Tijdschrift van het Nederlandsch Radiogenootschap

Sept. 1947 **Deel XII No. 5**

Vrije trilling van een resonantiecircuit met niet-lineaire zelfinductie.

door H. Miedema

Eenige bijzondere oplossingen van de differentiaalvergelijking voor de vrije trilling van een resonantiecircuit met niet-lineaire zelfinductie.

SUMMARY

Two particular solutions are given of the differential equations of the free oscillations of a resonant circuit, containing a non-linear self-inductance.

The solution, obtained for an undamped circuit, also gives a good approximation to the true wave form with small amplitudes and shows dependance of frequency on amplitude.

SAMENVATTING

De differentiaal vergelijking voor de vrije trilling van een electrisch circuit, gevormd door een capaciteit en een niet-lineaire zelfinductie, blijkt oplosbaar te zijn als de parameters aan een zekere voorwaarde voldoen.

De oplossing kan dan in overzichtelijken vorm geschreven worden.

Aan de gevonden voorwaarde wordt bij benadering voldaan bij kleine amplitude van de vrije trilling, zoodat de oplossing voor dat geval een goede benadering geeft.

Ook in het geval, dat het circuit behalve capaciteit en niet-lineaire zelfinductie, weerstand bevat, is een oplossing mogelijk.

Nu moeten de parameters aan twee voorwaarden voldoen. Een der voorwaarden heeft betrekking op den vorm der $\psi - i$ kromme, de andere voorwaarde legt een verband tusschen het product $R^2 C$ en de grootheid $\left(\frac{di}{d\psi}\right)_{\psi=0}$.

§ 1. *Circuit zonder weerstand.*

Voor de vrije trilling van het circuit van fig. 1 geldt:

$$\frac{d\psi}{dt} + u = 0$$

als ψ de momenteele waarde van de flux is, en u de grootte van het potentiaalverschil tusschen de condensatorplaten in de richting van den stroom.

Differentiatie naar den tijd en substitutie van

$$\frac{du}{dt} = \frac{i}{C}$$

maakt van deze vergelijking:

$$\frac{d^2\psi}{dt^2} + \frac{i}{C} = 0 .$$

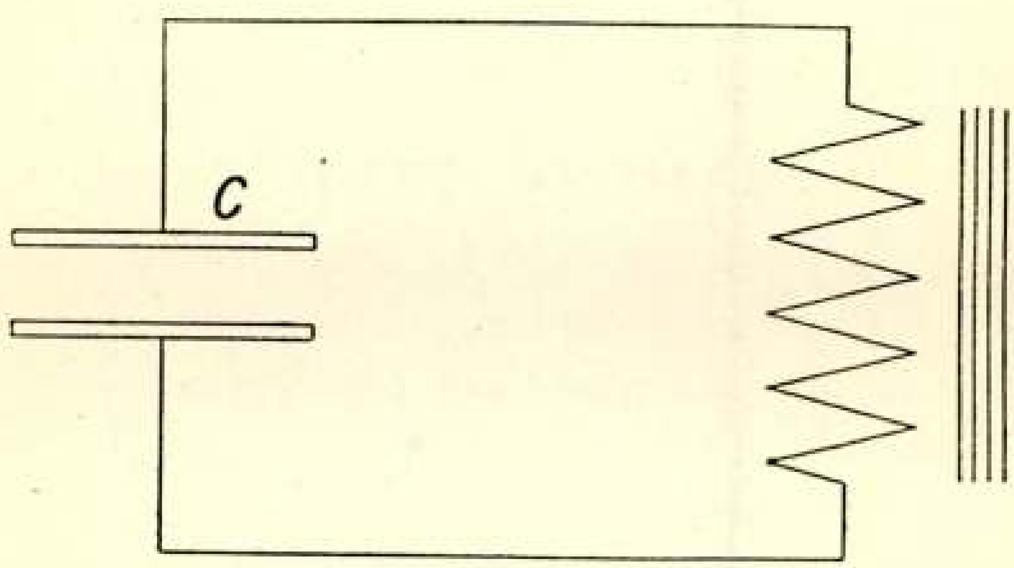
Het niet-lineaire verband tusschen ψ en i kan bij verwaarloozing van de hysteresis worden benaderd door:

$$i = \mu_1 \psi + \mu_3 \psi^3 + \mu_5 \psi^5 \text{ }^{1)}$$

waarin μ_1, μ_3 en μ_5 positieve constanten zijn.

ψ zal dus moeten voldoen aan:

$$\frac{d^2\psi}{dt^2} + \frac{\mu_1}{C}\psi + \frac{\mu_3}{C}\psi^3 + \frac{\mu_5}{C}\psi^5 = 0 . \qquad (1,1)$$



Figuur 1.

Na invoering van $v = \dfrac{d\psi}{dt}$ wordt:

$$\frac{d^2\psi}{dt^2} = v\frac{dv}{d\psi} = \frac{1}{2}\frac{dv^2}{d\psi},$$

en (1,1) gaat over in:

$$\frac{1}{2}\frac{dv^2}{d\psi} + \frac{\mu_1}{C}\psi + \frac{\mu_3}{C}\psi^3 + \frac{\mu_5}{C}\psi^5 = 0 .$$

Volgt: $v^2 + \dfrac{\mu_1}{C}\psi^2 + \dfrac{1}{2}\dfrac{\mu_3}{C}\psi^4 + \dfrac{1}{3}\dfrac{\mu_5}{C}\psi^6 - A^2 = 0 .$

Als beginvoorwaarde wordt aangenomen dat voor $t = 0$ $\psi = 0$ en $u = V_0$ is, dus:

[1]) Zie: G. J. Elias en H. Miedema. Eenige trillingsverschijnselen in een niet-lineair circuit. Tijdschr. Ned. Rad. Gen. Juli 1946.

$$\left(\frac{d\psi}{dt}\right)_{t=0} = (v)_{t=0} = -V_0 .$$

Volgt: $A^2 = V_0^2$.

Nu is dus:

$$v^2 = V_0^2 - \frac{\mu_1}{C}\psi^2 - \frac{1}{2}\frac{\mu_3}{C}\psi^4 - \frac{1}{3}\frac{\mu_5}{C}\psi^6 . \tag{2,1}$$

Stel nu: $\psi = \frac{x}{\sqrt{y}}$, waarin x en y functies van t zijn, waartusschen een nog nader te bepalen verband bestaat.

Dan is:

$$v = \frac{d\psi}{dt} = \frac{x'\,y - \frac{1}{2}\,x\,y'}{y^{3/2}} .$$

2,1) gaat na invoering van deze nieuwe veranderlijken over in:

$$(x'\,y - \frac{1}{2}\,x\,y')^2 = V_0^2\,y^3 - \frac{\mu_1}{C}x^2\,y^2 - \frac{1}{2}\frac{\mu_3}{C}x^4\,y - \frac{1}{3}\frac{\mu_5}{C}x^6 .$$

Of: $(x'\,y - \frac{1}{2}\,x\,y')^2 = V_0^2\,(y - a_1\,x^2)\,(y - a_2\,x^2)\,(y - a_3\,x^2)$. (3,1)

De constanten a_1, a_2 en a_3 voldoen aan:

$$f(a) = V_0^2\,a^3 - \frac{\mu_1}{C}a^2 - \frac{1}{2}\frac{\mu_3}{C}a - \frac{1}{3}\frac{\mu_5}{C} = 0 . \tag{4,1}$$

3,1) is oplosbaar als $a_1 = a_2$ is. Tot dit geval beperken wij ons verder.

Stel: $a_1 = a_2 = a_0$, dan is $f(a_0) = 0$, en ook $\left(\frac{\partial f}{\partial a}\right)_{a=a_0} = 0$.

$$\left(\frac{\partial f}{\partial a}\right)_{a=a_0} = 3\,V_0^2\,a_0^2 - 2\frac{\mu_1}{C}\,a_0 - \frac{1}{2}\frac{\mu_3}{C} = 0 .$$

Volgt:

$$a_0 = \frac{2\,\mu_1 + m\sqrt{4\,\mu_1^2 + 6\,\mu_3\,C\,V_0^2}}{6\,C\,V_0^2} \qquad m^2 = 1 .$$

Uit $f(a_0) = 0$ volgt nu:

$$4\,\mu_1^3 + 9\,\mu_1\,\mu_3\,C\,V_0^2 + 18\,\mu_5\,C^2\,V_0^4 +$$
$$+\,m\,(2\,\mu_1^2 + 3\,\mu_3\,C\,V_0^2)\sqrt{4\,\mu_1^2 + 6\,\mu_3\,C\,V_0^2} = 0 .$$

Aangezien μ_1, μ_3 en μ_5 positief zijn, kan hieraan alleen voldaan worden als $m = -1$.

$$\text{Dus: } a_0 = \frac{2\,\mu_1 - \sqrt{4\,\mu_1^2 + 6\,\mu_3\,C\,V_0^2}}{6\,C\,V_0^2} \tag{5,1}$$

En de voorwaarde, waaraan de parameters moeten voldoen, wordt:

$$\begin{gathered} 4\,\mu_1^3 + 9\,\mu_1\,\mu_3\,C\,V_0^2 + 18\,\mu_5\,C^2\,V_0^4 - \\ -(2\,\mu_1^2 + 3\,\mu_3\,C\,V_0^2)\sqrt{4\,\mu_1^2 + 6\,\mu_3\,C\,V_0^2} = 0\,. \end{gathered} \tag{6,1}$$

Nu is: $$a_1 + a_2 + a_3 = 2\,a_0 + a_3 = \frac{\mu_1}{C\,V_0^2}\,.$$

Volgt: $$a_3 = \frac{\mu_1 + \sqrt{4\,\mu_1^2 + 6\,\mu_3\,C\,V_0^2}}{3\,C\,V_0^2}\,. \tag{7,1}$$

(3,1) kan nu vereenvoudigd worden tot:

$$(x'\,y - \tfrac{1}{2}\,x\,y')^2 = V_0^2\,(y - a_0\,x^2)^2\,(y - a_3\,x^2)\,, \tag{8,1}$$

We kunnen nu aannemen, dat tusschen x en y het volgende verband bestaat:

$$y - a_3\,x^2 = a^2\,, \tag{9,1}$$

waarin a constant is.

Uit (8,1) en (9,1) volgt:

$$a^2\,(x')^2 = V_0^2\left\{(a_3 - a_0)\,x^2 + a^2\right\}^2.$$

Dus: $$\frac{d\,x}{d\,t} = n\,\frac{V_0}{a}\left\{(a_3 - a_0)\,x^2 + a^2\right\} \qquad n^2 = 1\,.$$

$$x = n\,.\,\frac{a}{\sqrt{a_3 - a_0}}\,.\,tg\,(V_0\,.\sqrt{a_3 - a_0}\,.\,t + g) = n\,.\,\frac{a}{\sqrt{a_3 - a_0}}\,.\,tg\,(\omega\,t + g)\,.$$

Waarin: $$\omega = V_0\sqrt{a_3 - a_0} = \sqrt[4]{\frac{\mu_1^2 + \frac{3}{2}\,\mu_3\,C\,V_0^2}{C^2}}\,.$$

Verder is: $$y = a_3\,x^2 + a^2 = \frac{a^2\,a_3}{a_3 - a_0}\,.\quad tg^2\,(\omega\,t + g) + a^2$$

Hiermee is ψ bekend.

$$\psi^2 = \frac{x^2}{y} = \frac{tg^2\,(\omega\,t + g)}{a_3\,tg^2\,(\omega\,t + g) + a_3 - a_0} = \frac{\sin^2\,(\omega\,t + g)}{a_3\sin^2(\omega\,t + g) + (a_3 - a_0)\cos^2(\omega\,t + g)}$$

Na substitutie van de in (5,1) en (7,1) gevonden waarden van a_3 en a_0 en van de beginvoorwaarden, wordt de oplossing:

$$\psi^2 = \frac{6\,C\,V_0^2 \sin^2 \omega t}{2\left(\mu_1 + \sqrt{4\mu_1^2 + 6\mu_3 C V_0^2}\right).\sin^2 \omega t + 3\sqrt{4\mu_1^2 + 6\mu_3 C V_0^2}.\cos^2 \omega t} \tag{10,1}$$

Met:
$$\omega = \sqrt[4]{\frac{\mu_1^2 + \frac{3}{2}\mu_3 C V_0^2}{C^2}}. \tag{11,1}$$

De geldigheid van de hier gevonden oplossing is dus beperkt tot de gevallen, waarin voldaan wordt aan voorwaarde (6,1), welke te herleiden is tot:

$$C V_0^2 = \frac{\mu_3(\mu_3^2 - 6\mu_1\mu_5) + \sqrt{\mu_3^2(\mu_3^2 - 6\mu_1\mu_5)^2 + 4\mu_1^2\mu_5^2(3\mu_3^2 - 6\mu_1\mu_5)}}{12\,\mu_5^2} \tag{12,1}$$

12,1) levert alleen reëele waarden van $C V_0^2$ op, als $3\mu_3^2 \gtreqless 16\mu_1\mu_5$ is. Is $3\mu_3^2 < 16\mu_1\mu_5$, dan geeft 12,1) complexe waarden voor $C V_0^2$.

Is $\mu_3 C V_0^2 << \mu_1^2$ en $\mu_5 C^2 V_0^4 << \mu_1^3$, dan gaat 6,1) over in:

$$4\mu_1^3 + 9\mu_1\mu_3 C V_0^2 + 18\mu_5 C^2 V_0^4 - (2\mu_1^2 + 3\mu_3 C V_0^2)\sqrt{4\mu_1^2 + 6\mu_3 C V_0^2} \approx$$

$$4\mu_1^3 + 9\mu_1\mu_3 C V_0^2 + 18\mu_5 C^2 V_0^4 - 4\mu_1^3 - 9\mu_1\mu_3 C V_0^2 - \frac{9}{2}\frac{\mu_3^2 C^2 V_0^4}{\mu_1} \approx 0$$

Voor kleine waarden van $C V_0^2$ wordt dus bij benadering voldaan aan (6,1) en dus geven (10,1) en (11,1) dan een benadering van de oplossing van (1,1).

Aangezien V_0 de amplitude van de wisselspanning is, geeft (11,1) dus voor kleine amplituden van de wisselspanning de afhankelijkheid der eigenfrequentie van het circuit van de amplitude der wisselspanning weer.

§ 2. *Circuit met weerstand.*

Voor de vrije trilling van het circuit van fig. 2 geldt de vergelijking:

$$\frac{d^2\psi}{dt^2} + R\frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = 0\,. \tag{1,2}$$

Voor het verband tussen ψ en i wordt ook in dit geval weer gebruikt de machtreeks:

$$i = \mu_1 \psi + \mu_3 \psi^3 + \mu_5 \psi^5 .$$

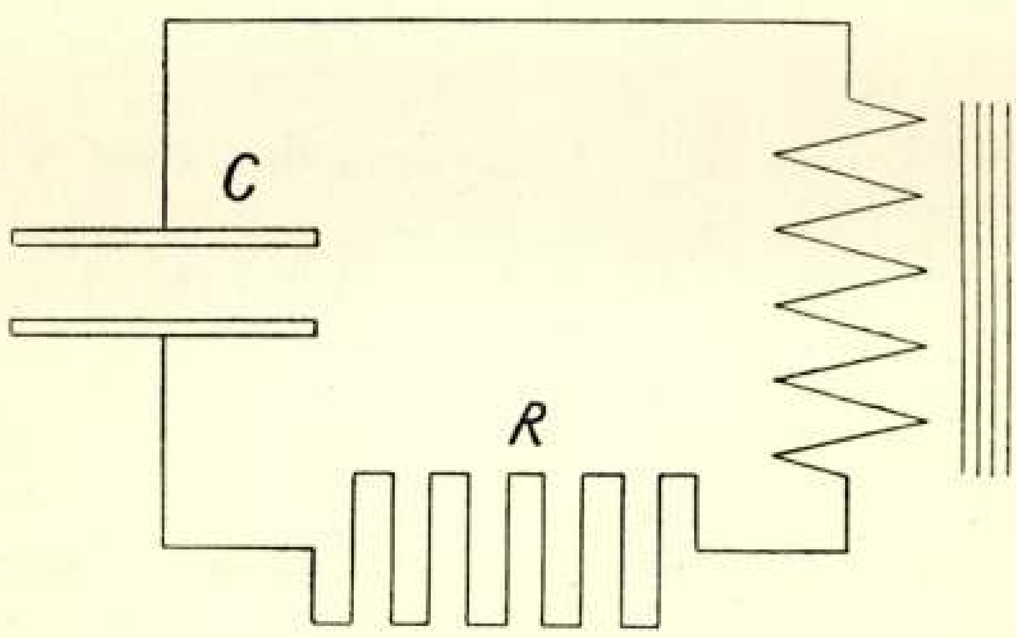
Door substitutie van deze reeks gaat (1,2) over in:

$$\frac{d^2\psi}{dt^2} + R\frac{d}{dt}(\mu_1 \psi + \mu_3 \psi^3) + \frac{\mu_1}{C}\psi + \frac{\mu_3}{C}\psi^3 + \frac{\mu_5}{C}\psi^5 = 0 . \tag{2,2}$$

Men begaat hier wel een inconsequentie, door in deze vergelijking niet steeds hetzelfde verband tusschen ψ en i aan te nemen, maar deze inconsequentie komt feitelijk neer op een verschil in benadering van de $\psi - i$ kromme, zoodat de invloed van de niet-lineariteit der zelfinductie ook uit de oplossing van (2,2) zal blijken.

Men kan nu een oplossing van (2,2) zoeken van de volgende vorm:

$$\psi = e^{-at} . F(C_1 + e^{-2at} . \eta) . z , \tag{3.2}$$



Figuur 2.

waarin a en C_1 constanten, η en z periodieke functies van t zijn.

De, na substitutie van (3,2) in (2,2) verkregen vergelijking, kan in drie anderen gesplitst worden, door de coëfficienten van e^{-at}, e^{-3at} en e^{-5at} gelijk aan o te stellen.

Deze drie vergelijkingen zijn:

$$F'' . (\eta' - 2a\eta)^2 + 3\mu_3 R . F^2 F' . (\eta' - 2a\eta) . z^2 + \frac{\mu_5}{C} . F^5 . z^4 = 0 . \tag{4,2}$$

$$(\eta' - 2a\eta)(2F'.z' - 4aF'.z + \mu_1 RF'z) + (\eta'' - 2a\eta') . F'z + \\ + 3\mu_3 R . F^2 . z^2 (F . z' - aFz) + \frac{\mu_3}{C} F^3 z^3 = 0 . \tag{5,2}$$

$$F.(z'' - 2\,a\,z' + \mu_1 R\,z' + a^2 z - a\,\mu_1 R\,z + \frac{\mu_1}{C} z) = 0\,. \tag{6,2}$$

Ter afkorting zijn in deze vergelijkingen de eerste en tweede afgeleiden van $F(C_1 + ij\,.\,e^{-2at})$ naar $(C_1 + ij\,e^{-2at})$ geschreven als F' en F''.

Opdat voor alle waarden van t aan (4,2), (5,2) en (6,2) voldaan zal worden, is het noodig eenige betrekkingen tusschen veranderlijken en constanten aan te nemen.

We nemen allereerst aan:

$$ij' - 2\,a\,ij = a\,z^2\,.$$

waarin a constant is.

(4,2), (5,2) en (6,2) zijn nu te vereenvoudigen tot:

$$a^2 F'' + 3\,\mu_3 R\,F^2.\,F'.\,a + \frac{\mu_5}{C} F^5 = 0\,. \tag{7,2}$$

$$\begin{aligned} &a\,(2\,F'.\,z' - 4\,a\,F'\,z + \mu_1 R\,F'\,z) + 2\,a\,F'z' + \\ &+ 3\,\mu_3 R\,F^2\,(F.\,z' - a\,F\,z) + \frac{\mu_3}{C} F^3\,z = 0\,. \end{aligned} \tag{8,2}$$

$$z'' + z'\,(\mu_1 R - 2\,a) + z\left(a^2 - a\,\mu_1 R + \frac{\mu_1}{C}\right) = 0\,. \tag{9.2}$$

Uit (9,2) volgt dat z een periodieke functie van t is als:

$$2\,a = \mu_1 R\,.$$

$$\text{Of:}\quad a = \tfrac{1}{2}\,\mu_1 R\,. \tag{10,2}$$

De oplossing van (9,2) wordt dan:

$$z = A \sin (w\,t + \beta)\,,$$

waarin A en β integratieconstanten zijn en waarin:

$$w^2 = \frac{\mu_1}{C} - \frac{1}{4}\,\mu_1^2 R^2\,. \tag{11,2}$$

Aan (7,2) voldoet $F' = b\,F^3$, waarin b constant is en:

$$3\,a^2 b^2 + 3\,a\,b\,\mu_3 R + \frac{\mu_5}{C} = 0\,. \tag{12,2}$$

Substitutie van $F' = b F^3$ en van $z = A \sin (w t + \beta)$ in (8,2) levert op de beide betrekkingen:

$$\frac{\mu_3}{C} - \frac{3}{2} \mu_1 \mu_3 R^2 - a b \mu_1 R = 0 .$$

$$4 a b + 3 \mu_3 R = 0 .$$

Volgt:

$$a b = - \tfrac{3}{4} \mu_3 R .$$

$$\mu_3 (1 - \tfrac{3}{4} \mu_1 R^2 C) = 0 . \tag{13,2}$$

In (12,2) kan nu $a b$ geëlimineerd worden, hetgeen als tweede voorwaarde oplevert:

$$9 \mu_3^2 R^2 C = 16 \mu_5 . \tag{14,2}$$

Nu was:

$$F' = \frac{d F}{d(C_1 + ij . e^{-2 a t})} = b F^3 .$$

Volgt:

$$\frac{1}{2 F^2} = C_2 - b (C_1 + ij . e^{-2 a t}) .$$

Dus:

$$F = \frac{m}{\sqrt{2 C_2 - 2 b C_1 - 2 ij b . e^{-2 a t}}} . \qquad m^2 = 1 .$$

De nu nog overgebleven onbekende ij volgt uit:

$$ij' - 2 a ij = a z^2 ,$$

waarin:

$$z = A \sin (w t + \beta) .$$

$$\text{en: } \quad a = \tfrac{1}{2} \mu_1 R .$$

Dus.

$$ij' - \mu_1 R ij = \tfrac{1}{2} a A^2 - \tfrac{1}{2} a A^2 \cos (2 w t + 2 \beta) .$$

Ons interesseert alleen dat deel van de oplossing, dat een periodieke functie van den tijd is.

Dit is:

$$ij = - \frac{1}{2} \frac{a A^2}{\mu_1 R} + \frac{a A^2}{4 \sqrt{w^2 + \frac{1}{4} \mu_1 R^2}} . \sin (2 w t + j) .$$

Of:

$$ij = - \frac{1}{2} \frac{a A^2}{\mu_1 R} + \frac{a A^2}{4 \sqrt{\frac{\mu_1}{C}}} . \sin (2 w t + j) .$$

Met:

$$\cos(2\beta - j) = -\frac{2w}{\sqrt{4w^2 + \mu_1^2 R^2}} = -\frac{w}{\sqrt{\frac{\mu_1}{C}}}.$$

ψ is hiermee bekend en wel is, na invoering van een nieuwe constante

$$D = \frac{2C_2 - bC_1}{A^2}:$$

$$\psi = \frac{m \cdot e^{-\frac{1}{2}\mu_1 Rt} \cdot \sin(wt+\beta)}{\sqrt{D - \frac{3\mu_3}{4\mu_1} \cdot e^{-\mu_1 Rt} + \frac{3}{8}\mu_3 R\sqrt{\frac{C}{\mu_1}} \cdot e^{-\mu_1 Rt} \cdot \sin(2wt+j)}}. \quad (15,2)$$

Waarin:

$$m^2 = 1$$

$$w^2 = \frac{\mu_1}{C} - \frac{1}{4}\mu_1^2 R^2.$$

$$\cos(2\beta - j) = -w\sqrt{\frac{C}{\mu_1}}.$$

Deze oplossing geldt alleen als voldaan wordt aan de voorwaarden:

$$9\mu_3^2 R^2 C = 16\mu_5. \quad (14,2)$$

$$\mu_3(\mu_1 R^2 C - \tfrac{4}{3}) = 0. \quad (13,2)$$

Uit de beginvoorwaarden zijn D, β en het teeken van m te bepalen, waarna de oplossing volledig bekend is.

Voorwaarde (13,2) levert twee mogelijkheden op n.l. $\mu_3 = 0$ en $\mu_1 R^3 C - \frac{4}{3} = 0$. Is $\mu_3 = 0$, dan volgt uit (14,2) $\mu_5 = 0$, dus dan blijft het lineaire geval over.

In het ons interesseerende niet-lineaire geval worden de voorwaarden:

$$\begin{cases} 9\mu_3^2 R^2 C = 16\mu_5. \\ \mu_1 R^2 C = \frac{4}{3}. \end{cases}$$

Of:

$$\begin{cases} 3\mu_3^2 = 4\mu_1\mu_5. \\ \mu_1 R^2 C = \frac{4}{3}. \end{cases}$$

Tijdschrift van het Nederlandsch Radiogenootschap

September 1947 **Deel XII No. 5**

Enkele gehoorproblemen

door Ir H. Mol

Mededelingen uit het Transmissielaboratorium P.T.T.

SUMMARY

This paper deals with several problems of hearing. After giving a brief description of the action of the ear, the author derives the musical scales, in connection with the perception of pitch. Discussing the problem of the perception of subjective tones, the author presents a theory, explaining the pitch of a sound, in which the fundamental tone is missing.

Inleiding.

Bij een onderzoek van de physica van het oor, ontmoet men herhaaldelijk ontwikkelingsvormen die ons niet als de meest logische voorkomen. In de techniek van de natuur vindt echter een ontwikkeling plaats waardoor bepaalde onderdelen van organen blijkbaar hun tijd gehad hebben en nog slechts rudimentair aanwezig zijn; van andere delen vermoedt men, dat zij nog voor ontwikkeling vatbaar zijn en in het evolutieproces over misschien millioenen jaren betekenis krijgen.

Hoe het ook zij, wij zullen om te beginnen een beschouwing geven van de bouw van het menschelijk oor en de betekenis van de verschillende onderdelen trachten te doorgronden.

Hier volgt dan een schematische behandeling.

De trechtervormige gehoorschelp (1) vangt het geluid op en geleidt het naar het trommelvlies (3). Achter het trommelvlies bevindt zich een met lucht gevulde ruimte: de trommelholte. Met die trommelholte staat weer een tweede doos in verbinding, nl. het inwendige oor. Deze doos wordt door een elastisch membraan (8) in twee gedeelten gesplitst, die met elkaar in verbinding staan. In werkelijkheid is de doos opgerold in de vorm van een slakkenhuis. De top daarvan heet het helicotrema (9) en dat is juist de plaats, waar de beide helften elkaar ontmoeten.

Het slakkenhuis is met een waterachtige vloeistof gevuld; elk van de beide helften kijkt door een venstertje in de trommelholte. Deze openingen zijn met vliezen afgesloten, zodat de vloeistof niet wegstroomt; de bovenste heet het ovale venster (7), de onderste het ronde venster (10).

De trillingen van het trommelvlies worden nu op het ovale venster overgebracht door middel van een speciale hefboom. Deze bestaat uit drie beentjes, in volgorde vanaf het trommelvlies gerekend zijn dit: de hamer (4), het aambeeld (5) en de

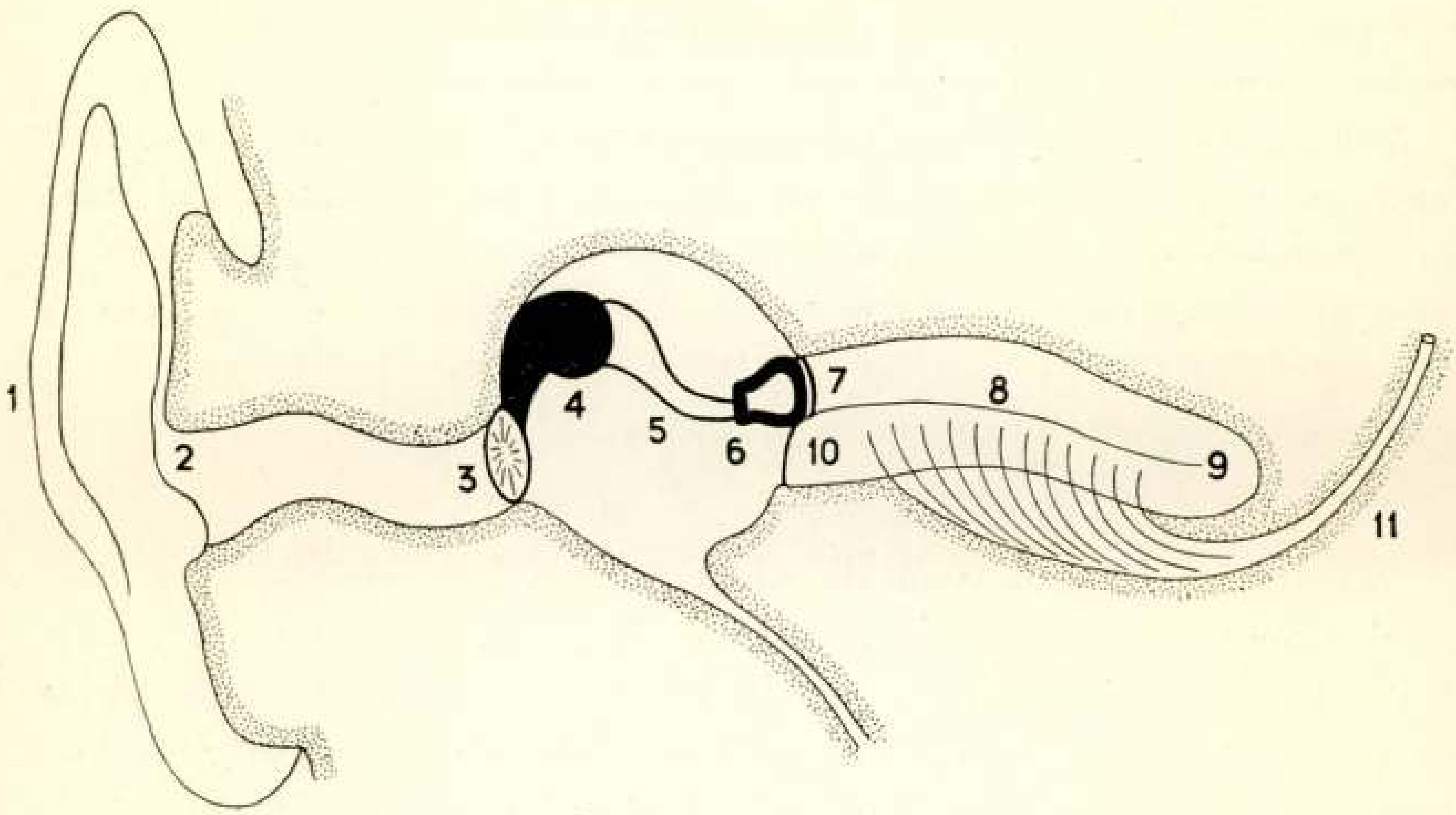


Fig. 1.
Schematische voorstelling van het oor.

stijgbeugel (6). De steel van de hamer zit in het trommelvlies vergroeid, de voetplaat van de stijgbeugel in het ovale venster. Het draaipunt van de hefboom zit in het dak van de trommelholte.

De luchtdruk in de trommelholte wordt automatisch gelijkgehouden aan die van de buitenlucht door het slikmechanisme. Van de trommelholte naar de keelholte leidt nl. de buis van Eustachius. Normaal is deze buis gesloten; maar bij het slikken en geeuwen gaat hij open. Men kan zich daarvan overtuigen, door het slikken met dichtgeknepen neus. De door het het slikken ontstane drukverhoging plant zich via de buis van Eustachius voort naar de trommelholte, waardoor het trommelvlies naar buiten wordt gedrukt. Dit veroorzaakt een typische gevoelssensatie. Soms is een paar maal naslikken nodig om de gecomprimeerde lucht uit de trommelholte te laten ontsnappen.

De bewegingen van het trommelvlies veroorzaken dus bewegingen van de stijgbeugel, die op zijn beurt de vloeistof in het slakkenhuis in beweging brengt. Het ronde venster stelt de vloeistof waarschijnlijk instaat om uitwijkingen te maken.

Door een en ander komt ook het vliezige tussenschot, dat wij hierna het basilairmembraan (afgekort BM) zullen noemen, in beweging. In het BM bevinden zich de uiteinden van de gehoorszenuw, die prikkels naar de hersenen uitzendt. De bewegingen van het BM zijn door v. Békésy met behulp van het microscoop duidelijk vastgesteld. Kennelijk prikkelen zij de zenuweinden. Wanneer de opgewekte prikkels de hersenen bereiken geven zij aanleiding tot een gewaarwording.

Dit is alles heel simpel gezegd, maar in de eerste plaats is men er nog lang niet achter, waarom het BM eigenlijk trilt, „zoals het trilt." Wel weet men, dat bepaalde frequenties ook bepaalde gedeelten van het BM in beweging brengen, zodat in het slakkenhuis een ruimtelijke frequentieanalyse tot stand komt. Dit is het localisatiebeginsel.

Oorspronkelijk meende men, onder aanvoering van van Helmholtz, dat het BM bestond uit gespannen snaartjes van verschillende lengten en met verschillende spanningen. Onderzoekingen van v. Békésy[1]) tonen echter aan, dat het BM spanningsloos is. De snaartheorie gaat dus niet op.

Wel kan men het BM opvatten als een verzameling van resonerende, ingeklemde balkjes. De kortste balkjes, en die liggen in de omgeving van de stijgbeugel, corresponderen met de hoge frequenties, terwijl de lange balkjes, die bij het helicotrema liggen, met de lage tonen meetrillen. Indien de lengtevariatie van de balkjes niet voldoende is om de vereiste stijfheidsvariatie te verklaren, kan de diktevariatie te hulp worden geroepen.

Er gaan evenwel stemmen op, om te pogen de frequentieanalyse langs hydrodynamische weg te verklaren, zonder gebruikmaking van resonantieverschijnselen. Dit zou technisch iets geheel nieuws zijn.

Resumerend kunnen wij dus zeggen, dat er een frequentielocalisatie in het slakkenhuis plaats vindt, zonder dat wij nog

---

[1]) G. v. Békésy, Ueber die Elastizität der Schneckentrennwand des Ohres. Akustische Zeitschrift Sept. 1941.

het juiste mechanisme hiervan kunnen doorgronden. In elk geval spelen de afmetingen van het slakkenhuis een grote rol, en het is zelfs zoo opvallend, dat het slakkenhuis van een pasgeboren kind evengroot is als dat van een volwassene en dus niet meegroeit.

2. *Het oor als zintuig.*

Het oor is een zintuig, en strijdt in dit opzicht in belangrijkheid met het oog.

Zintuigen verbinden onze persoonlijkheid met de buitenwereld. Dat niet alléén, zij ontwikkelen ook die persoonlijkheid. In onze hersenen kan niets zijn, dat niet via onze zintuigen naar binnen is gekomen. Alle ervaringen behoeven wij echter niet in ons

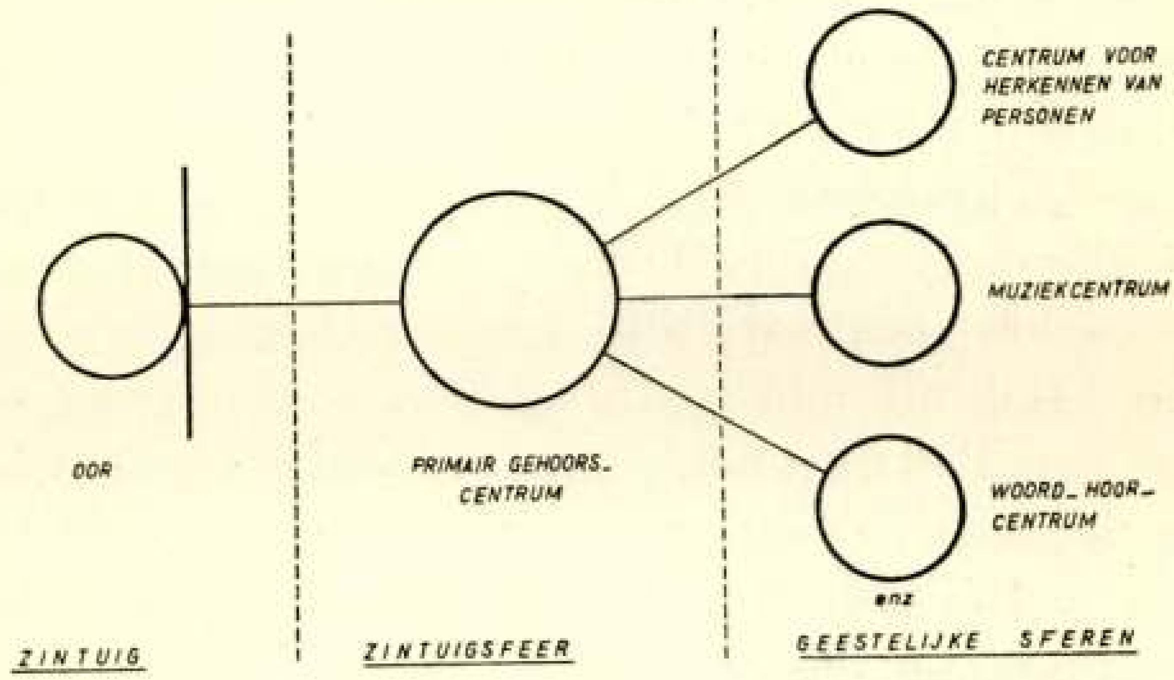


Fig. 2.
Schematische voorstelling van verschillende gehoorscentra.

eigen leven op te doen, de erfelijkheid registreert de ervaringen van gehele generaties vóór ons. Op die wijze wordt de opleidingstijd in ons toch al zo korte leven aanzienlijk verkleind.

De eerste opvoeding van het normale kind geschiedt voornamelijk acoustisch. Vandaar, dat kinderen met gehoorsafwijkingen steeds in geestelijke ontwikkeling achterblijven bij normale kinderen: zij kunnen geen „woorden" leeren.

Woorden zijn verklankte begrippen en gevoelens. Voor het herkennen van woorden is in onze hersenschors een bepaald centrum aanwezig, nl. het woord-hoorcentrum. Evenzo is er, om even op het oog over te stappen een centrum voor het lezen van woorden, het z.g. woord-leescentrum. Het zijn de z.g. herkenningscentra.

Bij de geboorte heeft de mens nog geen enkel herkenningscentrum, maar is wel in het bezit van een primair gehoorscentrum, dat in beide hersenhelften voorkomt. Het primaire gehoorscentrum is een vergaarbak voor alle indrukken, die via het gehoorszintuig naar binnen komen. Men noemt het ook wel een zintuigsfeer.

Ook dieren hebben dergelijke zintuigsferen. Een persoonlijkheid ontwikkelen wil zeggen: om de zintuigsfeer heen herkenningscentra opbouwen. De herkenningscentra noemt men wel geestelijke sferen. De normale mens slaagt er in, om deze geestelijke sferen op te bouwen in de nabijheid van de zintuigsfeer. Het dier slaagt daarin slechts in zeer beperkte mate, bijv. bij een hond is het muziekcentrum weinig ontwikkeld.

Bij de mens kunnen bepaalde aangeleerde herkenningscentra weer verloren gaan. Door beschadiging van de hersenschors kan bijv. een musicus plotseling zijn muziekcentrum verliezen: hij kan dan de schoonste muziek niet meer onderscheiden van hondengeblaf.

Een ander ziektebeeld is, dat men wel woorden kan lezen, maar deze niet kan verstaan. Er komt wel geluid naar binnen, doch het woord-hoorcentrum is buiten werking. De patient is woord-doof, maar hij kan zijn gehoor voor muziek onverminderd hebben behouden. Dergelijke verwoeste centra kunnen nooit meer worden hersteld.

Tenslotte willen wij nog het interessante ziektebeeld vermelden, dat iemand, die meerdere talen kent, plotseling het vermogen verliest, zijn moedertaal te verstaan, doch de vreemde talen (indien hij die tenminste geleerd heeft) nog goed kan volgen.

Uit alles blijkt, dat de geestelijke eigenschappen van de mensch gebonden zijn aan stoffelijke gedeelten van de hersenschors. Ook hier heeft dus een localisatie plaats gevonden. Merkwaardig is, dat alle herkenningscentra, alsmede het centrum, dat het spreekmechanisme bestuurt, in één hersenhelft zijn gelegen. De andere hersenhelft is volkomen gedachtenloos. Bij rechtshandige menschen zetelen de gedachten in de linker hersenhelft en omgekeerd. Worden rechtshandigen getroffen door een bloeduitstorting in de linkerhelft van de hersenen, dan lopen zij dus groot gevaar het spraakvermogen of geestelijke eigenschappen te verliezen.

Teneinde te vermijden, dat wij ons in deze gecompliceerde materie verliezen, zullen wij ons beperken tot de conclusie, dat de meer primitieve gewaarwordingen aan de aangeboren zintuigsferen moeten worden toegeschreven, terwijl de hogere gewaarwordingen op rekening van de aangeleerde geestelijke sferen moeten worden gesteld. Passen wij die beschouwing toe op de spraak, dan beoordeelt het primaire gehoorscentrum de geluidsterkte, terwijl de verstaanbaarheid door het „woordhoor-centrum" wordt bepaald. Evenzo wordt de sterkte van een muzikale toon door het primaire gehoorscentrum beoordeeld, terwijl de toonhoogtegewaarwording in het muziekcentrum tot stand komt. Dit centrum bepaalt ook, of een combinatie van tonen zuiver klinkt of niet.

3. *De toonhoogtegewaarwording.*

De bepaling van de toonhoogte van een geluid is een muzikale verrichting van de hersenen, en wel van het muziekcentrum. De oude localisatietheorie leert, dat de verschillende frequenties, die in het aan het oor aangeboden geluidsspectrum voorkomen, elk een bepaalde plaats van het BM in beweging brengen. Von Bekesy heeft dit langs microscopische weg voor het menselijk oor vastgesteld, en zelfs de exitatiekrommen van verschillende gedeelten van het BM gemeten.

De toonhoogtegewaarwording is dus teruggebracht tot een plaatsbepaling, een localisatie. Prikken wij, om een analoog voorbeeld te nemen, onze huid met een scherp voorwerp, dan zal een geheel gebiedje worden ingedrukt. Het „zwaartepunt" van dit gebiedje komt ons voor als de plek, waar het prikken plaats heeft. Beschouwen wij nu het BM als een uit veiligheidsoverwegingen naar binnen gestulpte huidplooi, en dat mogen wij op evolutie-theoretische gronden zeker doen, dan zien wij, dat een bepaald gebied daarvan door resonantie wordt ingedrukt. Het „zwaartepunt" van het geprikkelde gebied komt ons voor als de localisatie van de prikkeling.

Een toonhoogte gewaarworden wil dus zeggen: zich van de plaats bewust worden, waar het BM het sterkst wordt geprikkeld. Uit de wijze, waarop de gehoorszenuw zich in het BM vertakt kunnen wij opmaken, dat het zeer waarschijnlijk is, dat de hersenen tot een dergelijke plaatsbepaling in staat zijn.

Zijn er meerdere gebieden met een relatief maximum in de trillingsamplitude, dan kunnen naast elkaar meerdere toonhoogten worden waargenomen.

Ligt het bewuste prikkelingszwaartepunt dicht bij de stijgbeugel, dan voelen wij de toon als hoog aan, terwijl wij een prikkeling in de omgeving van helicotrema als laag bestempelen. Lage tonen nu corresponderen met lage frequenties, en hoge tonen met hoge frequenties. Dit wordt door de bouw van het slakkenhuis veroorzaakt. Het is evenwel moeilijk zeer hoge of zeer lage frequenties te localiseeren. De resonatoren, die op de zeer hoge frequenties reageren liggen n.l. sterk op elkaar gedrongen. Ditzelfde is het geval met de resonatoren voor de lage frequenties. De selectiviteit is in het lage gebied zo gering, dat een zuivere localisatie misloopt.

In het middelste gebied van 50—4000 Hz is een behoorlijke localisatie mogelijk, en dat is juist het gebied, waarin de muzikale grondtonen voorkomen. De frequenties daarboven, zeg tot 13000 Hz dragen bij tot de timbrevorming en niet te vergeten tot de sterkte van het muzikale geluid. Streng vasthoudend aan het localisatiebeginsel kunnen wij voor dat hoge

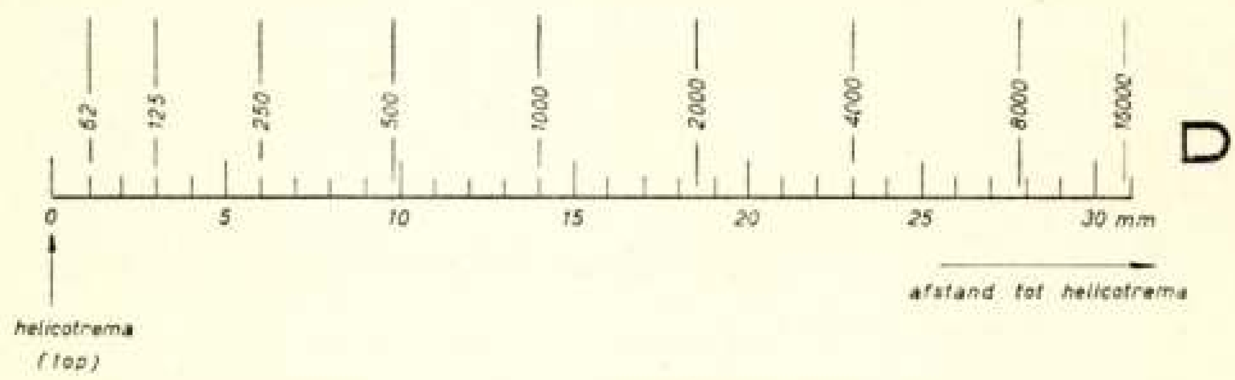


Fig. 3.
Frequentie-indeling van het basilair membraan.

gebied geen verdere functies bedenken. Wij zijn echter straks in staat aan het hoge gebied een nieuwe functie toe te kennen.

Wat betreft de rangschikking van de verschillende frequenties langs het BM, deze is in het gebied van de muzikale grondtonen een logarithmische (zie fig. 3).

Zo is er het bekende geval van de octaven. Het verschil in toonhoogte tusschen twee tonen, waarvan de bijbehorende frequenties zich verhouden als 1 : 2 wordt steeds als evengroot ondervonden. Een octaaf beteekent een bepaalde afstand op het BM. Volledigheidshalve moeten wij echter opmerken, dat het oor bij een zeer nauwkeurige bepaling van het octaaf van de frequentieverhouding tusschen beide componenten gebruik maakt, en in mindere mate van de octaafafstand op het BM. Dit is dus een afwijking van het zuivere localisatiebeginsel, doch de werking van het oor kan nu eenmaal niet worden beschreven met het localisatiebeginsel alleen.

Omdat de indeling van het BM een logarithmische is, is het dus geen wonder, dat de in de muziek in de loop van de eeuwen in genade aangenomen en weer verworpen toonschalen naar de frequentie bezien een logarithmisch karakter bezitten.

Een nieuwere uitgave is de getempereerde toonschaal, dikwijls aan Simon Stevin toegeschreven. (fig. 4a). Hij verdeelt het octaaf, want daar gaan de meeste toonschalen van uit, in twaalf gelijke intervallen. De twee frequenties, die zo'n interval be-

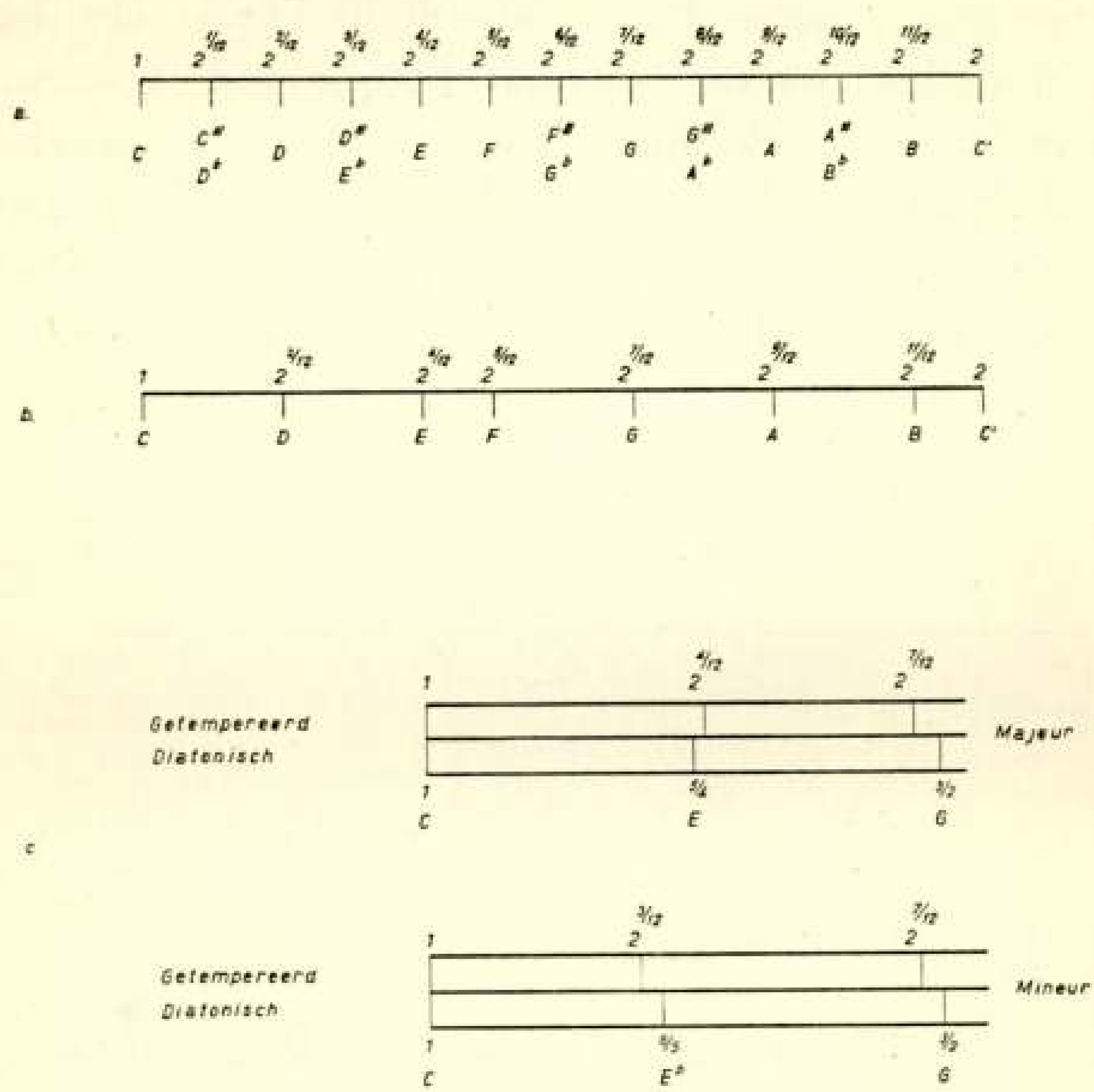


Fig. 4.
De getempereerde toonschaal.

grenzen verhouden zich als:

$$1 : 2^{\frac{1}{12}}$$

Omdat het BM de frequenties ruimtelijk logarithmisch uitspreidt is het dus logisch een toonschaal te definiëren, die met dit logarithmische karakter rekening houdt. De getempereerde toonschaal bestaat uit 12 aan elkaar gelijke intervallen, 12 zg. halve tonen. Meer vertrouwd zijn wij met de getempereerde majeur toonladder, die ontstaat uit de getempereerde toonschaal door er bepaalde halve tonen uit weg te laten (fig. 4b).

Er zijn nog twee halve tonen overgebleven, nl. het interval EF en het interval BC. De keuze van deze majeurtoonladder berust feitelijk op de diatonische toonladder, die wij straks zullen bespreken. Voorlopig beperken wij ons tot de opmerking, dat de in fig. 4 b gegeven volgorde van frequentieverhoudingen het oor streelt. Bij welke frequentie wij de *C* leggen kunnen wij nog willekeurig beslissen. Iemand met een lage stem zal, ter vermijding van inspanning, de *C* gaarne laag leggen. Elk instrument heeft een toonhoogtegebied, waarin het goed klinkt en bovendien gemakkelijk is te bespelen. Al naar

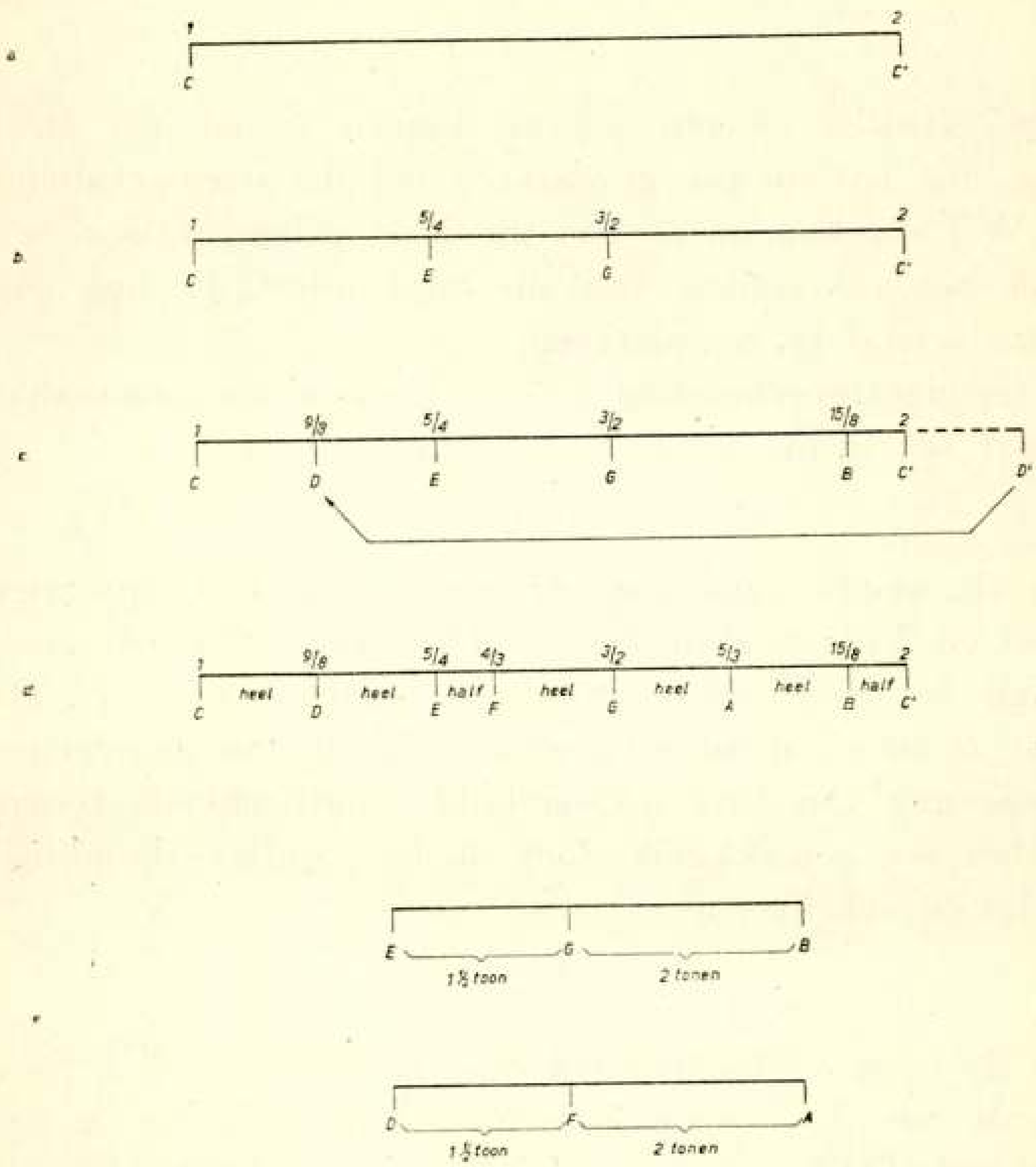


Fig. 5.
De diatonische toonschaal.

het frequentiebereik onderscheidt men bijv. tenor-saxofoon, altsaxofoon, bas-saxofoon, sopraan-saxofoon.

Velen kunnen zich niet verenigen met de getempereerde toonladder. Zij worden gehinderd door een te critisch muziekcentrum, en zijn aanhangers van de door Zarlino in 1560 uitgevonden diatonische toonschaal. Door deze schaal uit het octaaf te ontwikkelen kunnen wij nagaan, wat Stevin er toe bracht zijn getempereerde intervallen voor te stellen.

Als uitgangspunt kiezen wij weer het octaaf (fig. 5a), dus twee frequenties, die zich verhouden als $1 : 2$. Wij baseren ons verder op het natuurverschijnsel, dat het muziekcentrum de samenklank van drie frequenties, die zich verhouden als $4 : 5 : 6$ (in het algemeen als gehele kleine getallen) als welluidend bestempelt. Straks zullen wij een waarschijnlijke verklaring voor deze voorliefde bespreken. Schrijven wij nu gemakshalve voor de bedoelde frequentieverhouding:

$$1 : \tfrac{5}{4} : \tfrac{3}{2}$$

Deze getallen voegen wij nu tussen C en C^1 en krijgen dan fig. 5b. Tot nu toe gebruikten wij de priemgetallen 1, 2, 3 en 5, Wij spreken nu af ons tot deze priemgetallen te beperken bij het vaststellen van de intervallen, die nog nodig zijn om onze schaal te completeren.

De frequentieverhouding $4 : 5 : 6$ kunnen wij gemakshalve ook als volgt schrijven:

$$\tfrac{3}{2} : \tfrac{15}{8} : \tfrac{9}{4}$$

Aan de reeds aanwezige G voegen wij de frequenties B en D^1 toe en krijgen dan fig. 5c. De toon D^1 wordt een octaaf verlaagd en vindt dan een plaats tusschen C en E. Het valt op, dat B en C^1 dichter bij elkaar liggen dan de overige tonen. De twee nog aan onze majeur-ladder ontbrekende tonen F en A vinden wij gemakkelijk door de frequentieverhouding $4:5:6$ als volgt te schrijven:

$$\tfrac{4}{3} : \tfrac{5}{3} : 2$$

Aan de toon C^1 kunnen wij dus de tonen F en A toevoegen. Dit leidt tot de complete majeurtoonladder, die in fig. 5d is opgetekend. De tonen E en F blijken weer dicht bij elkander te liggen.

Noemen wij nu de samenklank van drie tonen, waarvan de frequenties zich verhouden als $4 : 5 : 6$ een majeur accoord, dan bevat onze majeur toonladder de volgende drie majeur accoorden:

$$C\,E\,G\,,\; G\,B\,D^1\,,\; F\,A\,C^1\,.$$

Er is evenwel nòg een frequentieverhouding, die door het muziekcentrum op prijs wordt gesteld, nl. de verhouding:

$$10 : 12 : 15$$

Wij noemen dit het mineur accoord omdat het enigszins droevig klinkt. In onze majeur toonladder blijken nog twee van dergelijke (zuivere) mineur accoorden te zitten, en wel:

$$E\,G\,B \text{ en } A\,C^1\,E^1 .$$

Tevergeefs echter trachten wij in de combinatie $D\,F\,A$ een zuiver mineur accoord te zien. De bijbehorende frequentieverhouding is nl. $\frac{9}{8}:\frac{4}{3}:\frac{5}{3}$. De eerste gehele getallen, die aan deze verhouding voldoen zijn: 27 : 32 : 40. Dit frequentiemengsel wordt niet als welluidend gekwalificeerd. In fig. 5e zijn het zuivere accoord $E\,G\,B$ en het onzuivere accoord $D\,F\,A$ naast elkaar geteekend. Het valt op, dat beide accoorden het zelfde patroon bezitten, nl. een interval van $1\frac{1}{2}$ toon gevolgd door een interval van 2 tonen, en toch niet æquivalent zijn. Dit klinkt paradoxaal, maar de oplossing is eenvoudig: de hele tonen van de diatonische schaal zijn niet alle even groot. Wij kunnen van de intervallen nl. het volgende overzicht maken:

Interval	Frequentieverhouding	Benaming
$D\,C$, $B\,A$, $G\,F$	$\frac{9}{8}$	groote seconde
$E\,D$, $A\,G$	$\frac{10}{9}$	kleine seconde
$F\,E$, $C^1\,B$	$\frac{16}{15}$	halve toon

Het interval $E\,G$ blijkt dus groter te zijn dan het interval $D\,F$.

Bij instrumenten, waarvan de tonen vast zijn ingesteld, zoals de piano, de guitaar e.d., geeft de diatonische stemming het nadeel, dat men, uitgaande van een willekeurige toon, daarop niet steeds met behulp van de andere toetsen, een welluidend accoord kan opbouwen. Het spelen in verschillende toonsoorten wordt daardoor zeer bemoeilijkt. Stevin ontdeed zich van deze beperking door het wegnemen van de oorzaak, nl. het verschil tussen de grote en de kleine seconde. Alle gehele tonen werden door hem even lang gemaakt. In de getempereerde toonschaal is er slechts één zuiver accoord, nl. het octaaf.

Alle andere accoorden zijn onzuiver, evenwel in een mate, die door het gemiddelde oor niet als storend wordt aangemerkt. Fig. 4c geeft van deze onzuiverheid enkele voorbeelden. Zo ligt in het majeur accoord de getempereerde grote terts in een frequentieverhouding 1,0079 boven de diatonische grote terts. In het mineur accoord ligt de diatonische kleine terts. een factor 1,0091 boven de getempereerde kleine terts. De diatonische quint ligt in beide accoorden een factor 1,0011 boven de getempereerde quint.

Ter wille van de groote technische voordelen, die de getempereerde toonschaal biedt, is het dus gewenscht het muziekcentrum niet aan te moedigen in een voorkeur voor de pijnlijk nauwkeurige frequentieverhouding 4 : 5 : 6 of 10 : 12 : 15. In verband hiermede kunnen wij nog de volgende opmerkingen maken.

Zelfs het reine (diatonische) majeur accoord wordt pas sinds een paar honderd jaar welluidend gevonden.

De door de grote wiskundige Euler voorgestelde samenklank:

$$4 : 5 : 6 : 7$$

die er toch wel bij uitstek rein uitziet, wordt door de meesten als zijnde te rein, afgewezen. Zij kunnen zich daarentegen wel verenigen met het, om een reine ontknoping vragende, accoord:

$$4 : 5 : 6 : 7\tfrac{1}{9}.$$

Het oor is voor de zuiverheid van na elkaar gespeelde tonen lang niet zoo gevoelig als voor de zuiverheid van gelijktijdig weergegeven tonen. Dat is een verschil tussen de melodie, de opeenvolging van tonen, en de harmonie, de samenklank van tonen. Hoort men twee tonen na elkaar, dan heeft men de voorgaande toon eigenlijk al een weinig vergeten, zodat een onzuiverheid minder opvalt. Hoort men de twee tonen gelijktijdig, dan is een directe vergelijking mogelijk, waardoor onzuiverheden meer op de voorgrond treden.

4. *De hypothese van het residu.*

Wij vermeldden reeds, dat er in het slakkenhuis een frequentieanalyse tot stand komt, waardoor de verschillende frequenties ruimtelijk over het basilair membraam worden uitgespreid.

De waarheid van deze bewering werd door von Békésy [1]) met behulp van het microscoop experimenteel aangetoond. Hij heeft een speciale preparatietechniek ontwikkeld voor het opnemen van exitatiekrommen van de basilaire membranen van pasgestorven mensen. Hij opent nl. het slakkenhuis en sluit de opening af met een glaasje. Hij brengt het ovale venster in trilling en kijkt dan door het glaasje naar een bepaalde plaats van het basilair membraan. Door een stroboscopische belich-

[1]) G. v. Békésy; Über die Resonanz Kurve und die Abklingzeit der verschiedenen Stellen der Schnecken trennwand. A.Z. März 1943.

ting kan de beweging van het membraan goed worden gevolgd.

Voor elke plaats van het BM kan nu de amplitude als functie van de frequentie worden opgenomen. Er ontstaan dan resonantiekrommen, die een betrekkelijk vlak verloop hebben. Wil men een bepaalde plaats van het BM als een resonator opvatten, dan is het in geen geval een resonator met een scherpe resonantiepiek. Van dit feit zullen wij straks gebruik maken.

De localisatietheorie, aldus experimenteel aangetoond, stelt ons voor de consequentie dat een toonhoogte slechts wordt waargenomen, indien op de bijbehorende plaats van het BM een relatief maximum in de amplitude voorkomt. Dit betekent, dat de corresponderende frequentie normalerwijze als sinusvormige component in het beluisterde mengsel aanwezig moet zijn. Er zijn echter frequentiemengsels, die aanleiding geven tot een toonhoogtegewaarwording, die past bij een frequentie, die in het mengsel totaal afwezig is. Zo geeft een mengsel van de frequenties:

500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, enz. Hz

duidelijk een, zij het ook ruwe, toonhoogtegewaarwording, die correspondeert met de frequentie 250 Hz.

Schouten [1]) heeft voor deze subjectieve toonhoogtegewaarwording de benaming residu ingevoerd. Het residu kan men waarnemen bij het beluisteren van kerkklokken, belschalen, Westminster-slagwerken en dergelijke trillingslichamen. Bovendien zijn zwevingen ook tot een residu terug te brengen, terwijl men in kunstmatige geluiden doelbewust een residu kan opwekken.

Een bevredigende verklaring van het residu werd nog niet gegeven. Wij zullen nu trachten het residu een plaats te verlenen in de localisatietheorie, waarmede het ogenschijnlijk in strijd is en aannemelijk te maken op welke wijze een toonhoogtegewaarwording tot stand kan komen, passend bij een plaats van het BM, waar geen relatief maximum in de amplitude aanwezig is.

Als uitgangspunt kiezen wij de zenuwimpulsen, die door een geprikkelde plek van het BM naar de hersenen worden gezonden. De energieoverdracht langs een zenuw heeft een quanteus karakter. Zolang het BM ter plaatse in beweging is, wordt per seconde een bepaald aantal impulsen naar de hersenen

[1]) J. F. Schouten, De toonhoogtegewaarwording, Philips Technisch Tijdschrift, October 1940.

gezonden. Die impulsen zijn van electro-chemische aard en planten zich betrekkelijk langzaam langs de zenuwbaan voort. Heeft de zenuwvezel een impuls overgebracht, dan heeft zij enige tijd nodig om zich te herstellen. Dit is de z.g. refractietijd, die het een zenuw belet per sec. veel impulsen over te brengen. Door samenwerking van een aantal parallel geschakelde vezels is het echter zeer goed mogelijk de frequentie van de impulsen hoog op te voeren, doordat de ene vezel een impuls overdraagt gedurende de tijd, dat een andere vezel bezig is zich te herstellen. Bij proeven op dieren heeft men geconstateerd, dat de zenuwimpulsen voor frequenties < 2000 Hz met de frequentie zijn gesynchroniseerd. Men kon bovendien vaststellen, dat een zenuwimpuls wordt afgezonden, wanneer het trommelvlies zich

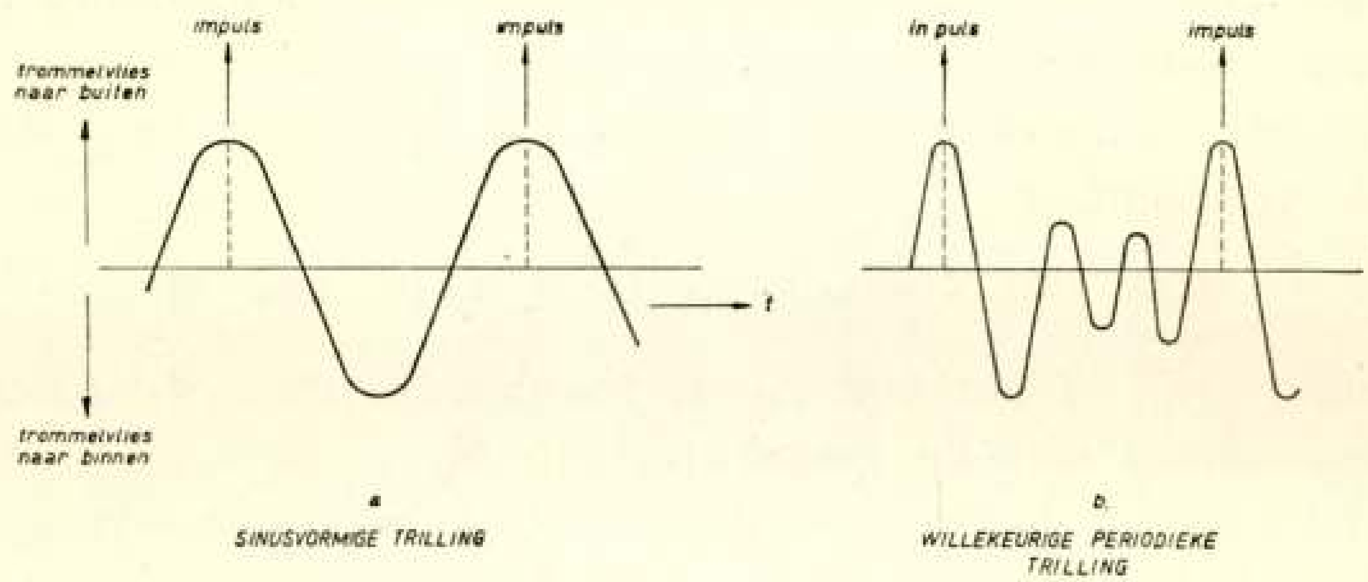


Fig. 6.
De hypothese van de gesynchroniseerde zenuwimpulsen.

naar buiten beweegt, dus het BM naar het ovale venster wordt gebogen. Het ligt voor de hand om aan te nemen, dat de zenuwimpulsen bij een sinusvormige beweging van het BM op de in fig. 6a gemarkeerde tijdstippen worden uitgezonden, d.w.z. in de eenzijdige uiterste standen van het BM.

Wij veronderstellen voorts, dat ook bij een niet-sinusvormige trilling de zenuwimpulsen in de alleruiterste standen van het BM worden afgegeven (fig. 6b).

Onder de impulsfrequentie zullen wij nu verder het aantal zenuwimpulsen verstaan, dat per sec. door het BM, of een gedeelte daarvan, naar de hersenen wordt gezonden. Voor niet te hoge tonen is de impulsfrequentie gelijk aan de frequentie.

Bezien uit een localisatiestandpunt is de impulsfrequentie een overbodige luxe. Immers, indien de toonhoogtegewaarwording een plaatsbepaling is, wat voor nut heeft het dan, als extra — mededeeling nog de frequentie mee te sturen?

Een eerste aanwijzing is de voorkeur, die het oor vertoont voor frequentiemengsels, waarvan de componenten zich verhouden als (kleine) gehele getallen. Een dergelijk frequentiemengsel vertoont nl. pieken, waarvan de onderlinge tijdsafstand nauwkeurig constant is. De periodiciteit van pieken van gelijke polariteit stemt overeen met de herhalingsfrequentie van het verschijnsel. Deze herhalingsfrequentie is de grootste gemene deler van de samenstellende frequenties.

Het is nu merkwaardig, dat de piekfrequentie (dus ook de herhalingsfrequentie) lager kan zijn dan de laagste frequentie, die in het mengsel voorkomt. Van deze eigenschap zullen wij straks gebruik maken. Het oor is blijkbaar in staat vrij nauwkeurig te bepalen, of het mengsel zuiver periodiek is, dwz. om te constateren, dat de pieken elkaar met gelijke tussenpozen opvolgen. Het moet dus beschikken over een mechanisme, dat

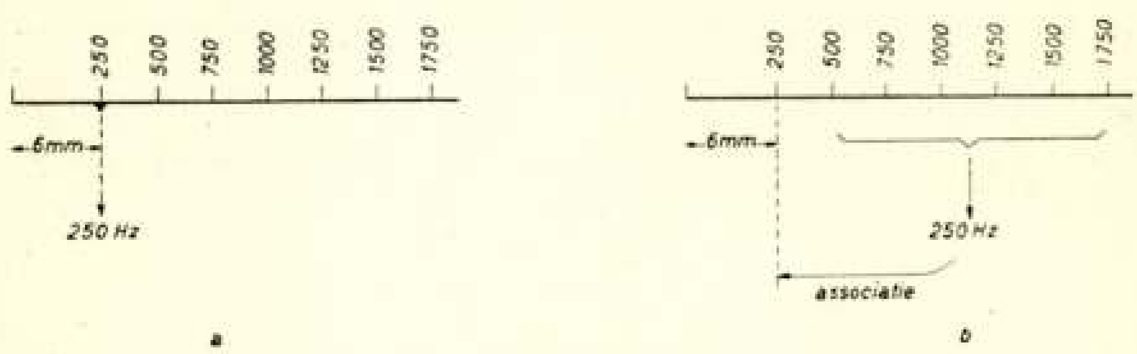


Fig. 7.
De associatie van het residu.

het tijdverschil tusschen twee op elkaar volgende pieken kan meten. Een stap verder is het, om te veronderstellen, dat het gemeten tijdsverschil (een periode dus) nog voor iets anders wordt gebruikt, bv. voor het suggereren van een toonhoogte.

Het is nu nodig om aan te nemen, dat de hersenen op de hoogte zijn van het verband tussen toonhoogte en frequentie, anders gezegd het verband tussen plaats op het BM en frequentie. Populair uitgedrukt: de hersenen moeten weten hoe fig. 3 er uit ziet.

De verklaring van het residu kan verder eenvoudig geschieden aan de hand van fig. 7.

Beluistert men een zuivere toon van bijv. 250 Hz, dan constateren de hersenen een relatief maximum in de amplitude van het BM op een afstand van 6 mm. van het helicotrema. Dit maximum is in fig. 7a schematisch aangegeven. Bovendien levert het BM de impulsfrequentie 250 Hz.

Fig· 7b heeft betrekking op een trillingstoestand van het BM. die wordt veroorzaakt door een frequentiemengsel, waarin de frequentie 250 Hz ontbreekt. Op 6 mm. afstand van het helicotrema is er nu geen maximum in de amplitude. Van een normale localisatie kan dus geen sprake zijn. Wij zullen echter straks aantonen, dat het hoge gebied van het BM tengevolge van de harmonischen van 250 Hz, die wel aanwezig zijn, sterk de impulsfrequentie 250 Hz naar de hersenen zendt. Aangezien de hersenen bekend zijn met het verband tusschen frequentie en toonhoogte associëren zij bij de impulsfrequentie 250 Hz de bijbehorende toonhoogte 6 mm. Dit is dus een indirecte localisatie, die via een denkproces plaats vindt. Wellicht is de

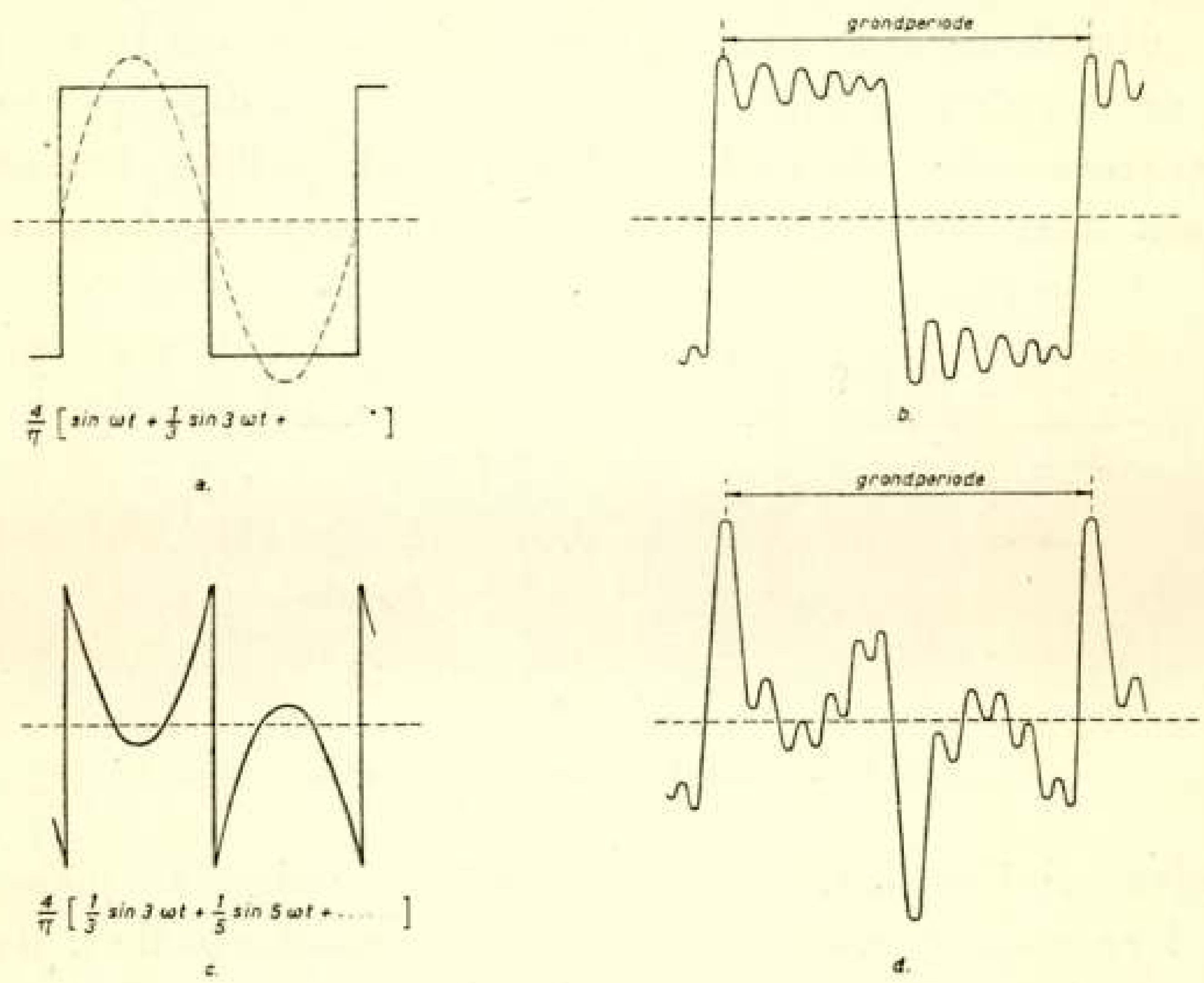


Fig. 8.
Trillingsvormen van een punt van het basilair membraan.

ruwe klank van het residu een afspiegeling van de moeite, die de hersenen moeten verrichten om deze indirecte localisatie uit te voeren.

Rest ons dus nog om te verklaren, hoe het hoge gebied van het BM de lage impulsfrequentie 250 Hz kan uitzenden. De verschillende punten van het BM kunnen, gezien hun exitatiekrommen, worden opgevat als resonatoren, evenwel met een flauw verlopende resonantiepiek.

Dat wil dus zeggen, dat een dergelijke resonator niet alleen reageert op de afstemfrequentie, doch eveneens op naburige frequenties. In fig. 8 is een voorbeeld gegeven. Stel, aan het BM wordt een rechthoekige trilling aangeboden (fig. 8a). Een weinig scherpe resonator uit het hoge gebied zal dan de in fig. 8 b geschetste trillingsvorm vertonen. Duidelijk herkent men de grondperiode als afstand tussen twee op elkaar volgende pieken van gelijke polariteit.

Verwijderen wij de grondgolf uit de rechthoekige trilling, dan ontstaat fig. 8 c. De resonator vertoont nu de in fig. 8 d geschetste trillingsvorm. Ondanks het feit, dat ook daarin de grondgolf als sinusvormige componente ontbreekt, manifesteert de grondperiode zich weer als afstand tussen twee pieken van gelijke polariteit. De resonator zendt dus zenuwimpulsen af, die met de frequentie van de grondgolf zijn gesynchroniseerd.

4. *Het horen met twee oren.*

Het horen met twee oren is belangrijk in twee opzichten.

In de eerste plaats verschaft het de mogelijkheid tot het gewaarworden van richting en afstand. De richtingsgewaarwording is een interpretatie van sterkte — en tijdsverschillen tussen de geluiden, die beide oren opvangen. De sterkteverschillen, die ontstaan door buiging aan het hoofd, spelen waarschijnlijk de belangrijkste rol. Het blijft echter een feit, dat ook tijdsverschillen als een richting worden geinterpreteerd, bijv. bij sinusvormige trillingen. Het ligt voor de hand, dat hierbij de zenuwimpulsen een rol spelen.

Lage frequenties worden door het hoofd weinig afgebogen, hoge frequenties zeer sterk. De frequenties in het gebied van 1000 à 2000 Hz lenen zich het best voor de richtingsbepaling. Het is misschien geen toeval, dat het oor voor die frequenties het gevoeligst is.

Een richtingsbepaling in het verticale vlak is practisch niet mogelijk indien het hoofd wordt vastgeklemd. Wat onder of boven is kan slechts worden bepaald door het hoofd scheef te houden. Een dergelijke methode wordt bijv. door een hond toegepast.

In de commerciële telefonie interesseert men zich niet zozeer voor de richtingsgewaarwording, dan wel voor de geluidssterktewinst, die ontstaat door het luisteren met twee oren in plaats van met één oor. Men kan zowel berekenen als meten, dat een geluidsdrukverlaging van 12 dB kan worden opopgeheven door naar dat geluid te luisteren met twee oren in plaats van met één oor. Dit verschijnsel is ten zeerste van belang bij het telefoontoestel: een extra-lijndemping kan worden opgeheven door het gebruik van een tweede telefoon.

Mededeelingen.

U.R.S.I.

Het algemeen secretariaat, te Brussel, deelt mede:

1. Van het maandelijks verschijnende Bulletin van de U.R.S.I., bevattende mededeelingen van de Commissies, onder-Commissies of ook leden, ontvangt het Genootschap in het vervolg 10 gratis exemplaren. Boven dit aantal kunnen abonnementen afgesloten worden tegen circa *f* 12.— per jaar.

2. Het volledig verslag van de VIIe algemeene vergadering te Parijs in 1946 zal waarschijnlijk in druk verschijnen.

Het Genootschap zal dan vermoedelijk 20 gratis exemplaren ontvangen.

Ook hierin kunnen, boven dit aantal, bestellingen genoteerd worden tegen circa *f* 18.—.

Zij die in aanmerking meenen te komen voor één der gratis exemplaren, welke overblijven, na aftrek van die voor het Secretariaat en afgevaardigden voor de U.R.S.I., of de betaalde bestellingen wenschen te plaatsen, gelieven hiervan spoedig bericht te zenden aan den Secretaris van het Genootschap.

Samenwerking met Amateurs.

Het resultaat van de gehouden enquête betreffende samenwerking met Amateurs betreffende meetingen of waarnemingen zal een onderwerp uitmaken van een Bestuursvergadering.

Over de getrokken conclusies of eventueel te nemen maatregelen zal in dit Tijdschrift t.z.t. mededeeling worden gedaan.

Ontvangen tijdschriften.

Journal of the Franklin Institute, Juni, Juli, Augustus 1947.
Wireless Engineer, Augustus, September 1947.
Radio Revue, Juli, Augustus 1947.
De Ingenieur, Jrg. 59, Nrs 30-38.
Radio Expres, Jrg. 24. Nrs 15-17.
Bulletin Mensuel de l'U.R.S.I., Juli, Augustus 1947.
Proc. Cambridge Philosophical Soc. Vol 43 (part 3).

Verslag van het examen Radio-technicus en monteur, gehouden in April, Juni en Juli 1947.

Het schriftelijk examen Radio-technicus en Radio-monteur werd gehouden op 16 en 17 April 1947. Aangemeld hadden zich 134 candidaten voor technicus (waarvan teruggetrokken 6) en 170 voor monteur (waarvan teruggetrokken 5). Wegens onvoldoend schriftelijk examen werden afgewezen 44 candidaten technicus en 49 candidaten monteur, zoodat voor het mondeling gedeelte werden opgeroepen 84 candidaten technicus en 116 candidaten monteur, welk mondeling examen werd gehouden op 4, 5, 11, 12, 19, 20 en 30 Juni en 1 Juli 1947.

Afgewezen werden 33 candidaten technicus en 43 candidaten monteur, terwijl 1 candidaat monteur voor een herexamen in aanmerking werd gebracht, (3 candidaten niet opgekomen).

Geslaagd zijn in totaal 51 candidaten technicus en 69 candidaten monteur.

Van de 8 candidaten voor een herexamen voor monteur slaagden er 7. Uit het resultaat blijkt, dat vele candidaten onvoldoende voorbereid zich voor het examen hebben opgegeven.

De Examen-commissie bestond uit de Heeren:

Ir Th. J. Weijers, Ing. Lab. N.V. Philips Gloeilampenfabr. Eindhoven, Voorz.
B. Slikkerveer, Leraar Wis- en Zeevaartkunde Den Haag, Secr.
Ir J. J. Vormer, Hoofdingenieur der T. & T., Den Haag.
Ir B. v. Dijl, Ingenieur der T. & T., Den Haag.
Ir P. H. Boukema, Ingenieur der T. & T., Den Haag.
Ir. H. de Lange, Ingenieur Ned. Seintoestellenfabriek, Hilversum.
Ir J. de Mey, Ingenieur K.L.M.
Ir. H. F. Hylkema, Ingenieur Ned. Telegr. Mij Radio-Holland, Amsterdam.
Ir F. H. Bicknese, Ingenieur der T. & T., Den Haag.
Dr J. J. Zaalberg v. Zelst, Lab. N.V. Philips Gloeilampenfabr., Eindhoven.
Ir J. C. v. Loon, Ingenieur N.V. Philips Gloeilampenfabr., Eindhoven.
Ir H. Lindenhovius, Ingenieur N.V. Philips Gloeilampenfabr., Eindhoven.
Drs E. C. Mulders, Ingenieur Physisch Lab. Ministerie van Oorlog.
Ir Bordewijk, Ingenieur Physisch Lab. Ministerie van Oorlog.
Ir L. M. R. Vos de Wael, Ingenieur der T. & T., Den Haag.
Ir R. de Miranda, Ingenieur N. V. Philips Gloeilampenfabr., Eindhoven.
H. Chr. Jacobs, Werkmeester N.V. Philips Gloeilampenfabr., Eindhoven.
J. W. v. Hal, Chef-instrumentmaker Radiolaboratorium P.T.T., Den Haag.

De Commissie van Toezicht op de examens bestaat uit de Heeren:

Ir J. A. J. Bouman, Ingenieur N.V. Philips Gloeilampenfabr., Eindhoven.
Prof. Ir L. H. M. Huydts, Technische Hoogeschool, Delft.
A. J. E. v. Anrooy, Inspecteur Kust- en Scheepsradio, Den Haag.

Geslaagd voor monteur:

N. J. Snaas	Schagen	J. Meertens	Rotterdam
L. N. J. Groeneveld	Bussum	C. J. v. Oostrum	Rotterdam
F. Richelme	Bussum	R. J. Klok	Groningen
A. O. Romeijn	Haarlem	H. du Mez	Rotterdam
R. J. v. Biesbergen	Amsterdam	W. H. Bos	Schiedam
A. Herder	Oosterwolde	.P C. Koerse	Arnhem
Th. F. Stok	Vlissingen	G. Aleman	Schiedam
B. v. Hulst	Zutphen	A. P. Tanis	's Heerenhoek
W. Koster	Leeuwarden	J. Jansen	Den Haag
J. H. Jansen	Den Haag	F. A. Grootveld	Amsterdam
E. Put	Tiel	A. R. Woudsma	Eindhoven
H. Hoogmoed	Dirksland	D. Boersma	Maartensdijk
R. de Moor	Leeuwarden	J. Blomenkamp	Amsterdam
Mej. B. G. Lievegoed	Hilversum	W. W. J. M. Blok	Schiedam
H. J. Slenderbroek	Hilversum	R. Leefsma	Groningen
C. G. Zwanenbeek	Laren	A. Smid	Veendam
W. Hazeveld	Delft	K. H. I. Bonting	Hoogezand

B. Renkema	Groningen	J. Kolijn	Utrecht
G. Groeneveld	Eindhoven	B. Nijholt	Baarn
P. A. de Roon	Rotterdam	J. G. Slijkoord	Aalst Waalre
M. B. J. Schoenmaker	Rotterdam	J. Gerding	Assen
G. T. A. M. van Kalmthout	Nijmegen	Chr. Dekkers	Eindhoven
A. N. de Groot	Bilthoven	J. Cauberg	Eindhoven
A. A. Gruijters	Eindhoven	C. J. v. d. Linden	Meerveldhoven
J. W. Pans	Velsen	J. J. v. Ginderen	Eindhoven
A. H. Vronik	Amsterdam	C. Nauta	Eindhoven
G. ter Meulen	Baarn	C. v. d. Burgh	Eindhoven
J. Jongens	Koog a.d. Zaan	A. A. Weemaes	Eindhoven
A. B. A. Nijssen	Bussum	F. J. H. Jansen	Eindhoven
H. J. Buursen	Twello	E. J. Hendriks	Renkum
H. Tulp	Utrecht	M. J. v. d. Molengraft	Eindhoven
H. H. M. Rooswinkel	Deventer	W. F. Eijtinger	Amsterdam
Th. A. L. Beerens	Hilversum	G. R. Haarlemmer	Veendam
C. M. de Keijzer	Hilversum	J. C. Herenius	Groningen
J. Snijders	Eindhoven	K. Postema	Glimmen
C. J. G. Bakermans	Eindhoven	G. Heemstra	Groningen
P. C. M. v. d. Sande	Tilburg	G. J. Honijk	Den Haag
M. C. de Jongh	Krommenie	J. A. Grim	Zaandam

Geslaagd voor technicus:

A. C. de Klerk	Bilthoven	J. G. Camphuis	Amsterdam
L. H. Kuijsten	Hilversum	J. H. Engel	,,
S. Visser	Amsterdam	L. W. v. Es	,,
C. J. v. Willigen	Rotterdam	W. F. Eytinger	,,
P. Hijmans v. Anrooy	IJzendijke	J. A. Grimm	Zaandam
J. Tuinman	Den Haag	P. Meffert	Amsterdam
W. A. Nooteboom	Eindhoven	W. Ribbelink	,,
R. Tijsseling	Bloemendaal	H. Schutte	,,
D. W. Weijtze	Rotterdam	J. W. Straatmeijer	,,
J. A. Burgers	Den Dolder	R. S. v. Santen	,,
B. Borrani	Rotterdam	W. Tebra	Zaandam
A. Haaksman	,,	P. Vijzelaar	Amsterdam
C. W. L. Hollemans	Vlaardingen	J. Weber	,,
J. Keizerwaard	Berkel	M. H. Limper	Baarn
G. J. Onder de Linden	Rotterdam	E. Bosch	Bussum
R. C. Roelers	Overschie	J. H. Hidden	Hilversum
R. Schipperus	Hillegersberg	J. C. L. Lagarde	Utrecht
W. de Vries	Bussum	J. Kolijn	,,
W. Zijlstra	Kesteren	G. de Jong	Hillegom
C. H. v. Herp	Overschie	U. M. Wiersema	Amsterdam
J. Sterkman	Hilversum	H. Lubsen	Den Haag
M. v. d. Meer	Haarlem	F. Dorhout	Hilversum
P. C. Gitz	Scheveningen	P. v. Bree	Eindhoven
E. P. Kirsten	Eindhoven	J. H. E. Notten	,,
A. N. v. Tunen	Santpoort	J. D. de Hartog	,,
J. D. C. Bodeman	Amsterdam		