

Bewegingstegenkoppeling bij luidsprekers

J. A. Klaassen en S. H. de Koning

Al sinds lang is de versterkertechniek nauwelijks denkbaar zonder gebruik van tegenkoppeling ter vermindering van lineaire en niet-lineaire vervorming. Ook in de elektro-akoestiek is dit het geval. Een belangrijke bron van vervorming is hier echter de luidspreker, en de bijdrage hiervan blijft bij tegenkoppeling in de elektronische schakeling onbeïnvloed. Het blijkt nu mogelijk te zijn ook het weergeefmechanisme van de luidspreker in de tegenkoppeling te betrekken. Een bepaalde methode hiervoor, waarbij van een verankelingsopnemer gebruik wordt gemaakt, is door de auteurs theoretisch en experimenteel onderzocht.

Problemen bij kleine luidsprekerkasten

In het elektrische deel van een elektro-akoestische keten — microfoon, versterker, luidspreker — wordt vervorming vanouds bestreden door tegenkoppeling (negatieve terugkoppeling). De vervorming die ontstaat buiten het elektrische deel wordt hierdoor echter niet beïnvloed. Dit is voornamelijk de vervorming die in de luidspreker optreedt, bij de omzetting van een stroom in een kracht en van een kracht in de beweging van een membraan en van de omringende lucht. Het bovenstaande heeft zowel betrekking op vervorming van de intensiteitsverdeling over het spectrum (lineaire vervorming) als op het ontstaan van hogere harmonischen (niet-lineaire vervorming).

Het membraan heeft bij een elektrodynamische luidspreker meestal de vorm van een conus, die verend is opgehangen. Nabij de top is een cilindrische spoel (de „spreekspoel”) bevestigd die kan bewegen in een radiaal gericht magnetisch veld. Een variërende elektrische stroom door de spoel doet een variërende kracht ontstaan, die spoel en conus in beweging brengt. Hierbij kan lineaire vervorming optreden, door het feit dat dit massa-veersysteem een bepaalde resonantiefrequentie heeft. Niet-lineaire vervorming kan ontstaan doordat de veerkracht van het ophangstelsel van de conus niet volkomen lineair varieert met de conusuitwijking. Ook inhomogeniteit van het magneetveld kan niet-lineaire vervorming veroorzaken.

De lucht die zich nabij de conus bevindt verzet zich tegen de beweging en vormt dus een belasting voor de conus. Deze belasting heeft een reactief deel, de stralingsreactantie X_r , en een resistief deel, de stralingsweerstand R_r . De laatstgenoemde grootte is een maat voor het vermogen P dat bij een bepaalde trillingssnel-

heid $\dot{x}$ van de conus als geluid wordt uitgestraald ($P = \dot{x}^2 R_r$). X_r en R_r hangen af van de afmetingen van de conus en van de frequentie (zie fig. 1). Als men ervoor zorgt dat de lucht niet kan bewegen van de voorzijde van de conus naar de achterzijde, of omgekeerd, is R_r bij lage frequenties evenredig met het kwa-

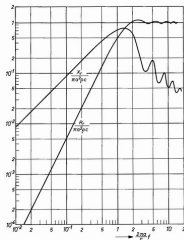


Fig. 1. Verloop (op dimensieloze schalen) van de stralingsreactantie X_r en de stralingsweerstand R_r van een luidspreker in een kleine gesloten kast als functie van de frequentie f . ρ straal van de conus, c dichtheid van de lucht, c snelheid van het geluid in lucht. Bij hoge frequenties nadert de stralingsweerstand per eenheid van oppervlak tot ρc , de specifieke akoestische impedantie van lucht. $X_r/2\pi f$ is de zg. stralingsmassa.

draat van de frequentie. Bij hoge frequenties daarentegen is R_r vrijwel constant. Uit dit verloop blijkt dat voor het uitstralen van een bepaald vermogen bij lage tonen veel grotere snelheden, dus ook veel grotere uitwijkingen van de conus nodig zijn dan bij hoge tonen. Bij lage tonen is dan ook het gevaar voor optreden van niet-lineaire vervorming het grootst.

Hoewel bij vele soorten geluid het vermogen in de lage tonen kleiner is dan dat in de tonen van het middengebied, komen ook geluiden voor met een grote bijdrage van de laagste tonen. Om ook dergelijke geluiden goed te kunnen weergeven, moet de apparatuur in staat zijn bij de lage tonen een even groot akoestisch vermogen te leveren als bij hogere tonen.

Bij lage tonen gaat het uitgestraalde vermogen sterk achteruit als geluidsgolven van de achterzijde van de conus kunnen interfereren met golven die door de voorzijde worden uitgestraald. Een goede scheiding is in de praktijk meestal alleen te verwezenlijken door de luidspreker te monteren in de wand van een kast die overigens geheel gesloten is. Maken we in verband met de plaatsruimte deze kast klein, dan gedraagt de ingesloten lucht zich als een veer; de conusuitwijking wordt erdoor verkleind — weer ten detrimente van de uitstraling der lage tonen — en de resonantiefrequentie verhoogd.

De resonantiefrequentie, die men in het algemeen zo laag tracht te maken dat deze aan de ondergrens van het weer te geven frequentiegebied ligt, kan bij gebruik van een kleine luidsprekerkast in dit gebied komen te liggen, waardoor een sterke lineaire vervorming ontstaat. Ook bij de weergave van plotselinge inzetten („sprongfuncties”) is dan de luidsprekerresonantie zeer hinderlijk. De „veerkracht” van het luchtkussen achter de conus verloopt bovendien niet lineair met de conusuitwijking, dit veroorzaakt ook niet-lineaire vervorming.

Voor de meeste in de praktijk voorkomende gevallen — zelfs als men denkt aan „hi-fi”-apparatuur —, kan men de genoemde tekortkomingen met conventionele middelen binnen de perken houden. Het is echter interessant om op te merken dat men voor extreem hoge eisen aan de geluidswaergave, of ingeval voor de luidspreker slechts een zeer kleine ruimte beschikbaar is, een verbetering in de geluidswaergave kan bereiken door de in het begin genoemde tegenkoppeling niet te beperken tot het elektrische gedeelte van de apparatuur, maar hierin ook het weergeefmechanisme van de luidspreker te betrekken. Men moet dan naar de ingang van de versterker een spanning terugvoeren die niet een maat is voor de aan de luidspreker toegevoerde stroom of spanning maar voor het uitgestraalde geluid. Deze vorm van tegenkoppeling, die men de naam *bewegings-*

tegenkoppeling (*motional feedback*) heeft gegeven, vormt het onderwerp van dit artikel. Na enige theoretische beschouwingen zullen we twee opstellingen beschrijven waarmee bewegingstegenkoppeling is gerealiseerd. De metingen hieraan hebben uitgewezen dat hiermee de beoogde verbetering inderdaad kan worden bereikt.

Bewegingstegenkoppeling

Historie

Voor bewegingstegenkoppeling moet een signaal worden opgewekt, dat een maat is voor het uitgestraalde geluid. Men zal hierbij allereerst aan het gebruik van een microfoon denken. Deze komt echter hiervoor nauwelijks in aanmerking, omdat de looptijd van het geluid tussen luidspreker en microfoon een grote fazedraaiing introduceert, die sterk van de frequentie afhangt.

Bij lage tonen (beneden ongeveer 500 Hz) kan men een spanning die een maat is voor het uitgestraalde geluid, afleiden uit de bewegingen van de spoel. Dit is mogelijk omdat in dit frequentiegebied de conus als een stijf geheel trilt. (Het conusoppervlak beweegt „isofazisch”). Bij hoge tonen is dit niet het geval.)

De beweging van de spreekspoel kan men op verschillende manieren in een signaalspanning omzetten. Men kan nl. een spanning afleiden uit de *verplaatsing* van de spoel (b.v. met een capacitieve methode), uit zijn *snelheid* (b.v. met een inductieve methode), ofwel uit zijn *versnelling* (gebruik makend van traagheidskrachten). We zullen in het hierna volgende korthedshalve van verplaatsings-, snelheids- en versnellings tegenkoppeling spreken. Tussen deze manieren bestaat een belangrijk principieel verschil: voor het bepalen van plaats en snelheid van een bewegend punt is altijd een stilstaand referentiepunt nodig; bij een versnelling is dit niet het geval. Wij komen hierop nog nader terug.

Een tot op heden veel toegepast systeem voor bewegingstegenkoppeling bestaat hierin dat men *snelheidstegenkoppeling* toepast en als maat voor de snelheid van de spreekspoel de spanning gebruikt die in deze spoel zelf wordt geïnduceerd door zijn beweging in het magnetische veld⁽¹⁾. Deze spanning moet dan uiteraard worden gescheiden van de spanning die vanuit de versterker aan de spoel wordt toegevoerd. Enkele methodes hiervoor zijn weergegeven in fig. 2. In al deze schema's wordt een impedantie Z_e opgenomen die (althans in fazehoek) gelijk is aan de elektrische impedantie die de luidspreker heeft als de beweging van de spoel wordt verhinderd. Omdat de luidspreker in werkelijkheid niet op deze wijze is geblokkeerd, is zijn impedantie echter niet gelijk aan Z_e . Men

(1) Zie W. Holte, Gegenkopplung an Lautsprechern, Funk-Technik 7, 490-492, 1952.

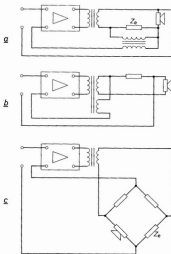


Fig. 2. Enkele methodes voor snelheidstegenkoppeling, waarbij gebruik wordt gemaakt van de spanning die in de spreekspoel zelf wordt geïnduceerd door zijn beweging in het magnetische veld. In serie met de luidspreker is een impedantie Z_e geschakeld, die gelijk is aan de impedantie van de luidspreker in geblokeerde toestand. Het verschil van de spanningen op de luidspreker en op Z_e wordt verkregen met behulp van een aparte transformator (a), of met een extra-wikkeling op de uitgangstransformator (b), of met een brugschakeling (c). Deze verschilspanning wordt met de juiste fase gevoegd bij het ingangssignaal.

kan nu de spanning op Z_e aftrekken van de luidspreker-spanning, b.v. met behulp van een extra-transformator (fig. 2a), een extra-wikkeling op de uitgangstransformator van de versterker (fig. 2b), of een brugschakeling (fig. 2c). Het verschil van deze spanningen wordt dan naar de ingang van de versterker teruggevoerd.

Een dergelijke wijze van tegenkoppelen kan men ook beschouwen als een methode om de uitgangsimpedantie van de versterker gelijk en tegengesteld te maken aan de impedantie van de luidspreker in geblokeerde toestand. Men spreekt daarom ook van versterkers met *negatieve uitgangsimpedantie* [2]. De versterker functioneert dan als een spanningsbron die uitsluitend belast is met dat gedeelte van de luidsprekerimpedantie dat een gevolg is van het bewegen van de spreekspoel (bewegingsimpedantie, Engels *motional impedance*).

Een moeilijkheid bij de genoemde methodes ontstaat door het feit dat de weerstand van de spreekspoel van de temperatuur afhangt. Een ander bezwaar vormt de

inhomogeniteit van het magneetveld; dit maakt dat de verkregen spanning geen getrouw beeld geeft van de snelheid van de spoel. Om deze redenen worden deze schakelingen weinig meer gebruikt.

Bij een andere methode brengt men op de koker van de spreekspoel een extra-spoeltje aan en gebruikt de hierin geïnduceerde spanning als maat voor de snelheid. Men moet dit extra-spoeltje dan zo aanbrengen dat de wederzijdse inductie met de spreekspoel zeer klein is. Verder moet een volstrekt niet bewegend referentiepunt beschikbaar zijn. Dit is gewoonlijk niet het geval door trillingen van de luidspreker zelf en door het uitgestraalde geluid, waarbij mechanische resonantieverschijnselen kunnen optreden.

Bij het toepassen van *verplaatsingstegenkoppeling* met behulp van capaciteitsvariëaties ontmoet men eveneens het bezwaar dat men moet beschikken over een stilstandpunt. Bovendien hebben hierbij ook andere dan axiale bewegingen van de spreekspoel invloed op de verkregen spanning.

De hierboven genoemde methodes zijn wel bruikbaar als men de bewegingen van de spreekspoel wil meten en men zich hierbij bewust is van de binnensluitende fouten. Voor tegenkoppeling zijn de op deze wijze verkregen signalen echter in verband met de genoemde bezwaren ongeschikt gebleken.

Aan de opgesomde moeilijkheden ontkomt men als men tegenkoppelt door middel van een signaal dat een maat is voor de *versnelling* van de spreekspoel. Bij het in dit artikel beschreven systeem is deze methode toegepast. Omdat het invoeren van bewegingstegenkoppeling bij hogere frequenties met grote moeilijkheden gepaard gaat (het systeem is dan moeilijk stabiel te houden), hebben wij het frequentiegebied van de tegenkoppeling zodanig beperkt dat deze alleen werkzaam is bij lage frequenties. Aangezien, zoals wij aantoonen, de vervorming hierbij het grootst is, wordt dan reeds een grote verbetering bereikt.

De uit een versnellingsopnemer verkregen spanning kan men één- of tweemaal integreren en zodoende alsnog, zonder de beschreven bezwaren, een spanning verkrijgen die evenredig is met de snelheid of de verplaatsing. Op deze wijze kunnen we dus met eenzelfde opnemer versnellings-, snelheids- of verplaatsingstegenkoppeling tot stand brengen, en ook combinaties hiervan.

Theoretische beschouwingen

Spoel en conus van een luidspreker kan men bij lage frequenties beschouwen als een enkelvoudig massa-veersysteem. De resonantiefrequentie hiervan zullen wij kortweg als de resonantiefrequentie van de luidspreker aanduiden. Voor dit massa-veersysteem geldt de volgende bewegingsvergelijking:

$$m\ddot{x} + r\dot{x} + sx = F. \quad (1)$$

Hierin is F de op de spoel uitgeoefende kracht, x de uitwijking uit de evenwichtsstand, m de massa, r de wrijvingsweerstand en s de veerconstante. Van een dergelijk systeem is de resonantiefrequentie [10]:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{m}}, \quad (2)$$

en de kwaliteitsfactor:

$$Q_0 = \omega_0 \frac{m}{r} = \frac{1/\sqrt{ms}}{r}, \quad (3)$$

Past men versnellingsstegenkoppeling toe, dan wordt de stroom door de spreekspoel en dus de hiermee evenredige kracht F vermindert met een term die evenredig

andert hierdoor niet, doch de kwaliteitsfactor wordt kleiner. Verplaatsingsstegenkoppeling vergroot schijnbaar de veerconstante s , waardoor de resonantiefrequentie hoger en de kwaliteitsfactor groter wordt.

Door een combinatie van de bovengenoemde tegenkoppelsystemen kunnen de resonantiefrequentie van de luidspreker en de kwaliteitsfactor onafhankelijk van elkaar worden ingesteld, zodat men het verloop van de amplitudekarakteristiek [4] bij lage frequenties kan beheersen.

De resonantiefrequentie en de kwaliteitsfactor van een systeem met bewegingstegenkoppeling kunnen worden berekend aan de hand van een vervangingschema. In fig. 3 is hiertoe een eindversterker voorgesteld door een spanningsbron met een elektromotorische kracht ge (g versterkingsfactor, e ingangsspanning) en een inwendige weerstand R_i . De luidspreker is voorgesteld

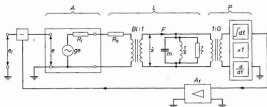


Fig. 3. Vervangingschema van een systeem, bestaande uit een eindversterker A met luidspreker, waarbij bewegingstegenkoppeling is toegepast. De luidspreker L is vervangen door een elektrisch analoog in de vorm van een parallelkring, die door middel van twee ideale transformatoren gekoppeld is met de versterker en met de opname P . De spanning op de kring is nu analoog met de snelheid $\dot{x}$ van spreekspoel en cosus. Al naar de aard van de opname levert deze een signaal dat evenredig is hetzij met $\int \dot{x} dt = x$, hetzij met $\dot{x}$, ofwel met $\ddot{x}$ ($\ddot{x} = \dot{\dot{x}}$).

is met $\ddot{x}$. Noemen we de evenredigheidsfactor m' , dan wordt de bewegingsvergelijking:

$$m\ddot{x} + r\dot{x} + sx = F - m'\ddot{x},$$

of

$$(m + m')\ddot{x} + r\dot{x} + sx = F. \quad (4)$$

De massa is dus schijnbaar toegenomen. Ten gevolge hiervan wordt de resonantiefrequentie lager en de kwaliteitsfactor groter. Op overeenkomstige wijze kan men aantonen dat snelheidstegenkoppeling de dempings-term schijnbaar vergroot; de resonantiefrequentie ver-

door een elektrisch analoog in de vorm van een parallelkring, waarbij de capaciteit analoog is met m , de zelfinductie met de omgekeerde waarde van s en de weerstand met de omgekeerde waarde van r (zie verg. 3). De stralingsmassa en de stralingsweerstand worden in m resp. r opgenomen gedacht. De op de spreekspoel werkende kracht F is nu analoog met de aan de kring toegevoerde stroom. Omdat deze kracht gelijk is aan $B\dot{x}$ (B magnetische inductie, l draadlengte, i stroom), kan men de overgang van elektrische naar mechanische grootheden in het schema aangeven door een ideale transformator met windingsverhouding $B:l$. In de uitgangsketen van de versterker is ook de weerstand R_s van de spreekspoel opgenomen. (Omdat dit vervangingschema alleen wordt gebruikt bij lage frequenties, kunnen we de zelfinductie van de spreekspoel buiten beschouwing laten.)

De spanning op de kring blijkt nu analoog te zijn met de snelheid $\dot{x}$ van de spreekspoel. Als vervanging van de opname is allereerst een tweede ideale transformator met windingsverhouding $1:G$ getekend (G is een maat voor de gevoeligheid). Afhankelijk van de aard van de opname levert deze een signaal dat evenredig is met $\int \dot{x} dt = x$, met $\dot{x}$ of met $\ddot{x}$ ($\ddot{x} = \dot{\dot{x}}$) (verplaatsings-, snelheids- of versnellingsopname). De ingangsimpedantie van de opname wordt als oneindig groot beschouwd; zijn mechanische eigenschappen worden gezocht te zijn inbegrepen in de grootheden m , s en r van de luidspreker. Het uitgangs-

[10] Zie R. L. Tanner, Improving loudspeaker response with motion feedback, Electronics 24, no. 3, 142 e.v., 1951; R. E. Werner, Loudspeakers and negative impedances, IRE Trans. AU-6, 83-89, 1958; H. W. Holdaway, Design of velocity-feedback transducer systems for stable low-frequency behavior, IEEE Trans. AU-11, 155-173, 1963.

[11] We verstaan hier onder de resonantiefrequentie de frequentie waarbij de impedantie van de luidspreker reëel is.

[12] De amplitudekarakteristiek is de grafiek van de amplitude van de geluidsdruk, gemeten op de as van de luidspreker in een vrij geluidsveld als functie van de frequentie bij constante spanning op de luidsprekerklemmen.

Tabel 1. Eigenschappen van een luidspreker met bewegingstegenkoppeling.

	versnellings- tegenkoppeling	snelheids- tegenkoppeling	verplaatsings- tegenkoppeling
resonantie- frequentie	$\frac{\omega_0}{2\pi} \sqrt{1 + \frac{g A_1 G B I}{m(R_1 + R_2)}}$	$\frac{\omega_0}{2\pi}$	$\frac{\omega_0}{2\pi} \sqrt{1 + \frac{g A_1 G B I}{s(R_1 + R_2)}}$
kwaliteits- factor	$Q_0 \sqrt{1 + \frac{g A_1 G B I}{m(R_1 + R_2)}}$	$\frac{Q_0}{1 + \frac{g A_1 G B I}{B^2 P + r(R_1 + R_2)}}$	$Q_0 \sqrt{1 + \frac{g A_1 G B I}{s(R_1 + R_2)}}$

signaal van de opnemer wordt. A_1 maal versterkt en naar de ingang van de versterker teruggestuurd.

Met behulp van fig. 3 kunnen we de invloed nagaan van de tegenkoppeling op de resonantiefrequentie en de kwaliteitsfactor van het systeem. We komen dan tot de in tabel 1 vervatte resultaten, waarbij ω_0 en Q_0 de door de formules (2) en (3) gedefinieerde waarden zonder tegenkoppeling zijn. We zien in deze tabel de hierboven reeds genoemde invloed van de verschillende vormen van bewegingstegenkoppeling op de resonantiefrequentie en op de kwaliteitsfactor kwantitatief weergegeven.

Keuze van het type tegenkoppeling

Omdat bij lage tonen de opgewekte geluidsdruk evenredig is met de versnelling van de conus, kan een vlakke amplitudekarakteristiek in dit gebied worden verkregen indien de versnelling van de conus onafhankelijk van de frequentie wordt gemaakt. Dit kan worden bereikt met versnellings-tegenkoppeling. Een dan optredend bezwaar is echter dat de resonantie meer merkbaar wordt. Weliswaar verlaagt de tegenkoppeling de resonantiefrequentie, doch de kwaliteitsfactor neemt toe, waardoor een piek in de amplitudekarakteristiek ontstaat. Een verbetering kan in dit opzicht worden bereikt door tevens snelheidstegenkoppeling toe te passen. We hebben immers gezien dat hierdoor de kwaliteitsfactor kleiner wordt.

Een gunstige bijzonderheid bij versnellings-tegenkoppeling is dat hierbij de tegenkoppelfactor met toenemende frequentie toeneemt (bij een constante verplaatsingsamplitude neemt immers de versnelling met de frequentie toe). Hierdoor worden de gevormde hogere harmonischen sterker onderdrukt dan bij verplaatsings- of snelheidstegenkoppeling.

De opnemer

Zoals reeds vermeld, hebben wij gebruik gemaakt van een versnellingsopnemer. Deze bestond in hoofdzaak uit een schijfje piezo-elektrisch (p.e.) materiaal dat aan één zijde op de spoelkoker van de luidspreker is bevestigd. Wanneer dit schijfje in trilling wordt gebracht, werken hierin traagheidskrachten, waardoor tussen de eindvlakken van het schijfje een spanning ontstaat, die een maat is voor de versnelling van de spoelkoker. De massa moet beperkt gehouden worden

om de weergave van de hoge tonen niet te schaden.

Het grootste signaalvermogen bij gegeven massa wordt verkregen met een p.e. element dat in de versnellingsrichting langgerekt is. De impedantie kan dan evenwel zo hoog zijn dat de aan te sluiten versterker moeilijkheden ondervindt

van kruipstromen. Ook zouden stoorspanningen hier zeer gemakkelijk geïnduceerd kunnen worden. Hoewel een optimale configuratie gevonden kan worden door een in de versnellingsrichting uitgevoerde stapeling van dunne, parallelgeschakelde p.e. elementen, is om redenen van technologische eenvoud een dun p.e. element van niet te kleine capaciteit gekozen, dat aan de van de spoelkoker afgekeerde zijde is voorzien van een ballastmassa. In de hieronder te beschrijven voorbeelden bedraagt de capaciteit ongeveer 600 resp. 3000 pF.

Bij de eerste experimenten was het p.e. element op de rand van de spoelkoker gelijmd. Het bleek toen dat in de spoel ook niet-axiaal gerichte krachten optraden, die ongewenste uitgangssignalen deden ontstaan. De montage van de opnemer is nadien zo veranderd dat de genoemde krachten geen invloed op het p.e. element hebben.

Een andere mogelijke oorzaak van ongewenste spanningen in het p.e. element zijn de luchtdrukvariaties waaraan het bij zijn bewegingen is blootgesteld. Een middel hiertegen is het plaatsen van het element in een volledig gesloten huis. Als men dit van metaal maakt, kan het tevens als elektrische afscherming dienst doen.

Het rendement van een luidspreker

Een gelijkmatige weergave kan bij een normale luidspreker alleen worden verkregen voor een frequentiegebied dat boven de resonantiefrequentie ligt. Beneden deze frequentie neemt nl. het rendement snel af. Dit wordt geïllustreerd door kromme α in fig. 4, die het vermogen weergeeft dat bij constante ingangsspanning als geluid wordt uitgestraald. Deze kromme geldt voor een luidspreker met een kwaliteitsfactor $Q = 1$. We zien dat bij een frequentie die gelijk is aan de helft van de resonantiefrequentie f_0 het uitgestraalde vermogen ten opzichte van dat bij f_0 met 12 dB (een factor 16) is gedaald. Om bij de frequentie $\frac{1}{2} f_0$ een akoestisch ver-

(1) Het verschil tussen de beide luidsprekers bestaat hierin dat het type 9710 A een enkelvoudige conus heeft, terwijl de 9710 AM van een dubbele conus is voorzien.

(2) Philips type-aanduiding PXE-5. Dit materiaal werd gekozen op grond van adviezen gegeven door C. M. van der Burgt in dit laboratorium.

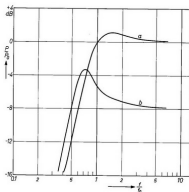


Fig. 4. Het bij constante ingangsspanning door een luidspreker uitgestraalde vermogen P als functie van de frequentie f , beide op relatieve schalen. P_0 vermogen bij de resonantiefrequentie f_0 . De kromme a geldt voor een kwaliteitsfactor $Q = 1$. In dit geval is bij de frequentie $\frac{1}{2}f_0$ het vermogen 12 dB kleiner dan dat bij f_0 (en hogere frequenties). Vergroten we de massa van conus en spreekspoel met een factor 2,5 (kromme b), dan wordt het vermogen bij $\frac{1}{2}f_0$ gelijk aan dat bij hogere frequenties. De kwaliteitsfactor is dan $Q = 1 \cdot 2,5 = 1,58$.

mogen te kunnen verkrijgen dat even groot is als bij frequenties hoger dan f_0 , moet dus de versterker een elektrisch vermogen kunnen leveren dat 16 maal zo groot is als dat wat bij hogere frequenties nodig is.

Een meer gelijkmatige verdeling van het nodige vermogen kan men bereiken als men de bewegende massa van de luidspreker vergroot. Weliswaar daalt dan het uitgestraalde vermogen voor frequenties boven f_0 , doch voor lagere frequenties neemt dit toe. In fig. 4 is met kromme b het verloop van het akoestische vermogen weergegeven voor dezelfde luidspreker waarvoor kromme a geldt, doch waarbij thans de bewegende massa met een factor 2,5 is vergroot. De kwaliteitsfactor neemt hierdoor met een factor $\sqrt{2,5} = 1,58$ toe, en het vermogen bij hogere frequenties daalt met 8 dB, terwijl het vermogen bij $f = \frac{1}{2}f_0$ met 4 dB stijgt; deze beide vermogens zijn dus nu even groot. Om deze luidspreker te kunnen gebruiken tot een laagste frequentie $\frac{1}{2}f_0$, behoeft dus het elektrische uitgangsvermogen niet 12 dB doch slechts 8 dB te worden vergroot. De resonantiefrequentie is nu verschoven naar $f_0/\sqrt{2,5} = 0,63f_0$. Men bedenke dan deze methode om een meer

gelijkmatig rendement te verkrijgen alleen kan worden gebruikt bij lage-tonen-luidsprekers. Bij luidsprekers die het gehele hoorbare frequentiegebied moeten weergeven leidt vergroten van de bewegende massa in het algemeen tot achteruitgang van de weergave der hoge tonen.

Twee luidsprekers voor bewegingstegenkoppeling

Bewegingstegenkoppeling volgens het hierboven beschreven principe hebben wij toegepast in experimentele schakelingen met een tweetal luidsprekers. Eén hiervan is een luidspreker voor lage tonen (type 9710 A); de andere is een luidspreker voor het hele hoorbare gebied (type 9710 AM)⁽³⁾. Beide luidsprekers zijn in een gesloten kast met een inwendig volume van 10 liter gemonteerd. Het binnen de spoel gelegen gedeelte van de conus is weggesneden, waardoor een eenvoudige montage van de versnellingsopnemer mogelijk was. Dit gedeelte van de conus heeft geen betekenis voor de uitsluiting van geluid; het dient slechts om een zekere demping van het massa-veersysteem tot stand te brengen. Bij het toepassen van bewegingstegenkoppeling wordt deze maatregel overbodig.

Zoals reeds werd vermeld, bevatten de opnemers een schijfje piezo-elektrisch materiaal⁽⁴⁾, dat is belast met een zekere massa. De opnemer voor de luidspreker voor het gehele gebied (fig. 5) is zo licht mogelijk gemaakt om de weergave der hoge tonen zo weinig mogelijk te beïnvloeden. Bij de lagetonenluidspreker (fig. 6) wordt een groter p.e. schijfje en tevens een grotere ballast-massa gebruikt. Behalve de hierboven aangetoonde verbetering van het rendement bij lage tonen, bereikt men hierdoor tevens dat de gevoeligheid van de opnemer groter wordt. In tabel II zijn de belangrijkste eigenschappen van de beide opnemers vermeld. De hierin vermelde totale massa heeft betrekking op de gehele opnemer (p.e. element, ballastmassa en drager); de uitgangsspanningen gelden voor een versnelling van 126 m/s^2 . Deze versnelling wordt bereikt wanneer bij een frequentie van 40 Hz de uitslag van de spoel zo groot is dat deze nog juist niet buiten het magnetische veld komt. Heeft de luidspreker een vlakke frequentie-karakteristiek, dan is de versnelling bij alle frequenties even groot; de aangegeven uitgangsspanningen komen dus overeen met de uitsluitingsgrens wanneer de laagste weer te geven frequentie 40 Hz is.

Tabel II. Eigenschappen van de gebruikte versnellingsopnemers.

luidspreker	p.e. element					ballast	totale massa	uitgangsspanning
	$\varnothing$	dikte	cap.	massa				
9710 AM	5 mm	0,5 mm	620 pF	7,6 mg		300 mg	2 g	26 mV
9710 A	16 mm	1,1 mm	2880 pF	1,69 g		29 g	37 g	500 mV

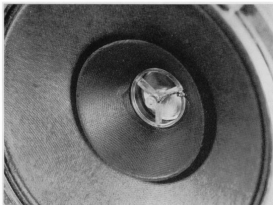


Fig. 5

Fig. 5. Bevestiging van de versnellingsopnemer op de luidspreker 9710 AM.



Fig. 6

Fig. 6. Bevestiging van de versnellingsopnemer op de luidspreker 9710 A.

De schakeling

In fig. 7 is een blokschema getekend van de schakeling die wij hebben gebruikt voor het toepassen van bewegingstegenkoppeling op een luidspreker 9710 AM, aangesloten op een eindversterker (uitgangsvermogen 10 W). De versnellingsopnemer P stuurt een katodevolger K , die, om korte verbindingen te verkrijgen, in de luidsprekerkast is geplaatst. Als buis is een nuvistator (type 7586) gebruikt. De katodevolger wordt

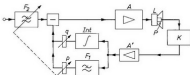


Fig. 7. Blokschema van een schakeling voor het toepassen van bewegingstegenkoppeling op een luidspreker 9710 AM voor het gehele hoorbare frequentiegebied. A eindversterker (uitgangsvermogen 10 W). L luidspreker. P versnellingsopnemer. K katodevolger. A' versterker. F_1 en F_2 laagdoorlatende filters. Int integrator. p en q regelbare verzwakkers.

gevolgd door een versterker A' . Het uitgangssignaal hiervan vormt een elektrische afbeelding van de versnelling van de luidsprekerspoel. In fig. 8 is het verloop naar grootte en fase van deze signaalspanning bij variabele frequentie van het (constante) ingangssignaal voorgesteld. De tegenkoppellus is hierbij open en de

kromme komt dus overeen met het Nyquist-diagram van het teruggekoppelde systeem. Het is bekend dat een versterker alleen dan stabiel is als de kromme het punt -1 niet omsluit. In de figuur is de plaats van dit punt aangegeven voor het geval dat men de versnellingsstegenkoppeling zo sterk maakt dat de resonantiefrequentie, die zonder tegenkoppeling bij 97 Hz ligt^[7], bij 42 Hz komt te liggen. Daar, zoals uit de figuur blijkt, de kromme het punt -1 wel ontvat, zal het systeem zonder meer niet stabiel zijn. Om stabiliteit te bereiken, kan men, zoals in fig. 7 is aangegeven, in de terugkoppelketen een laagdoorlatend filter F_1 opnemen. Omdat, zoals wij hebben aangetoond, het toepassen van bewegingstegenkoppeling in deze vorm alleen zinvol is bij lage tonen, is tegen het aanbrengen van een dergelijk filter in de terugkoppelketen geen bezwaar. De afsnijfrequentie van het toegepaste filter is 250 Hz en de verzwakking erboven verloopt met 12 dB per octaaf. Het filter wordt gevolgd door een regelbare verzwakker p , waarmee men de mate van de versnellingssterugkoppeling kan instellen. Het Nyquist-diagram dat ontstaat na het aanbrengen van het filter F_1 is weergegeven in fig. 9. We zien dat de schakeling nu stabiel is.

Het feit dat bij lage tonen tegenkoppeling optreedt en bij hoge tonen niet, veroorzaakt een niveauverschil, dat gecompenseerd wordt door het laagdoorlatende

[7] Dat bij deze frequentie mechanische resonantie van de luidspreker optreedt, blijkt uit het feit dat de fasehoek van de versnelling hier 90° is. De fasehoek van de snelheid is dan 0.

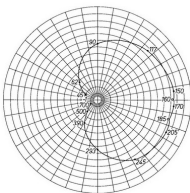
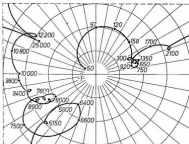
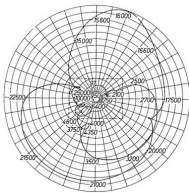


Fig. 9. Door het aanbrengen van het laagdoorlatende filter F_1 wordt de schakeling van fig. 7 stabiel, wat blijkt uit het feit dat het Nyquist-diagram dan het punt -1 niet meer omsluit.

Fig. 8. a) Nyquist-diagram van een tegengekoppeld systeem volgens fig. 7 wanneer het filter F_1 en de integrator Iur niet in de schakeling zijn opgenomen. De tegenkoppeling is zo sterk gemaakt dat de resonantiefrequentie, die zonder tegenkoppeling bij 97 Hz ligt, naar 42 Hz wordt verschoven. De getallen langs de kromme geven de frequentie in Hz aan. Daar de kromme het punt -1 omsluit, is dit systeem niet stabiel.
b) Vergroting van het in (a) gestippeld omlijnde gedeelte.

correctiefilter F_2 (fig. 7). De mate waarin dit filter de hoge tonen verzwakt is instelbaar, en deze instelling is gekoppeld aan die van de verzwakker p .

Om te voorkomen dat door de versnellingsterugkoppeling het resonantieverschijnsel te sterk in de amplitudekarakteristiek tot uiting komt (de kwaliteitsfactor Q neemt hierdoor immers toe), is ook snelheidsterugkoppeling toegepast. Met behulp van de integrator Iur wordt uit het versnellingssignaal een spanning verkregen die evenredig is met de snelheid van de spreekspoel. Deze spanning wordt via een regelbare verzwakker q bij het versnellingssignaal gevoegd.

In fig. 10 is het blokschema aangegeven van de schakeling die gebruikt is bij toepassing van bewegingstegenkoppeling op de luidspreker 9710 A voor lage tonen. (De hoge tonen worden dan via een afzonderlijke versterker en luidspreker weergegeven.) De schakeling is in hoofdzaak dezelfde als die van fig. 7. Omdat echter de gevoeligheid van de bij deze luidspreker gebruikte opnamer groter is, is hier na de katodevolgver geen ver-

sterker nodig. Verder is hier ook een ander laagdoorlatend filter toegepast. Omdat nl. bij een lage-tonenluidspreker de versnellingen bij hoge frequenties minder groot zijn, kan de afsnijfrequentie zonder bezwaar hoger worden gekozen dan bij de luidspreker voor het gehele hoorbare gebied. Deze frequentie is dan ook bij 600 Hz gelegd, waarmee bereikt is dat de tegenkoppeling over een groter frequentiegebied werkzaam is. Ten slotte is bij het toepassen van bewegingstegenkoppeling

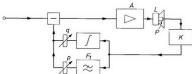


Fig. 10. Blokschema van een schakeling voor het toepassen van bewegingstegenkoppeling op een lagetonenluidspreker 9710 A. De letters hebben dezelfde betekenis als in fig. 7.

uitsluitend op de laagtonenluidspreker ook niet, zoals in fig. 7, een correctiefilter nodig om het niveauverschil tussen hoge en lage tonen op te heffen.

Meetresultaten

Amplitudekarakteristieken

In fig. 11 is met de lijn *a* de amplitudekarakteristiek weergegeven van de luidspreker 9710 AM, als deze geplaatst is in een gesloten kast met een inhoud van 10 liter. De resonantiefrequentie is hier 97 Hz. Wordt

nu versnellings-tegenkoppeling toegepast volgens de schakeling van fig. 7 (verzwakker *g* op nul), en wel in zo sterke mate als de stabiliteit toelaat, dan wordt kromme *b* verkregen. Men ziet dat de resonantiefrequentie dan bij 42 Hz ligt. Past men nu tevens snelheidstegenkoppeling toe om het resonantieverschijnsel minder sterk tot uiting te laten komen, dan kan men de kromme *c* verkrijgen. Vergelijken we deze met *a*, dan zien we duidelijk de winst in de weergave van lage tonen die door de bewegingstegenkoppeling is verkregen.

Fig. 12 toont het effect van versnellings-tegenkoppeling

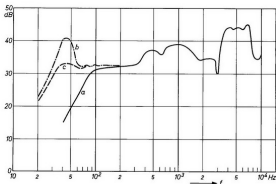


Fig. 11. Amplitudekarakteristieken, gemeten aan het systeem fig. 7 bij plaatsing van de luidspreker in een geheel gesloten kast met een inhoud van 10 liter, *a* zonder bewegingstegenkoppeling, *b* met versnellings-tegenkoppeling, *c* met zowel versnellings- als snelheidstegenkoppeling.

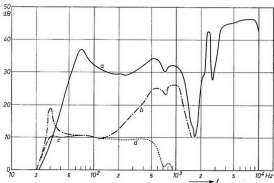


Fig. 12. Amplitudekarakteristieken, gemeten aan het systeem fig. 10, *a* zonder bewegingstegenkoppeling, *b* met versnellings-tegenkoppeling, *c* met zowel versnellings- als snelheidstegenkoppeling, *d* wanneer tevens een scheidsfilter voor hoge en lage tonen wordt gebruikt.

ling op de lagetonenluidspreker 9710 A, eveneens geplaatst in een gesloten 10 liter-kast. Ook hier geldt de kromme *a* voor het geval dat geen tegenkoppeling wordt toegepast, en kromme *b* bij een zo sterke versnellings tegenkoppeling als de stabiliteit toelaat. We zien dat de resonantiefrequentie van 70 Hz naar 30 Hz wordt verlaagd. Passen we tevens snelheidstegenkoppeling toe, dan verkrijgen we de kromme *c*. Met een passend scheidsfilter om de kanalen voor hoge en lage tonen te scheiden kunnen we de karakteristiek *d* verkrijgen, die binnen ± 1 dB vlak is van 23 tot 500 Hz.

Niet-lineaire vervorming

De vermindering in niet-lineaire vervorming die met bewegingstegenkoppeling kan worden verkregen hangt, evenals de tegenkoppelfactor, van de frequentie af. We zagen reeds dat de vervorming die door het luidspreker-mechanisme wordt veroorzaakt, het sterkst is bij lage tonen; speciaal hier is dus de bewegingstegenkoppeling van belang. De figuren 13 en 14 geven enkele meetresultaten. Fig. 13 geeft als functie van de frequentie de vervorming in procenten bij gebruik van de luidspreker 9710 AM en bij een constant uitgestraald vermogen. Het aan de luidspreker toegevoerde elektrische vermogen bedroeg 4,5 W bij 40 Hz. De kromme *a* geldt zonder bewegingstegenkoppeling (doch met elektrische tegenkoppeling in de versterker), en de kromme *b* met een zodanige bewegingstegenkoppeling dat de amplitudekarakteristiek *c* van fig. 11 wordt verkregen. We zien uit deze figuur b.v. dat bij 40 Hz de vervorming is afgenomen van 17% tot 3%. Fig. 14 geeft de overeenkomstige krommen voor de lagetonenluidspreker 9710 A. Hier correspondeert de kromme *b* met de amplitudekarakteristiek *d* uit fig. 12.

De conclusie uit deze meetresultaten is dat met een bewegingstegenkoppeling volgens de beschreven methode inderdaad belangrijke verbeteringen in de geluidsweergave kunnen worden bereikt, en dat hier dus een aantrekkelijk hulpmiddel ter beschikking staat voor gevallen waar men met een zeer compacte apparatuur een zeer breed frequentiegebied goed wil weergeven.

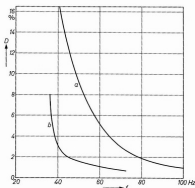


Fig. 13. Niet-lineaire vervorming *D* als functie van de frequentie *f* bij luidspreker 9710 AM. Het uitgestraalde vermogen is bij alle frequenties even groot gehouden; het aan de luidspreker toegevoerde elektrische vermogen was 4,5 W bij 40 Hz. De kromme *a* geldt zonder bewegingstegenkoppeling, de kromme *b* als een zodanige combinatie van versnellings- en snelheidstegenkoppeling wordt toegepast dat de amplitudekarakteristiek *c* van fig. 11 wordt verkregen.

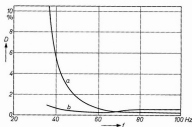


Fig. 14. Niet-lineaire vervorming *D* als functie van de frequentie *f* bij de lagetonenluidspreker 9710 A onder dezelfde condities als bij fig. 13 zijn vermeld. *a* zonder bewegingstegenkoppeling, *b* met een zodanige bewegingstegenkoppeling dat de amplitudekarakteristiek *d* uit fig. 12 wordt verkregen.

Samenvatting. Een der belangrijkste oorzaken van vervorming in een elektro-akoestisch systeem, bestaande uit een versterker met luidspreker, is gelegen in het mechanisme van de luidspreker, speciaal als deze in een kleine gesloten kast is geplaatst. Deze vervorming valt buiten de elektrische tegenkoppeling — het conventionele middel om de vervorming te verminderen. Bij bewegingstegenkoppeling neemt men ook de luidspreker in de tegenkoppeling op. In dit artikel worden de verschillende mogelijkheden van bewegingstegenkoppeling besproken. Een methode, speciaal voor tegenkoppeling bij lage tonen, is ook experimenteel bevestigd. Hierbij was op de spreekspool van een normale luidspreker een versnellingsopnemer bevestigd die een piezo-elektrisch element bevat. Het teruggevoerde signaal is zodoende even-

redig met de versnelling van spool en conus. Door integratie wordt tevens een signaal verkregen dat evenredig is met de snelheid, en dit wordt in een zekere verhouding bij het eerstgenoemde signaal gevoegd. Hierdoor kan een amplitudekarakteristiek worden verkregen die tot beneden de mechanische resonantiefrequentie van de luidspreker vlak verloopt. In dit frequentiegebied treedt tevens een belangrijke vermindering van de niet-lineaire vervorming op. Metingen, zowel van de geluidsdruk als van de niet-lineaire vervorming, als functie van de frequentie, zijn verricht met twee op deze wijze ingerichte luidsprekers, een lagetonenluidspreker en een luidspreker voor het gehele hoorbare frequentiegebied. Zij tonen een belangrijke verbetering aan van de weergave in het gebied der lage tonen.