ \epsilon_y &= \partial v / \partial y, \\ \epsilon_z &= \partial w / \partial z, \\ \gamma_{xy} &= \partial u / \partial y + \partial v / \partial x, \\ \gamma_{yz} &= \partial v / \partial z + \partial w / \partial y, \\ \gamma_{zx} &= \partial w / \partial x + \partial u / \partial z,\end{aligned}\tag{14}$$

där γ betecknar skjuvspänningarna.

För homogena, isotropa och linjära elastiska material gäller Hookes generaliserade lag för plant spänningstillstånd. Med det koordinatsystem som definieras i figur 2.4 (observera att y -axeln här ligger i plattans plan i motsats till förhållandena vid balken, figur 2.1) blir då



Figur 4. Verkande krafter och moment på ett platt-element.

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= E(\epsilon_x + \nu \epsilon_y) / (1 - \nu^2), & \tau_{xy} &= G\gamma_{xy}, \\
 \sigma_y &= E(\epsilon_y + \nu \epsilon_x) / (1 - \nu^2), & \tau_{yz} &= 0, \\
 \sigma_z &= 0, & \tau_{zx} &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Här betecknar G och ν skjuvmodulen respektive tvärkontraktionstalet, vilka båda är relaterade till E -modulen,

$$G = E/2(1 + \nu). \tag{16}$$

För en godtycklig punkt i plattan gäller för små förskjutningar i x - respektive y -riktning följande, se även figur 2.4:

$$u = -z \partial w / \partial x, \quad v = z \partial w / \partial y. \tag{17}$$

Töjningarna enligt ekvation (12) kan då skrivas om på följande sätt

$$\epsilon_x = -z \partial^2 w / \partial x^2, \quad \epsilon_y = -z \partial^2 w / \partial y^2. \tag{18}$$

Analogt blir skjuvspänningen

$$\gamma_{xy} = -2z \partial^2 w / \partial x \partial y. \tag{19}$$

På samma sätt som för balken blir då momenten

$$\begin{aligned}
 M_x &= \int_S \sigma_x z dS, \\
 M_y &= \int_S \sigma_y z dS, \\
 M_{xy} &= \int_S \tau_{xy} z dS.
 \end{aligned}
 \tag{20}$$

Moment-deformationssambanden kan nu skrivas:

$$\begin{aligned}
 M_x &= -E(\partial^2 w / \partial x^2 + \nu \partial^2 w / \partial y^2) / (1 - \nu^2) \int_S z dS \\
 &= -D(\partial^2 w / \partial x^2 + \nu \partial^2 w / \partial y^2),
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

$$\begin{aligned}
 M_y &= -E(\partial^2 w / \partial x^2 + \nu \partial^2 w / \partial y^2) / (1 - \nu^2) \int_S z dS \\
 &= -D(\partial^2 w / \partial y^2 + \nu \partial^2 w / \partial x^2),
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

$$M_{xy} = - 2G\theta^2 w / \partial x \partial y \int_S z dS = - EI\theta^2 w / \partial x \partial y / (1+\nu)$$

$$= D(1-\nu)\theta^2 w / \partial x \partial y, \quad (23)$$

där $D = Eh^3/12(1-\nu^2)$ är plattans böjstyvhets/enhetsbredd.

Kraftjämvikt för ett plattelement kring x- resp y-axlarna resulterar i två uttryck som ger tvärkrafterna på samma sätt som i balkfallet, jämför ekvation (9),

$$- \partial M_x / \partial x - \partial M_{yx} / \partial y + T_x = 0, \quad (24)$$

$$- \partial M_y / \partial y - \partial M_{xy} / \partial x + T_y = 0. \quad (25)$$

Tillsammans med de tidigare härledda uttrycken för momenten blir tvärkrafterna

$$T_x = - D[\partial^3 w / \partial x^3 + \nu \partial^3 w / \partial x \partial y^2 + (1-\nu)\partial^3 w / \partial x \partial y^2]$$

$$= - D(\partial^3 w / \partial x^3 + \partial^3 w / \partial x \partial y^2), \quad (26)$$

$$T_y = - D[\partial^3 w / \partial y^3 + \nu \partial^3 w / \partial x^2 \partial y + (1-\nu)\partial^3 w / \partial x^2 \partial y]$$

$$= - D(\partial^3 w / \partial y^3 + \partial^3 w / \partial x^2 \partial y). \quad (27)$$

2.3 Mekanisk intensitet i balkar

Allmänt gäller att effekt anges i enheten W eller Nm/s, vilket exempelvis kan tolkas som kraft gånger hastighet. Intensitet definieras normalt som effekt per areaenhet. I mekaniska sammanhang är det dock meningsfullare att betrakta effekt per breddenhet. Detta är mycket naturligt för plattor, men gäller, som framgår nedan, även för balkar.

I fallet med en balk erhålls intensiteten, d v s den mekaniska effekten per enhetsbredd i x-led, som summan av ett bidrag från tvärkraften, P_t , och ett bidrag från det böjande momentet, P_m .

Tvärkraftskomponenten gånger transversalhastigheten kan skrivas:

$$P_t = D(\partial^3 w / \partial x^3)(\partial w / \partial t). \quad (28)$$

Bidraget från det böjande momentet ges av produkten av moment och vinkelhastighet:

$$P_m = -D(\partial^2 w / \partial x^2)(\partial^2 w / \partial x \partial t). \quad (29)$$

De båda bidragen är alltså lika stora. Anledningen till de olika tecknen är att paret av fältvariabler

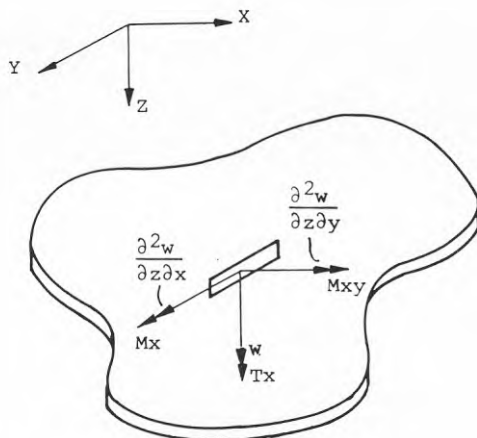
i P_m är fasförskjutet 90° relativt P_t , se figur II/12 i boken av Cremer et al, sidan 107.

2.4 Mekanisk intensitet i plattor

Intensiteten i en platta bestäms bland annat av tvärkrafter och moment. Detta avsnitt syftar till att finna samband mellan sådana krafter och moment och enkelt mätbara storheter såsom vinkelhastighet och transversalhastighet.

Intensitetsvektorn, \overline{MI} , beskriver nettoflödet av mekanisk effekt per enhetsbredd av en platta i en given punkt. Intensiteten, MI , i en bestämd riktning kan betraktas som projektionen av intensitetsvektorn, MI , på denna riktning.

Den mekaniska effekten eller intensiteten i x -riktningen genom ett tvärsnitt av en platta transporteras av arbetet som utförs av två moment, M_{xy} och M_x , samt en kraft T_x , se figur 2.5.



Figur 2.5. Krafter och moment verkande på ett tvärsnitt av en platta.

Tvärkraftskomponenten, MI_{tx} , är lika med produkten av skjuvspänningen i x -riktningen multiplicerad med transversalhastigheten:

$$MI_{tx} = D(\partial^3 w / \partial x^3 + \partial^3 w / \partial x \partial y^2)(\partial w / \partial t). \quad (30)$$

Det böjande momentet i x -riktningen multiplicerat med vinkelhastigheten parallell till denna riktning ger ytterligare en komponent:

$$MI_{mx} = D(\partial^2 w / \partial x^2 + \nu \partial^2 w / \partial y^2)(\partial^2 w / \partial x \partial t). \quad (31)$$

Slutligen har vi produkten av skjuvmomentet i x-riktningen och vinkelhastigheten kring denna riktning

$$MI_{mxy} = D(1-\nu)(\partial^2 w / \partial x \partial y)(\partial^2 w / \partial y \partial t). \quad (32)$$

Ekvationerna (30) och (32) visar nu att kraftkomponenten lika stor som summan av momentkomponenterna, dvs

$$MI_{tx} = MI_{mx} + MI_{mxy}. \quad (33)$$

Detta medför att den totala intensiteten MI_x kan skrivas som

$$MI_x = 2MI_{tx} = 2(MI_{mx} + MI_{mxy}), \quad (34)$$

eller

$$MI_x = 2MI_{tx} = \langle 2D(\partial^3 w / \partial x^3 + \partial^3 w / \partial x \partial y^2)(\partial w / \partial t) \rangle_t. \quad (35)$$

där $\langle \rangle_t$ betecknar tidsmedelvärdet.

För en plan, propagerande våg med frekvensen f är

$$\partial^2 w / \partial x^2 + \partial^2 w / \partial y^2 = -k^2 w, \quad (36)$$

där vågtalet k ges av

$$k^4 = \omega^2 m' / D, \quad (37)$$

och där m' är ytvikten, $\omega = 2\pi f$ samt $f =$ frekvensen.

Insättning i ekvation (36) ger så

$$MI_x = \langle 2\omega w \sqrt{m'D} \partial^2 w / \partial x \partial t \rangle_t. \quad (38)$$

För ren sinusexcitering kan nedböjningen skrivas som

$$w = \int a d^2 t = a / -\omega^2. \quad (39)$$

där a betecknar den lätt mätbara accelerationen. Den mekaniska intensiteten i x-riktningen kan därför skrivas som

$$MI_x = \langle 2 \sqrt{m'D} / \omega \cdot \partial^2 w / \partial x \partial t \cdot a \rangle_t. \quad (40)$$

Intensiteten MI_y i plattans y-riktning kan härledas på analogt sätt; enda skillnaden blir att ett uttryck för vinkelhastigheten i y-riktningen kommer att ingå i formeln för intensiteten. Intensitetens magnitud fås slutligen som

$$MI = (MI_x^2 + MI_y^2)^{1/2}, \quad (41)$$

och dess riktning i förhållande till x-axeln som

$$\alpha = \arctan (MI_y/MI_x). \quad (42)$$

2.5 Inverkan av exponentiella närfält

Den beskrivna teorin är giltig enbart för propagerande plana vågor. I det allmänna fallet finns dessutom böjvågor av en speciell typ, kallade exponentiella närfält, vilka är viktiga att hålla i minnet i detta sammanhang.

Vågekvationen för sinusformade böjvågor kan skrivas som

$$\nabla^4 w - k^4 w = 0, \quad (43)$$

där $k^4 = m'\omega^2/D$ och där

$$\nabla^2 = \partial^2 w / \partial x^2 + \partial^2 w / \partial y^2. \quad (44)$$

Studeras en balk eller platta i x-riktningen erhålls lösningen för nedböjningen på följande form

$$w = A_n \exp(k_n x), \quad (45)$$

där k_n är en av de fyra rötterna till ekvation (43),

$$k_n = (m'\omega^2/D)^{1/4}, \quad (46)$$

och där A_n är amplituderna.

Om den reella positiva roten betecknas k erhålls de fyra rötterna som

$$k_1 = k; k_2 = -k; k_3 = jk; k_4 = -jk. \quad (47)$$

Den kompletta lösningen för vågekvationen blir då

$$w = A_1 e^{kx+j\omega t} + A_2 e^{-kx+j\omega t} + A_3 e^{jkx+j\omega t} + A_4 e^{-jkx+j\omega t}. \quad (48)$$

Den sista termen i detta uttryck representerar en böjvåg med konstant amplitud (A_4) och som utbreder sig i positiv x-riktning. Den rörelse som representeras av termen $A_2 e^{-kx+j\omega t}$ är däremot i fas längs x-riktningen och avtar exponentiellt mot ökande värden på x . Rörelser av denna typ kan därför existera endast intill diskontinuiteter av olika slag, och kallas lämpligen "exponentiella närfält" (Cremer et al, 1988). Den våg som representeras av den sista termen i högerledet av ekvation (48) kallas vanligen propagerande våg.

Termerna $A_1 e^{kx+j\omega t}$ och $A_3 e^{jkx+j\omega t}$ ger upphov till ett analogt par av vågor i negativ x-riktning från exciteringspunkten.

De exponentiella närfälten transporterar ingen energi, men det är uppenbart från härledningen av uttrycken för den mekaniska intensiteten, se exempelvis ekvation (38), att man vid en intensitetsmätning inte kan skilja på propagerande vågor och exponentiella närfält. Om en propagerande våg och ett närfält har samma vågtal och samma acceleration visar dessutom ekvation (38) att samma intensitet kommer att registreras. Det är därför viktigt att vid mätningar av denna typ skaffa sig en uppfattning om de exponentiella närfälten.

Vi antar därför nu att en platta exciteras av en harmonisk kraft

$$F = F_0 \cdot e^{j\omega t}$$

per längdenhet för linjen $x = 0$, från $y = -\alpha$ till $y = \alpha$, där längden α är stor i förhållande till böjvåglängden.

Exponentiella närfält och propagerande vågor utbredd i båda riktningarna från exciteringslinjen. Om inga diskontinuiteter, reflekterande kanter eller andra externa krafter inverkar, kan nedböjningarna w_+ och w_- i positiv resp negativ x-riktning skrivas som

$$w_- = A_1 e^{kx} + A_3 e^{jkx}, \quad w_+ = A_2 e^{-kx} + A_4 e^{-jkx}, \quad (49)$$

Man kan visa att

$$A_1 = A_2 = -jA_3 = -jA_4 = F_0/4Dk^3, \quad (50)$$

genom att detaljstudera rörelsen i linjen $x = 0$.

Den totala nedböjningen i positiv x-riktning blir således

$$w_+ = -(F_0/4Dk^3)(e^{-kx} + je^{jkx}). \quad (52)$$

Av ovanstående samband framgår att när $kx = 2,3$ blir $e^{-kx} = 1/10$ jämfört med när $x = 0$. Eftersom våglängden $\lambda = 2\pi/k = 2\pi(D/m'\omega^2)^{1/4}$, har närfältets amplitud i detta fall minskat till en tiondel för $x = 0,37\lambda$, se tabell 1. En amplitudminskning till en tiondel motsvarar en nivåminskning med 20 dB.

Det skall dock observeras att det exponentiella närfältet inledningsvis kan ha mycket större amplitud än den propagerande vågen. Ett sådant fall finns redovisat i boken av Cremer et al (1988) p 380.

Tabell 1. Den gräns, $0,37\lambda$ uttryckt i m, där det exponentiella närfältet dämpats 20 dB.

Material och tjocklek	$0,37\lambda$ (m)	
	100 Hz	1000 Hz
Stål- o aluminiumplåt,		
3 mm	0,19	0,064
1 mm	0,11	0,037
Betong, 200 mm	1,4	0,44

Det är fullt möjligt att utföra intensitetsmätningar vid närvaro av exponentiella närfält. Problemet är då att man måste använda fler givare i varje mätpunkt, se exempelvis Pavic (1976).

2.6 Inverkan av longitudinella plattvågor

Även en longitudinell plattvåg, d v s en kvasi-longitudinell våg ger upphov till en vinkelhastighet och en acceleration vinkelrätt plattplanet. Denna vinkelhastighet och acceleration kan därför tolkas som en yttringar av en böjvåg och felaktigt räknas om till en böjvågsintensitet. Denna risk är emellertid liten, vilket kan visas på följande sätt.

Det har tidigare visats, att förhållandet mellan amplituden i plattplanet, u_L , och amplituden vinkelrätt plattplanet, w_L , kan skrivas som (Ljunggren, 1984a)

$$|u_L/w_L| = 2(1-\nu)/(\nu k_L h). \quad (52)$$

Eftersom

$$(\partial^2 w_L / \partial x \partial t) w_L = (-jk_L)(j\omega) w_L^2, \quad (53)$$

blir i x-riktningen den skenbara böjvågsintensitet SI som kan tillskrivas longitudinalvågens rörelser

$$\begin{aligned} SI &= \langle (2\sqrt{Dm'\omega})(\partial^2 w_L / \partial x \partial t) w_L \rangle_t \\ &= 2\sqrt{Dm'\omega^2} k_L u_L^2 (\nu k_L h / 2(1-\nu))^2, \end{aligned} \quad (54)$$

där u_L betecknar effektivvärdet av förskjutningen i plattplanet.

Den verkliga intensiteten i den kvasi-longitudinella vågen är å andra sidan

$$LI = m' c_L \omega^2 u_L^2, \quad (55)$$

där c_L är vågens utbredningshastighet.

Förhållandet mellan den verkliga och skenbara intensiteten blir därför

$$SI/LI = (1/2\sqrt{12})(k_L h)^3 (\nu/(1-\nu))^2 / \sqrt{1-\nu^2}. \quad (56)$$

Om man som exempel väljer en 20 cm tjock platta av betong ($\nu=0,3$, $c_L=3200$ m/s) blir vid 500 Hz

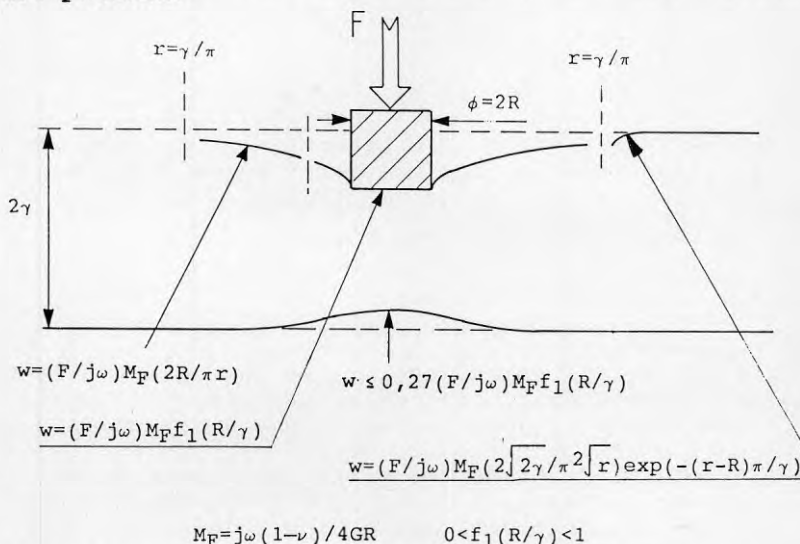
$$SI/LI = 0,025.$$

Det skall tilläggas att förhållandet mellan SI och LI är kraftigt frekvensberoende; exempelvis är vid 100 Hz $SI/LI=0,0002$.

Dessa exempel visar tydligt att om en longitudinell plattvåg med relativt stor intensitet tyds som en böjvåg underskattas intensiteten kraftigt. Eftersom stora longitudinalvågsintensiteter knappast är sannolika i de fall som här är aktuella, är denna felkälla av liten betydelse.

2.7 Inverkan av Lamb-moder

Förutom böjvågen och den kvasi-longitudinella vågen ger också de lågfrekventa Lamb-moderna (se exempelvis Ljunggren, 1984b) upphov till en vinkelhastighet och en acceleration vinkelrätt plattplanet. Rörelserna är dock i detta fall begränsade till ett litet område nära en diskontinuitet, d v s på mindre avstånd än en plattjocklek. Förhållandena vid en exciteringspunkt är illustrerade i figur 2.6. Plattan förutsätts här vara angripen med en kraft F , vinkelrätt plattplanet. För att rörelserna skall bli ändligt stora, förutsätts kraften vara applicerad via en massfri "stämpel" med cirkulär anliggningsyta mot plattan.



Figur 2.6. Uppträdande förskjutningar på grund av Lambmoder vid excitering av plattan med en punkt-kraft.

3 MÄTTEKNIK

3.1 Grundläggande samband

Som framgår av föregående avsnitt kan intensiteten under vissa förutsättningar bestämmas genom mätning av acceleration och vinkelhastighet i en punkt. Man får då intensiteten i samma riktning som vinkelhastigheten, se ekvation (40).

Vid de mätningar som presenteras i det följande har använts två accelerometrar placerade på ett litet avstånd Δx från varandra. För beräkning av intensiteten har därvid acceleration tagits som ett medelvärde av de uppmätta accelerationerna,

$$a = (a_1 + a_2)/2. \quad (57)$$

Vinkelhastigheten beräknas ur skillnaden mellan de båda accelerationerna på följande sätt,

$$\partial^2 w / \partial x \partial t = (1/\Delta x) \int (a_2 - a_1) dt. \quad (58)$$

Intensiteten i riktning från punkt 1 till punkt 2 kan således beräknas ur uttrycket

$$MI_x = 2\sqrt{Dm'/\omega} < (a_1 + a_2)/2 \int (1/\Delta x) (a_2 - a_1) dt >_t. \quad (59)$$

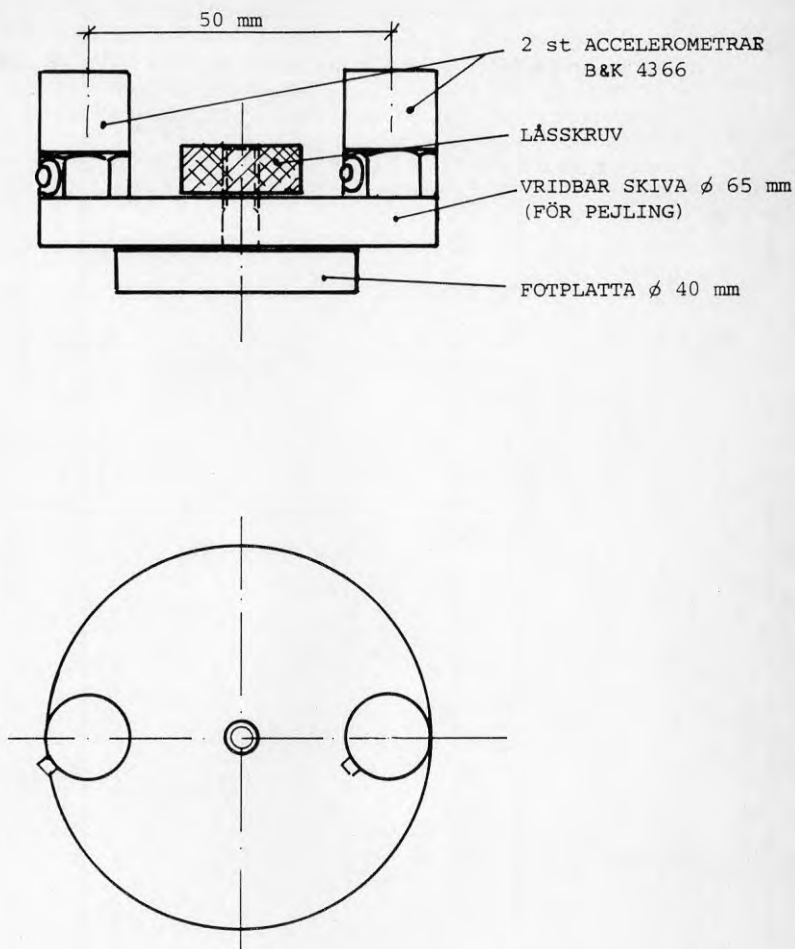
I många fall är det mer praktiskt att studera en storhet i frekvensplanet än i tidsplanet, och man utnyttjar därför motsvarande Fouriertransform, se exempelvis Verheij's artikel (1980):

$$MI_x(f) = 2\sqrt{Dm'/\Delta x} \int (1/\omega^2) \cdot \text{Im}\{S_{12}(a_1, a_2)\} df, \quad (60)$$

där S_{12} är korsspektrum av de båda accelerationerna. Ekvation (60) kan implementeras på en tvåkanalig dynamisk signalanalysator (FFT).

3.2 Använd utrustning

Den använda mätproben illustreras i figur 3.1. Den består av två delar. Den ena delen består i sin tur av en bottenplatta med en gängad tapp. Bottenplattan fästs mot mätobjekt med vax. Dena andra delen består av en cirkulär skiva med de båda accelerometrarna (Brüel & Kjaer 4366). I mitten på skivan finns ett hål för bottenplattans tapp. Skivan med accelerometrarna spänns fast mot bottenplattan med hjälp av en låsmutter. På detta sätt är det enkelt att ändra mätriktningen. Probens vikt är 375 g.



Figur 3.1. Den använda mätproben.

I övrigt har mätutrustningen bestått av laddningsförstärkare, typ Brüel & Kjaer 2635, och en dynamisk signalanalysator, typ Hewlett & Packard 3562A. Fasfelet hos den använda utrustningen är i det aktuella frekvensområdet mindre än 1° .

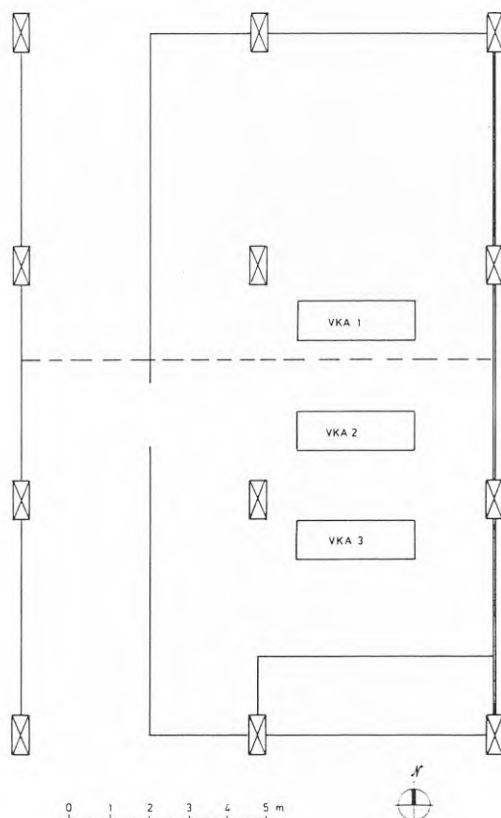
Inför varje mätserie gjordes en funktionskontroll av mätutrustningen genom att proben monterades på ett fritt plattfält. I närheten av proben exciterades bjälklaget med en hammare (med ett mjukt mellanlägg) och intensiteten registrerades. Därefter vreds proben 180° och kontroll skedde att den registrerade intensiteten behöll samma storleksordning men växlade tecken.

4 PRAKTIKFALL

I det följande redovisas erfarenheter från några praktikfall. Dessa fall presenteras här i en ordning som valts för att så enkelt som möjligt illustrera möjligheterna och problemen med mätningar av mekanisk intensitet. Ordningen stämmer däremot inte överens med den kronologiska ordningen, vilket medför att vissa erfarenheter beträffande mättekniken som erhöles vid de första mätningarna nu presenteras i slutet av detta kapitel.

4.1 Praktikfall A

Det är i detta fall fråga om en kylmaskinanläggning i ett större kontorshus. Anläggningen består av tre kylmaskinaggregat, VKA1-3, se planskissen i figur 4.1.



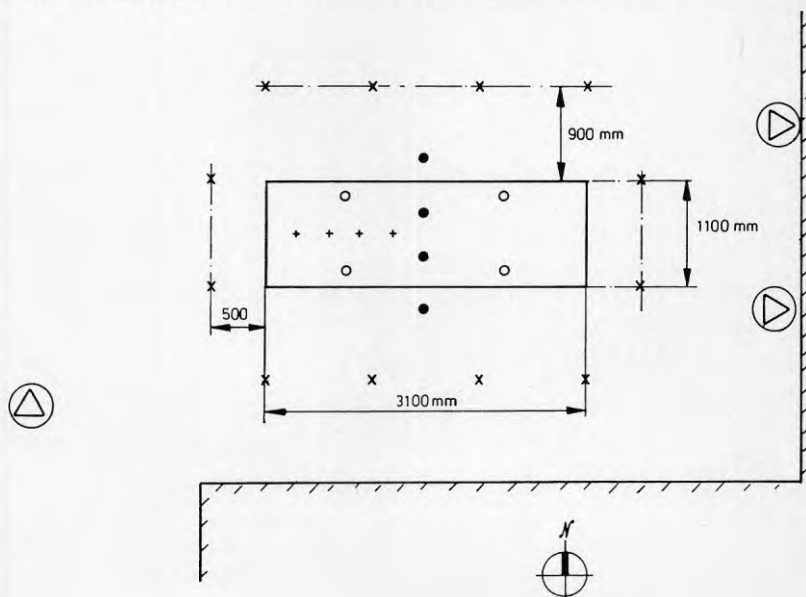
Figur 4.1. Uppställningen av kylmaskiner i praktikfall A. Bjälklagets tjocklek är öster om den dubbeldragna linjen 300 mm, norr om den streckade linjen 500 mm och söder om den streckade linjen 220 mm.

Förutom kompressorerna finns här ett antal pumpar och övrig kringutrustning. I korridoren, dvs i den västra delen av figuren, finns ett stråk med ett betydande antal rör monterat mot golvet.

Maskinrummet är beläget på plan 3. Byggnadsstommen är av typen pelardäck. Plattjockleken är 220, 500, resp 300 mm i plattans olika delar enligt figur 4.1.

Mätningarna utfördes kring det aggregat som betecknas VKA3. Aggregatet innehåller fyra kompressorer med viss kringutrustning som alla är monterade i en stålram. Denna ram är vibrationsisolerat monterat mot ett stålstativ, som i sin tur står med vibrationsisolatorer på ett 100 mm högt betongfundament, hopgjutet med bjälklaget. Fundamentet har samma planmått som aggregatets ram och stativ.

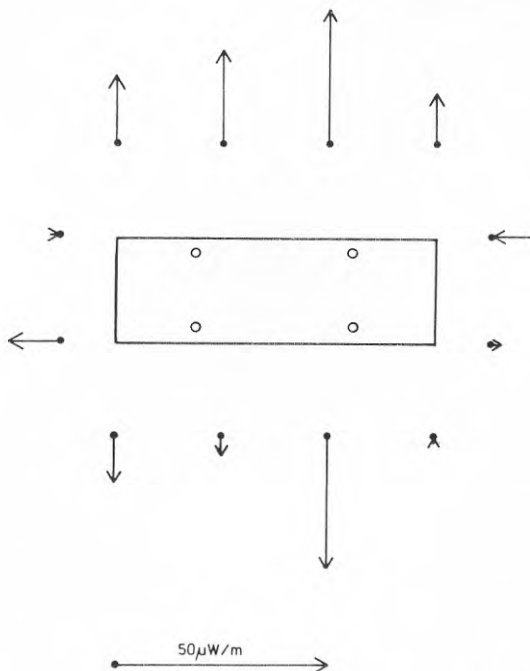
För att källan skulle bli entydig, kortslöts en av isolatorerna med aluminiumkilar. Aggregatets dimensioner, placeringen av vibrationsisolatorerna samt mätpunkternas läge framgår av figur 4.2.



Figur 4.2. Placering av mätpunkter mm kring aktuellt aggregat. x, ●, + betecknar mätpunkter vid första, andra resp tredje omgångens mätningar. o betecknar vibrationsisolatorernas läge. På figuren visas också läget av tre pumpar i närheten av aggregatet.

Vid de här aktuella mätningarna var endast aggregat VKA3 i drift (mätningarna utfördes vintertid). I den första omgången placerades 10 mätpunkter runt om maskinen på 500 - 900 mm avstånd från fundamentet, se figur 4.2.

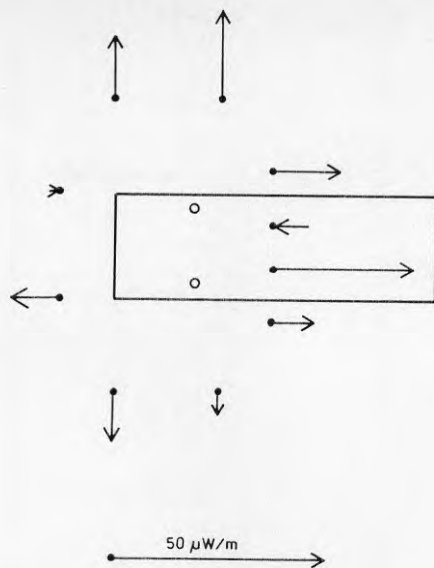
Proben riktades så att intensiteten mättes i radiell riktning ut från fundamentet. Huvuddelen av intensiteten var här koncentrerad till två frekvenser: 123 och 197 Hz; inledningsvis diskuteras resultatet vid 197 Hz, se figur 4.3. Som synes är huvuddelen av intensiteten riktad utåt, d v s aggregatet avger stömljud. Två av pilarna är större än de andra; man skulle härur kunna dra slutsatsen att den kortslutna isolatorn är en av de båda högra på bilden.



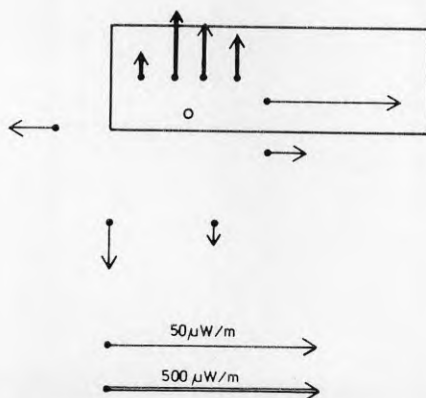
Figur 4.3. Intensiteten i riktning ut från aggregatet.

I nästa mätomgång utnyttjades en mätlinje tvärs över fundamentet. Resultatet blev i detta fall ett nettoflöde från höger till vänster; den kompletta bilden av flödet från fundamentets vänstra del framgår av figur 4.3. Det framgår alltså nu att någon av de båda vänstra isolatorerna är kortsluten.

I den tredje mätomgången utnyttjades en mätlinje mellan de båda isolatorerna. Bilden av flödet från den undre, vänstra isolatorn framgår av figur 4.5. Mätningarna visar här tydligt ett nettoflöde från denna isolator, som också var den som var kortsluten.

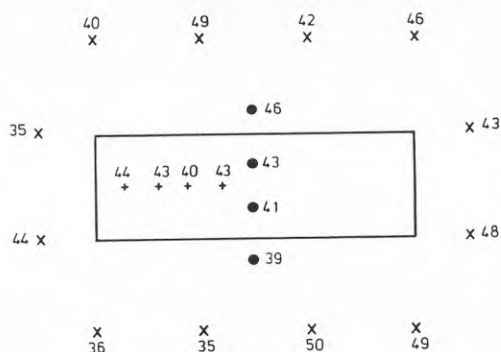


Figur 4.4. Bilden av energiflödet efter andra mätomgången.

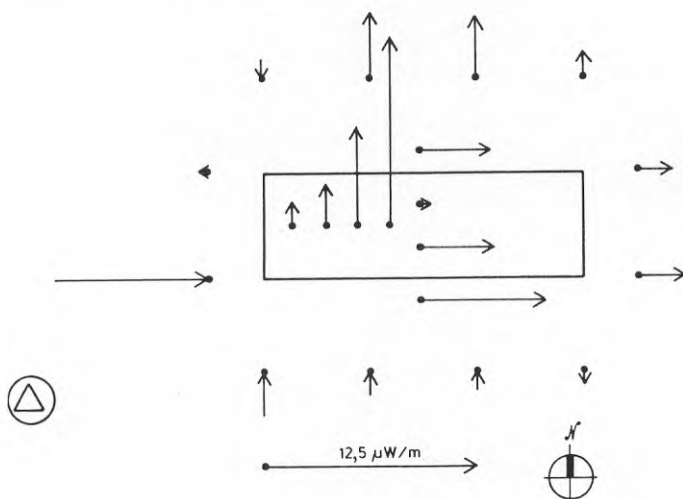


Figur 4.5. Bilden av energiflödet efter den tredje mätomgången. Den markerade isolatorn var kortsluten.

Samtidigt med mätningen av intensiteten bestämdes också svängningshastigheten i alla mätpunkterna. Resultatet vid 197 Hz framgår av figur 4.6. Det finns som synes ingen möjlighet att ur dessa värden sluta sig till vilken isolator som är kortsluten. Detta resultat är närmast självklart eftersom svängningsmönstret i ett fall som detta mer måste bero på plattans modmönster än på störkällans placering.



Figur 4.6. Uppmätta hastighetsnivåer (i dB rel $5 \cdot 10^{-8}$ m/s) vid 197 Hz.



Figur 4.7. Uppmätta intensiteter vid 123 Hz. Nettoflödet är riktat mot nordost och härstammar sannolikt från den pump som ligger sydväst om aggregatet.

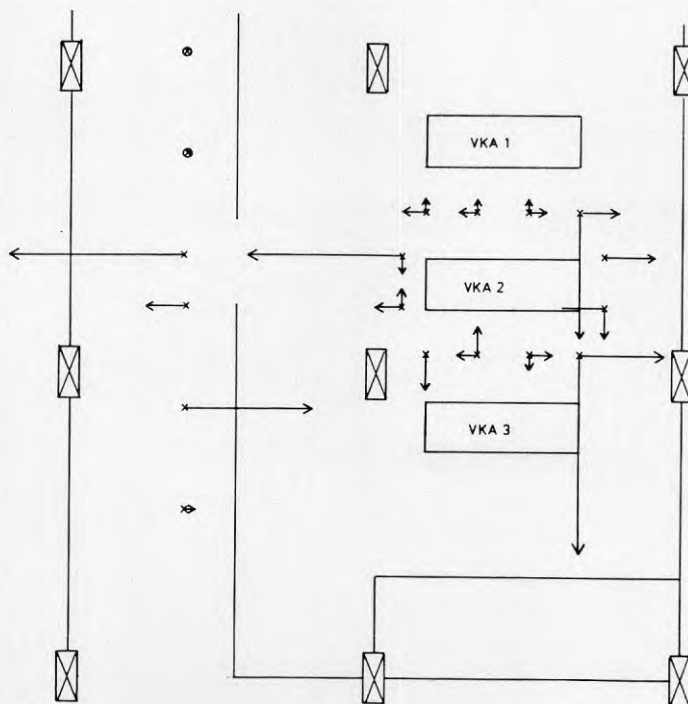
Den uppmätta intensiteten vid 123 Hz framgår av figur 4.7. I detta fall kan man knappast hävda att det finns något nettoflöde ut från maskinen. Man ser i stället ett flöde från det nedre vänstra hörnet mot det övre högra, d v s källan ligger utanför kylaggregatets fundamnet och i riktning mot SV (med norr uppåt på figuren). Vid kontroll visade det sig också att det i den riktningen fanns en pump som avgav en kraftig ton just vid 123 Hz. Denna pump bedöms därför vara den sannolika källan.

Sammanfattningsvis visar alltså dessa mätningar att det är möjligt att lokalisera källor av aktuell typ. Det skall dock observeras att omständigheterna är ganska gynnsamma i detta fall: åtminstone i ena fallet är en källa mycket starkare än de övriga källorna. Dessutom är bjälklagsplattan stor. Resultaten visar också på fördelen med att använda en sluten mätkontur runt den aktuella källan.

Mätresultat från enstaka punkter är av begränsat värde. Mätpunkter nära källan visade på ett kraftigt flöde i "rätt" riktning, vilket indikerar att sådana mätpunkter kan vara användbara vid lokalisering av källor. Denna slutsats står inte heller i motsats till resultatet från den teoretiska analysen.

4.2 Praktikfall B

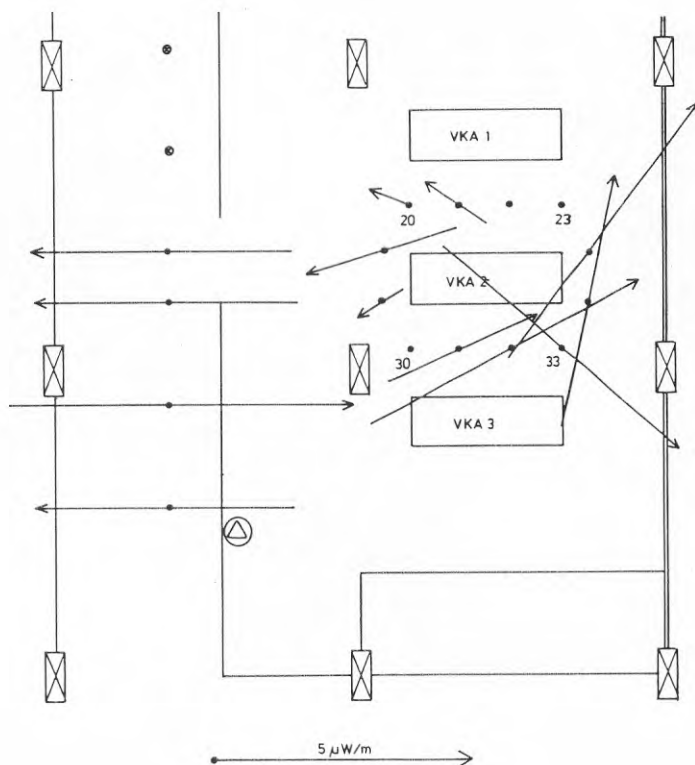
Mätningarna i detta fall har utförts i samma kylmaskinanläggning som i det föregående fallet men kring en annan maskin, VKA2. Endast detta aggregat var i drift vid mättillfället. Inga ingrepp gjordes för att kortsluta någon isolator eller dylikt.



Figur 4.8. Uppmätta mekaniska intensiteter vid 241 Hz i fall B. Ingen intensitet kunde detekteras i de båda mätpunkterna längst upp i nordost.

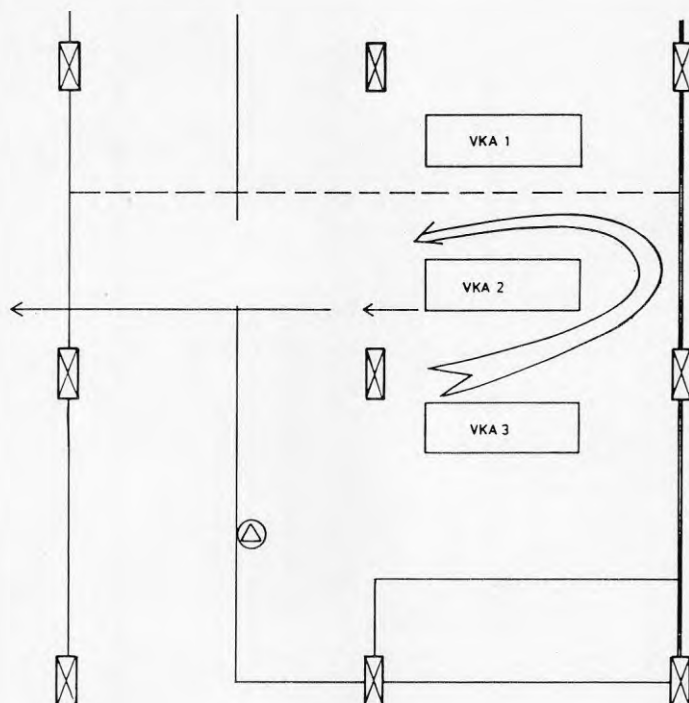
Även i detta fall kunde intensiteten analyseras vid två frekvenser, här 122 resp 241 Hz. De primära mätpunkterna är placerad runt aggregatet på samma sätt som i föregående fall. Intensiteten bestämdes dock i detta senare fall i två ortogonala riktningar; resultatet vid 241 Hz framgår ur figur 4.8. Resultatet visar att det även här finns ett nettoflöde ut från maskinen.

I den vänstra delen av figuren redovisas också intensiteten i några punkter på en linje som ligger i en korridor, ganska långt från aggregatet. I dessa punkter mättes intensiteten endast i riktningen vinkelrätt korridorens längsriktning. Som synes stämmer intensiteten i två av punkterna mycket väl överens med intensiteten i två punkter "rakt österut", vilket inte är förvånande men trots allt mycket uppmuntrande. I en av punkterna mättes ganska kraftig intensitet i riktning mot aggregatet. Anledningen till detta bedöms vara inverkan av ett flöde från en rörstötta, belägen nära pelaren strax norr om mätpunkten.



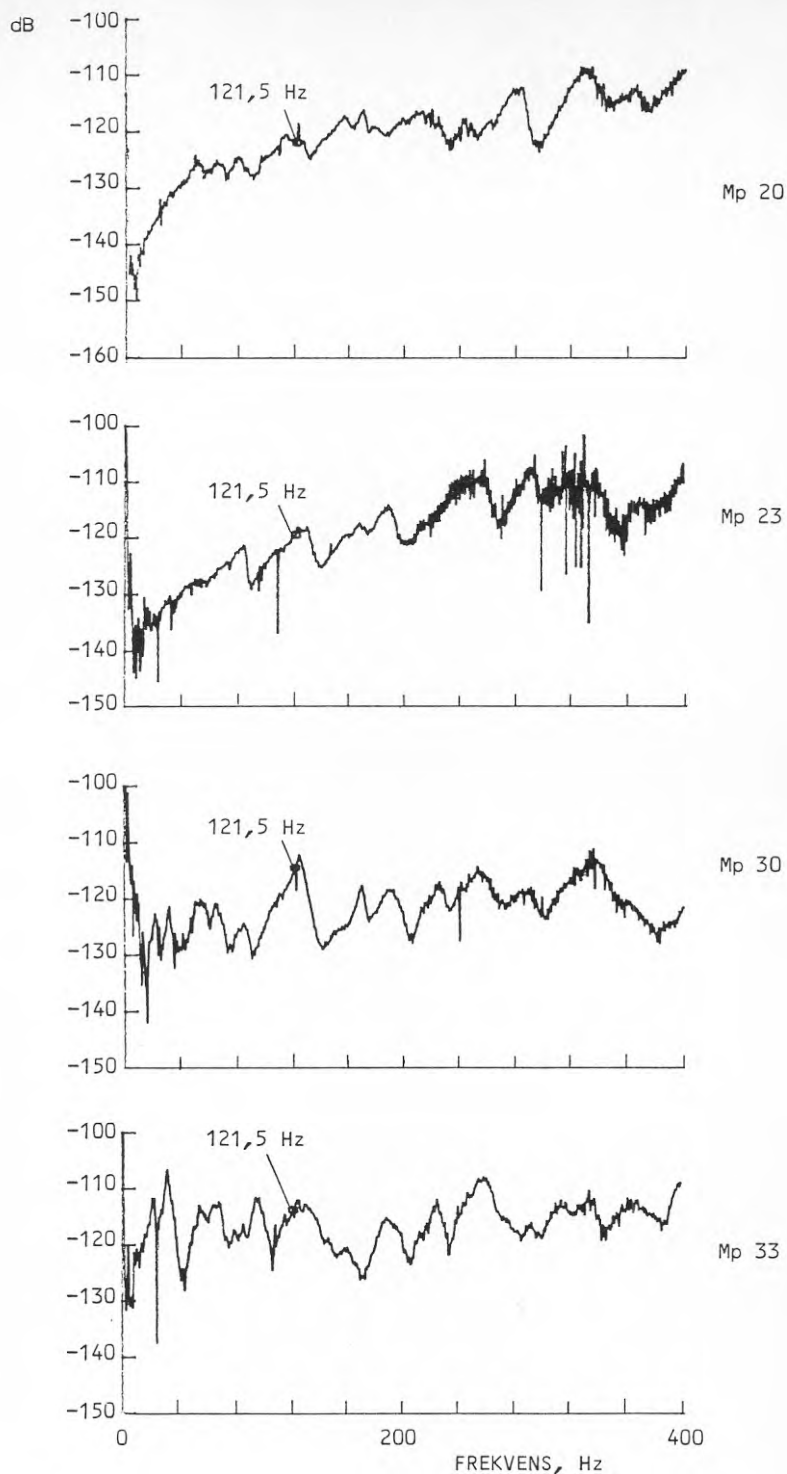
Figur 4.9. Uppmätta intensiteter vid 122 Hz, samt numrering av de mätpunkter där mobilitetsmätningar utförts.

Motsvarande resultat vid 122 Hz framgår av figur 4.9. Som visades i samband med det förra praktikfallet, härstammar denna ton sannolikt från en pump, belägen i rummets sydvästra hörn. Intensitetsvektorerna i figuren indikerar också att det inte är frågan om ett nettoflöde från aggregatet utan om ett flöde med den riktning som indikeras i figur 4.10. De relativt stora ändringarna i plattjocklek just i det här aktuella hörnet styrker också en sådan tolkning.



Figur 4.10. Tolkning av de uppmätta intensitetsvektorerna i figur 4.9 som ett energiflöde.

De uppmätta intensitetsnivåerna enligt figur 4.9 är tämligen höga. Detta beror dels på att källan är relativt stark, men också på att den aktuella delen av plattan har en resonans nära den aktuella frekvensen. Detta syns tydligt av de uppmätta punktmobiliteterna, se figur 4.11. Speciellt är detta fallet för punkterna 30 och 33 men även i viss mån för de båda andra punkterna. Man ser också att mobiliteten vid den aktuella frekvensen är ca 6 dB lägre i de punkter som ligger nära kanten mot den tjockare plattan, vilket visar att diskontinuiteten är kraftig och i sin tur kan förklara den riktningsändring hos flödet som antyds i figur 4.10.

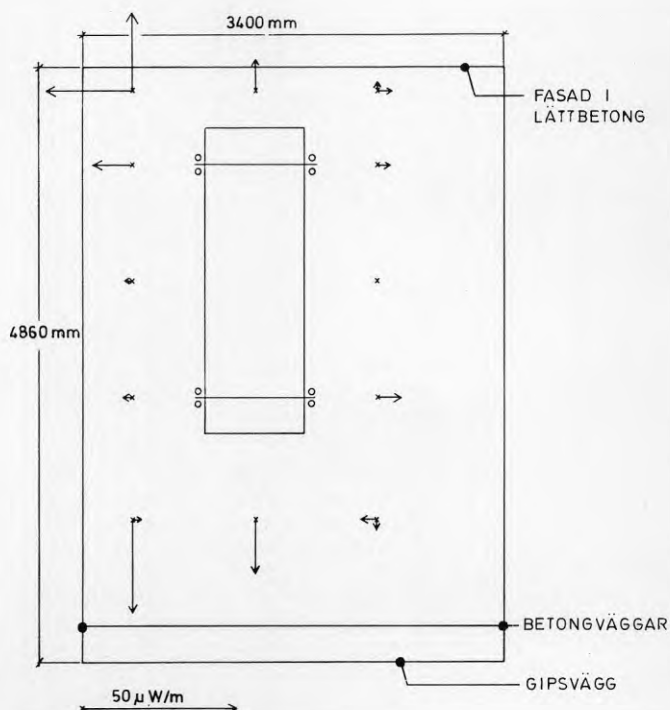


Figur 4.11. Uppmätta mobiliteter i punkterna 20, 23, 30 och 33 enligt figur 4.9. Mobiliteterna redovisas som $20 \cdot \lg(M/M_0)$, där $M_0 = 1 \text{ m/Ns}$.

Ett prov gjordes också här med kortslutna isolatorer, dels mellan kompressorernas balkram och det större balkstativet och dels mellan balkstativet och betongfundamentet. Intensiteten mättes därvid i en punkt nära kortslutningarna och i radiell riktning ut från aggregatet. Kortslutningen gav en viss ökning av intensiteten, från $1,3 \mu\text{W/m}$ till $2,9 \mu\text{W/m}$ vid en kil och vidare till $6,3 \mu\text{W/m}$ vid två kilar. Detta motsvarar 3 resp 7 dB, vilket kan tyckas vara en liten ändring för en så kraftig åtgärd. Det skall dock observeras att både kompressorramen och balkstativet är förhållandevis klena, vilket gör att balkarna i sig fungerar som vibrationsisolatorer vid den här aktuella, och i sammanhanget tämligen höga frekvensen, 241 Hz.

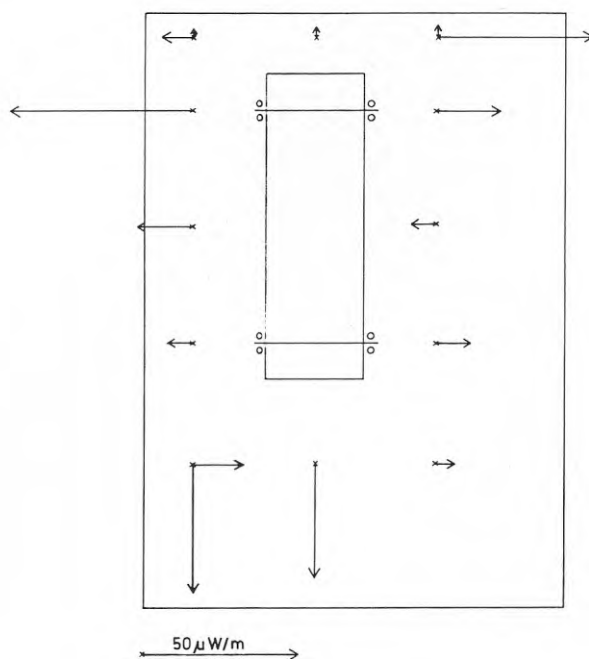
Slutsatserna blir även i detta fall att det varit möjligt att lokalisera källorna, trots att ett antal källor i ena fallet sannolikt var jämstarka. Det är också tydligt att flödet i ena fallet (med pumpen som källa) kraftigt påverkades av diskontinuiteterna i plattan. Bestämning av punktmobilitet underlättade i detta fall tolkningen av resultaten.

4.3 Praktikfall C



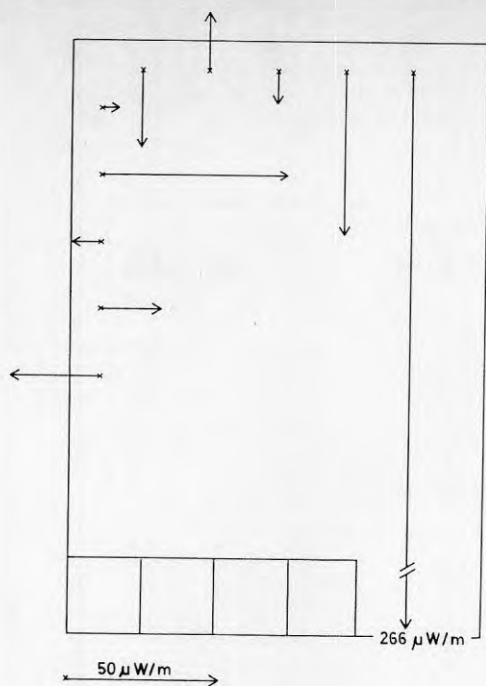
Figur 4.12. Praktikfall C: litet rum med värmepump. De redovisade intensiteterna avser här frekvensen 145 Hz.

Störkällan är i detta fall en värmepump som står i ett litet rum, se figur 4.12. Bjälklagsplattans tjocklek är här 200-250 mm, gjuten på mark. Aggregatet står direkt på plattan utan något betongfundament. Detekterbara störningar uppträder vid fem frekvenser. I det följande behandlas dock endast förhållandena vid 145 och 170 Hz; de frekvenser där störningarna dominerar. Mätningarna visar ett nettoflöde ut från aggregatet vid båda dessa frekvenser, se figur 4.12 och 4.13.

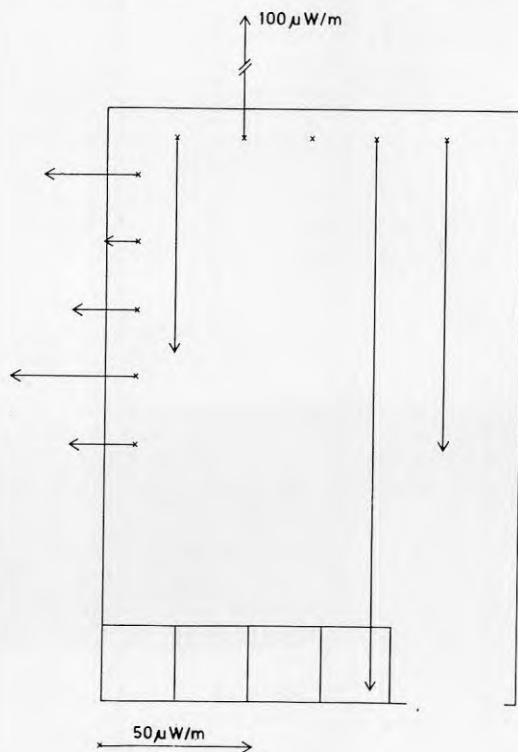


Figur 4.13. Fall C. Uppmätta intensiteter kring värmepumpen vid 170 Hz.

Värmepumpen ger bullerstörningar i lägenheten ovanför aggregatrummet. Mätningar visar att dessa störningar alstras av stomljud och inte av luftljudet och att den dominerande ljudutstrålningen kommer från rummets golv. Försök har därför gjorts att bestämma vilken väg stomljudet har tagit upp till detta golv: via lättbetongfasaden eller via den västra betongväggen. Mätningarna vid störkällan indikerar att ljudet vid 145 Hz kan gå upp i båda de aktuella väggarna. Mätningar har också gjorts på golvet en våning upp. Resultatet där, se figur 4.14, tyder snarare på att transmissionen via lättbetongväggen är dominerande.



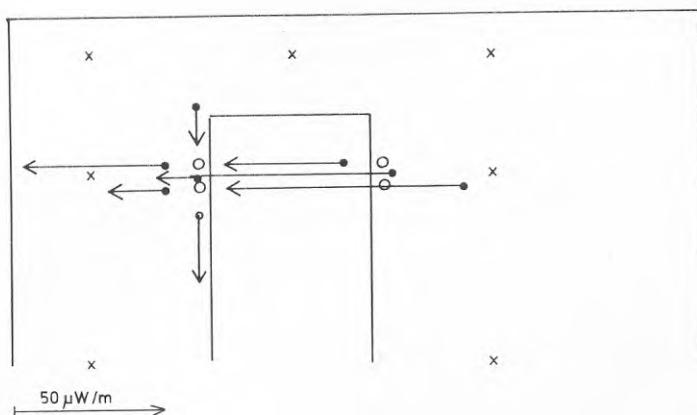
Figur 4.14. Uppmätta intensiteter vid 145 Hz i golvet ovanför värmepumpen i fall C.



Figur 4.15. Uppmätta intensiteter vid 170 Hz i golvet ovanför värmepumpen i fall C.

Vid 170 Hz pekar mätningarna vid källan på att transmissionen via betongväggen skulle vara dominerande, medan mätningarna på planet ovanför klart motsäger detta, figur 4.15.

Aggregatet är uppställt på fyra par av fötter. Ett försök har gjorts att bestämma källstyrkan vid ett av dessa par genom mätningar runt om punkten och också mellan de båda fötterna. Resultatet visar här, se figur 4.16, att knappast någon effekt kommer från de här aktuella fötterna. Liknande resultat har erhållits vid alla de andra fötterna, rörinfästningarna etc, trots att det står klart att störningarna transmitteras via en eller flera av dessa punkter.



Figur 4.16. Uppmätt intensitet i radiell riktning i fyra punkter kring ett par av maskinfötter samt pejlat i en punkt mitt emellan fötterna.

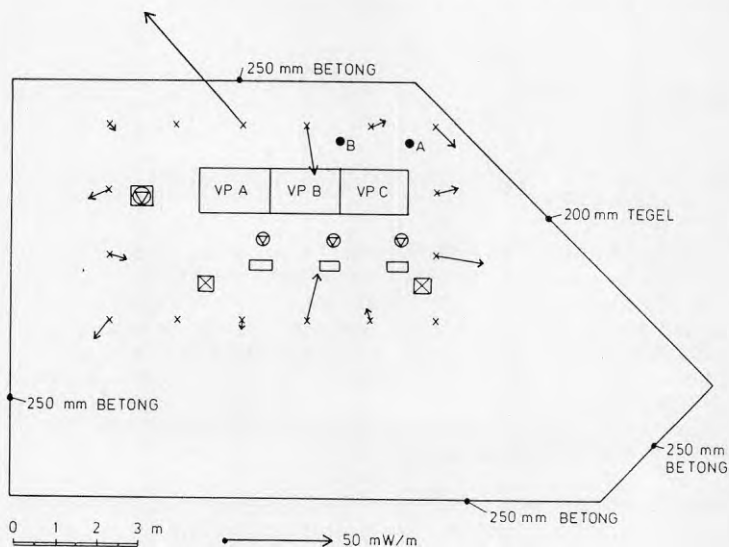
En anledning till att intensitetsmätningarna i detta fall givit så otydliga och motstridiga resultat kan vara att de aktuella plattorna är relativt små. En annan anledning kan vara att störningarna i detta fall kommer från ett antal källor med ungefär samma styrka. Denna förmodan grundas inte enbart på skillnaderna mot föregående fall utan även på erfarenheter från mätningar av luftljudsintensitet. Det är i det senare fallet väl känt att det är svårt att bestämma intensiteten om styrkan hos ett ovidkommande fält är för stor; som tumregel sägs ofta att intensiteten inte kan bestämmas när dess nivå ligger 10 dB under det totala fältets ljudtrycksnivå.

4.4 Praktikfall D

Det är även i detta fall fråga om en värmepumpsinstallation i bottenvåningen av ett bostadshus. Aggregatrummets dimensioner och lay-out framgår av figur 4.17. Bottenplattan består i detta fall av 100 mm betong som ligger på en fyllning av singel, vilken i sin tur ligger på mark. Plattans tjocklek förmodas vara större under värmepumparna och pelarna, men det var inte möjligt att få detta bekräftat.

Vid mätningarna var samtliga tre kompressorer i aggregatet i drift.

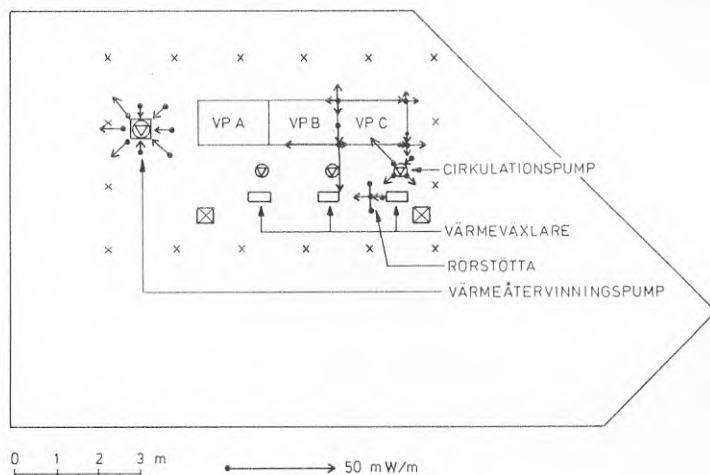
I en första mätomgång bestämdes intensiteten i en rad punkter på ganska stort avstånd från aggregatet. På detta sätt kom en rad sekundära källor såsom pumpar och värmväxlare innanför mätkonturen. Mekaniska intensiteter kunde detekteras vid frekvensen 245 Hz. Vid dessa mätningar pejlades först in riktningen för intensitetsminimum. Därefter bestämdes storleken på intensiteten genom en mätning där probens riktning valdes parallell med riktningen för intensitetsmaximum. Resultatet framgår av figur 4.17.



Figur 4.17. Dimensioner och lay-out hos aggregatrummet i fall D, samt bestämda intensiteter.

Mätresultatet ger som synes ingen entydig bild av energiflödet. Det är dock intressant att notera att bottenplattans punktmobilitet vid de punkter där mätresultatet är som mest diskutabelt (där intensitetsvektorerna är riktade inåt) har en topp vid en

frekvens som ligger mycket nära aggregatfrekvensen, 243,7 respektive 244,5 Hz. Denna mobilitetstopp finns inte vid de övriga punkterna, se exemplen i figurerna 4.18.

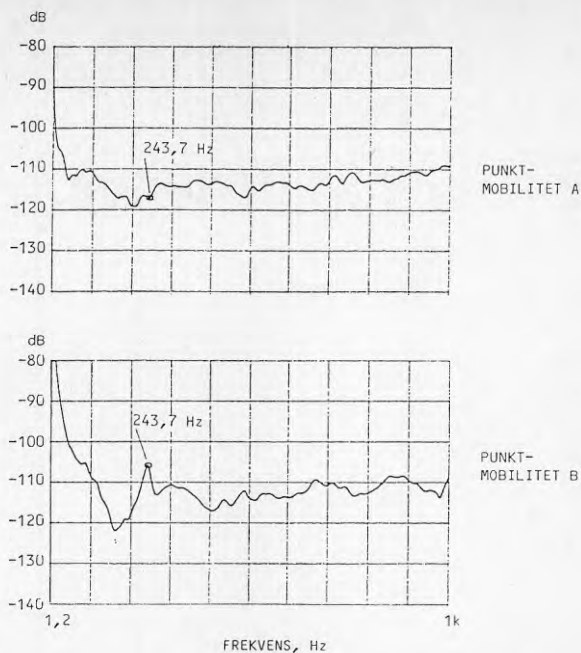


Figur 4.18. Uppmätta punktmobiliteter i punkterna A och B i figur 4.17.

Den i detta fall använda tekniken, där först riktningen för intensitetsmaximum pejas in och storleken sedan bestäms genom en mätning med proben riktad parallellt med intensitetsmaximum, var tidsödande. På grund av ofrånkomliga belastningsvariationer varierade nämligen intensiteten med tiden. Detta medförde att en tämligen lång integrations-tid måste väljas för mätningen i varje riktning, här 30 sekunder.

En test gjordes därför med intensitetsmätning i två ortogonala riktningar och beräkning av storlek och riktning hos det totala fältet enligt ekvationerna (42-43). De resultat som erhöles på detta sätt stämmer väl överens med de tidigare resultaten (så väl som kan förväntas med hänsyn till nivåvariationerna).

Mätningar gjordes också kring de olika delkällorna. Mätpunkterna placerades här på 250 mm avstånd från mittpunkten av respektive källa. I figur 4.19 redovisas resultatet från sex av de källor där 4 mätpunkter användes samt från en delkälla med 8 mätpunkter.



Figur 4.19. Uppmätta intensiteter kring några av delkällorna i fall D. Mätproben orienterad i radiell riktning.

I detta fall är de uppmätta intensiteterna uppenbart rimliga. Resultatet indikerar nettoflöden ut från värmepumpens fötter och från cirkulationspumpen (den "felaktiga" riktningen på intensiteten i en punkt vid cirkulationspumpen kan bero på inverkan av intilliggande aggregatfot). Något flöde ut från stöttan respektive värmeåtervinningspumpen är däremot inte indikerat. Det skall observeras att hela anläggningen var i drift vid dessa mätningar.

Man kan konstatera att slutsatsen beträffande värmeåtervinningspumpen inte ändras om antalet mätpunkter minskas till exempelvis 4.

Sammanfattningsvis indikerar mätningarna i detta fall att problem kan uppträda om mätavståndet från källan är stort. Detta är inte oväntat utan en naturlig konsekvens av intensitetsnivån inte får vara för låg i förhållande till det totala fältet, se också diskussionen i föregående fall. Med de korta avstånd som valts i den andra mätomgången är naturligtvis precisionen vid bestämningen av intensitetens belopp dålig, eftersom avstånden till källan är för korta, jämför diskussionen i avsnitt 2.5. Detta är dock av underordnad betydelse vid den här aktuella tillämpningen, där intensitetens riktning är viktigare än dess belopp. Det skall dock observeras att problem med tolkningen uppenbart kan uppträda vid en passiv källa med hög impedans.

Vidare visar resultaten från detta fall att det är lättare att bestämma intensitetsvektorns riktning genom mätning i två ortogonala riktningar än genom pejling. Resultaten antyder också att mätning i radiell riktning i 4 punkter kan vara tillräckligt nära en källa.

Det kan tilläggas att bullernivån i en intilliggande lägenhet var ca 30 dB(A).

LITTERATUR

Cremer, L, Heckl, M & Ungar, E E, 1988. Structure-Borne Sound. Springer-Verlag, Berlin.

Kruppa, P, 1986. Measurement of Structural Intensity in Building Constructions. Applied Acoustics, 19, p. 61-74.

Ljunggren, S, 1984a. Generation of Waves in an Elastic Plate by a Vertical Force and by a Moment in the Vertical Plane. Journal of Sound and Vibration, 90, p. 559-584.

Ljunggren, S, 1984b. Waves in Thick Plates. (Inter-Noise 84). Proceedings, p. 535-538.

Maysenhölder, W & Schneider, W, 1988. Localization of Sound Bridges in a Double Wall by Means of Vibrational Intensity Measurements. (Inter-Noise 88). Proceedings, p. 583-586.

Pavic, G, 1976. Technique for the Determination of Vibration Transmission Mechanisms in Structures. (Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, opublicerad stencil.)

Quinlan, D, 1985. Measurement of Complex Intensity and Potential Energy Density in Structural Bending Waves. (The Pennsylvania State University, Master of Science Thesis.)

Rasmussen, P, 1985. Measurement of Vibration Intensity. (Brüel & Kjaer A/S, Naerum, opublicerad stencil.)

Sorainen, E & Rytkönen, E, 1989. Determination of Propagation Paths of Vibration in the Floor of a Control Room Using Vibration Intensity Measurements. Applied Acoustics, 26, p. 1-7.

Verheij, J, W, 1980. Cross Spectral Density Methods for Measuring Structure Borne Power Flow on Beams and Pipes. Journal of Sound and Vibration, 70, p. 133-139.

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 871170-6
från Statens råd för byggnadsforskning till DNV
Ingemansson AB, Stockholm

R48: 1990 Buller från värmepumpar och kylmaskiner S Ljunggren, P Sahlin, M Johansson

Art. nr: 6801048

Abonnemangsgrupp:

W. Installationer

Z. Konstruktioner och material

Distribution:

Svensk Byggtjänst

171 88 Solna

Cirkapris: 41 kr exkl moms

R48: 1990

ISBN 91-540-5206-8

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm