

Schaalmodellen voor onderzoek aan constructiegeluid

Ir. J. H. JANSSEN

TECHNISCH PHYSISCHE DIENST TNO-TH

Samenvatting

Omschrijving van het begrip constructiegeluid; het belang van inzicht hierin voor de lawaaibestrijding.

Onderzoek op ware grootte is vaak duur, mathematische modellen zijn of te bewerkelijk of te sterk gestileerd dus ongebruikbaar; fysische schaalmodellen uitzonderlijk nuttig. Toekomstmogelijkheden.

Inleiding

Het woord constructiegeluid is de Nederlandse tegenwaarde van het Engelse „structureborne sound” of van het Duitse „Körperschall”. Het is een korte naam voor mechanische trillingverschijnselen in constructiedelen, vooral indien de frequenties ervan liggen binnen het hoorbare gebied en er bovendien uitstraling vanuit de constructiedelen naar de omringende lucht kan plaatsvinden. „Lucht” noch „hoorbaar” is evenwel essentieel; ook uitstraling onder water en infra- en ultrageluid worden er onder begrepen. De constructiedelen kunnen zijn platen of balken van gebouwen, voertuigen of vaartuigen. De trillingen kunnen sinusvormig of zeer onregelmatig zijn. Niet omvat worden eigenlijk de verschijnselen die optreden bij vermoeidheidsbreuken door trillingen, noch ook de verschijnselen als gevolg van schokbelasting. Meestal zal de uiteindelijke waarneming van het constructiegeluid door de mens geschieden; meestal zal dus het uiteindelijke belang van de studie van constructiegeluid liggen in de veiligheid of het comfort van mensen. Welhaast vanzelfsprekend liggen evenwel ook hier de grenzen niet duidelijk.

De studie van het constructiegeluid is een uitloper van de lawaaibestrijding. Er zijn enkele belangrijke onderwerpen. Zo is met name het grote belang, dat de Koninklijke Marine hecht aan de geruisveiligheid van onderzeeboten, mijnnevgers en onderzeebootjagers, een krachtige stimulans voor onderzoek op dit gebied. Onder water immers kan men uitstekend waarnemen, niet alleen dat er een schip geluid maakt maar ook wár het zich bevindt, wat voor type het is en wat het doet. Er is weinig fantasie voor nodig om hiervan enkele consequenties te doordenken.

Geluidafstraling door stalen constructies zoals scheepsrompen vormt dan ook reeds jaren een onderwerp van diepgaande studie. Daarvan kunnen wij profiteren bij andere problemen. Om bij schepen te blijven: zowel op binnenschepen als op zee-

Summary

What is structureborne sound? Understanding it, is essential for efficient noise control. Full scale investigations are expensive, mathematical models either too laborious or too much simplified, scale models now available, show extremely useful. Future possible applications.

schepen vormt met name het dieselmotorlawaaai een steeds groter hindervraagstuk.

De vraag hoe het constructiegeluid, afkomstig van de motoren en van allerlei hulpwerktuigen in de machinekamer, tenslotte de accommodatie bereikt, is, zij het nog niet volledig, eerst onlangs beantwoord [1].

Zo'n antwoord is uiteraard van groot belang voor het nemen van doeltreffende maatregelen om de lawaaihinder op economische wijze te verminderen. Op een dergelijke wijze zou nader onderzoek wellicht ook van belang kunnen zijn voor enkele vragen uit de bouwakoestiek.

Men kan hier bijvoorbeeld denken aan het vaak voorkomende geval van een middelgrote drukkerij die in de binnenstad is ingebouwd tussen buurhuizen. Voorkómen moet worden, vooral 's nachts, dat de burenen geluidhinder ondervinden. Hoe komt het constructie- of luchtgeluid echter bij de burenen binnen? Ook enkele vragen over de geluidvoortplanting door het beton- of staalskelet van flatgebouwen liggen op het gebied van het constructiegeluid. In ieder geval is het duidelijk dat een goede kennis van de eigenschappen van constructiegeluid, inclusief uitstraling in lucht of water, van groot belang is voor efficiënte lawaaibestrijding.

Modelproeven

Het behoeft geen nader betoog dat weliswaar ervaring de beste leermeester is, maar dat ervaring in de praktijk opdoen óf uitzonderlijk langzaam gaat, óf schatten geld kost als men kennis — zeker weten — wil vergaren omtrent constructiegeluid. Ook voor dit vakgebied kan men echter gelukkig een aantal algemene akoestische basisgedachten ontwikkelen met behulp van in principe eenvoudige wiskundige modellen. Uitgaande van enkele „wetten” zoals die van Newton over kracht, vrije massa en versnelling en die van Hooke over kracht, stijfheid en vervorming en een veronderstelling over

trillingenergie-dissipatie, analoog aan de „wet” van Ohm in de elektriciteitsleer, kan een voor de akoestiek bruikbaar stelsel van gelineariseerde differentiaalvergelijkingen worden opgezet voor de bewegingen van praktisch veel voorkomende materie — in de vorm van balken en platen — en van lucht en water.

Het blijkt dat het uitwerken van de oplossingen van deze differentiaalvergelijkingen weliswaar soms zeer gecompliceerd of haast ondoenlijk is, maar ook dat het inderdaad goede beschrijvingen van de werkelijkheid oplevert. Om niet in de filosofische vraag van wat de werkelijkheid is te vervallen, stellen we liever pragmatisch vast dat „voorspellingen”, indien gedaan op grond van deze wiskundige modellen, telkens voldoende nauwkeurig uitkomen. We verwachten dus dat het een volgende keer wel weer zo zal lopen.

Tot zover klinkt alles prachtig, maar hoe vangt men, om een voorbeeld te noemen, een onderzeeboot in een wiskundig model? De studie van een omwentelingsellipsoïde met orthotrope eigenschappen kan veel resultaten leveren. Er zullen evenwel tussen theorie en experiment verschillen worden geconstateerd. De vraag is nu waar die een gevolg van zijn; van essentiële factoren of van toevallige. Een onderzeeboot — nog steeds als voorbeeld — is nu eenmaal geen omwentelingsellipsoïde.

De minste asymmetrie van de werkelijke boot kan dus grote afwijkingen van de theorie tot gevolg hebben in de geluiduitstraling; of was het toeval, bijvoorbeeld omdat niet helemaal de juiste huid-dikte in de berekening werd opgenomen?

Belangrijker bovendien is misschien nog dat in het inwendige van een dergelijke boot allerlei fundatieconstructies worden toegepast die niet of nauwelijks wiskundig zijn te beschrijven. De ontwerper evenwel wil voorspellingen over het akoestische gedrag van zijn boot, inclusief die fundaties waarop de lawaaibronnen staan opgesteld.

Met behulp van wiskunde alleen blijft dit een voorlopig onoplosbaar vraagstuk. Nu zou men door een zeer groot aantal praktijkproeven aan onderzeeboten zelf op den duur wel de typerende eigenschappen kunnen leren kennen. Men vraagt echter niet wat dat kost aan tijd, organisatie, geld en inzicht in het probleem.

Een voordeel van het wiskundige model is dat men betrekkelijk eenvoudig allerlei parameters kan variëren en de invloed ervan op de akoestische eigenschappen kan nagaan. Een onpraktische symmetrie eruit werken kan echter alleen door een veel gecompliceerder model op te zetten.

Zelfs met moderne rekenruigen schiet dan toch de theorie al spoedig te kort, vooral omdat nog lang niet voldoende bekend is, hoe allerlei constructie-details wiskundig moeten worden vertaald. In een dergelijk geval daarentegen is een schaalmodel juist op zijn plaats. Betrekkelijk eenvoudig en goedkoop kan men asymmetrieën invoeren of wegnemen, of ook details wijzigen. Wat typerend en wat toevallig is komt al vrij snel tot uiting. Bovendien: schaalmodellen kunnen worden gemaakt door enthousiaste instrumentmakers. Een rekenprogramma daarentegen impliceert zeer veel voorstudie, een rekenruig, programmeurs en wat niet al. Door

de vele onzekere stappen in een voorspelling via de wiskunde alléén boet het mathematische model sterk aan geloofwaardigheid in. Alleen al daarom heeft een fysisch model grote voordelen; men kan allerlei vereenvoudigingen of stelingen op hun toelaatbaarheid toetsen zonder dat men in zeer gecompliceerde procedures vervalt. Als een schaalmodel inderdaad betrouwbaar kan worden vervaardigd dan kan de trits van proeven: aan een echte boot (het prototype), van mathematische modelproeven en van fysische modelproeven een schat van elkaar aanvullende inzichten opleveren.

Nu ziet het er naar uit dat inderdaad akoestische schaalmodellen betrouwbaar kunnen worden gebouwd. De theorie zegt namelijk dat in gelijkvormige constructies met gelijkvormige bewegingen, gelijke spanningen of drukken zullen optreden als op overeenkomstige plaatsen gelijke materialen zijn verwerkt en als de tijdschaal evenveel wordt verkleind als de lengteschaal.

Met andere woorden: een stalen schip op model-schaal nagebouwd, uit exact dezelfde materialen op de juiste corresponderende plaatsen, zal zich akoestisch geheel gelijk aan het ware-grootte-schip gedragen.

Uiteraard is nu het probleem verplaatst; hoe kun je immers op schaal lassen, klinken, boren, lijmen, beschieten, enzovoort? Het antwoord op deze vraag is, dat het niet kan maar ook niet hoeft. Juist door de afwijkingen komen de essentiële trekken beter tot uiting. Al doende leert men, vooral ook door het vervaardigen van modellen van eenvoudige prototypen. Overeenstemming hierbij geeft vertrouwen voor meer gecompliceerde gevallen.

Voordat we nu enkele toekomstmogelijkheden van het onderzoek van constructiegeluid vraagstukken met behulp van schaalmodellen nagaan, moeten we volledigheidshalve eerst nog iets opmerken over de demping. We doelen hierbij op de ont-trekking van trillingenergie aan het systeem, doordat er dissipatie optreedt. Deze dissipatie laat zich namelijk niet zo gemakkelijk op schaal nabootsen. Omdat dissipatiedemping een wezenlijke rol kan spelen, moeten we het effect ervan zorgvuldig onderzoeken. Het blijkt gelukkig betrekkelijk eenvoudig een extra demping in een met opzet zo dempingloos mogelijk gebouwd model aan te brengen in de vorm van dempende lagen. Vindt men dat daardoor de eigenschappen van het onderzochte model niet sterk veranderen, dan speelt demping geen rol. Blijkt het tegenovergestelde, dan is het inzicht verdiept. Wellicht kan er nuttig gebruik van worden gemaakt.

Toekomstmogelijkheden

In ons laboratorium hebben we tot nog toe ervaring opgedaan met het bouwen van enkele akoestische schaalmodellen vooral van schepen, zowel houten als stalen. Het betrof hierbij niet een volledig schip, maar alleen akoestisch interessante delen ervan. Allerlei visueel sterk opvallende maar akoestisch niet wezenlijke details konden worden weggelaten.

Zo bleek bijvoorbeeld bij een model van een schachtwand met aangrenzende dekken van een

motorvrachtschip, dat redelijke gelijkenis met het prototype zelfs nog behouden blijft, ook al is de lengte van het model nog maar een spantafstand groot! Ook werd tamelijk uitvoerig onderzocht in hoeverre de modellastechniek reproduceerbare resultaten oplevert. Het gebezigde inerte gassysteem (MIG-CO₂) voldoet goed voor staalplaatdikten van 0,6 mm en meer. Thans wordt gewerkt aan „lasrecepten”, dat wil zeggen aan voorschriften over de wijze waarop een bepaalde prototype-las efficiënt kan worden gemodelleerd.

Het effect van dempende lagen op de voortplanting van constructiegeluid door stalen constructies en op de uitstraling kan op modelschaal uitstekend worden bestudeerd. Omdat wijzigingen in constructies eenvoudig zijn aan te brengen en omdat de modellen bovendien zeer illustratief zijn, lijkt enerzijds de weg open te liggen voor bijzonder vruchtbaar onderzoek naar het gedrag van allerlei praktisch voorkomende constructies, om dan eventueel later daaruit wiskundige modellen af te leiden. Anderzijds is het voor advieswerk van uitzonderlijk belang, de beschikking te hebben over een

middel om bij kostbare voorzieningen een voorspelling over de toekomstige akoestische eigenschappen van een alleen nog maar op papier bestaand project te kunnen doen.

Zo kan men onderzoeken wat het effect is van het verend ophangen van een uitlaatleiding van een grote scheepsdieselmotor. Ook de trillingoverdracht via slangen, pijpen en kabels of via rubber veren leent zich voor bestudering. Bovendien is het waarschijnlijk dat de luchtgeluidisolerende eigenschappen van muren bij verschillende inklemmingen kunnen worden onderzocht. Neemt men hierbij in aanmerking dat ook het akoestisch modelonderzoek van bijvoorbeeld uitlaatgeluiddempers bijzonder goed werkt, dan ligt de conclusie voor de hand dat het algemene akoestische schaalmodelonderzoek een nieuw en machtig hulpmiddel is voor een efficiënte lawaaibestrijding.

Literatuur

- [1] *Janssen, J. H.*, Model experiments on sound transmission from engine room to accommodation in motorships. Report no 87 S Nederlands Scheeps-Studiecentrum TNO Delft, december 1966.