

**MASTER**

**Terugkoppeling van een inductieve differentiaal-manometer**

Wokke, J.M.P.

*Award date:*  
1982

[Link to publication](#)

**Disclaimer**

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

**General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain

Terugkoppeling van een  
inductieve differentiaal-manometer.

J.M.P. Wokke

Verslag van het afstudeerwerk  
verricht in de vakgroep  
Analyse van Fysische Meetmethoden.  
Afdeling Technische Natuurkunde  
Technische Hogeschool Eindhoven.

Begeleider: Prof. Dr. J. A. Poulis

24 september 1981.

## INHOUDSOPGAVE

I	Samenvatting	2
II	Inleiding	3
III	Theorie	8
	III.1 Manometer	8
	III.2 Rekenmodel	10
	III.3 Methoden voor terugkoppeling	13
IV	Meetmethode en inleidende metingen	16
	IV.1 Metingen met de vector- impedantie-meter	16
	IV.2 Constructie eigen drukopnemer	19
	IV.3 Meetmethode	22
V	Inductieve terugkoppeling(meetstroom)	25
	V.1 Vervangingsschema	25
	V.2 Schakeling met gelijke spoeltjes en ongelijke stromen	26
	V.3 Interpretatie	27
	V.3.1 Amplitude	31
	V.3.2 Complexe spanningen	32
	V.4 Schakeling met ongelijke spoeltjes en gelijke stromen	35
VI	Inductieve terugkoppeling (gescheiden stroom )	36
VII	Capacitieve terugkoppeling	39
	VII.1 Beschrijving teruggekoppelde manometer	42
VIII	Conclusies	49
IX	Suggesties	50
X	Apparatuur	52
XI	Literatuur	53

## I. Samenvatting.

Dit verslag beschrijft het onderzoek naar de mogelijkheden tot terugkoppeling van een inductieve differentiaal manometer.

De manometer wordt gebruikt in een detector voor chromatografie, die gevoelig is voor viscositeitsveranderingen.

De onderste meetgevoeligheid van deze detector hangt onder meer af van de compliantie ( = doorbuiging van het membraan ) van de manometer.

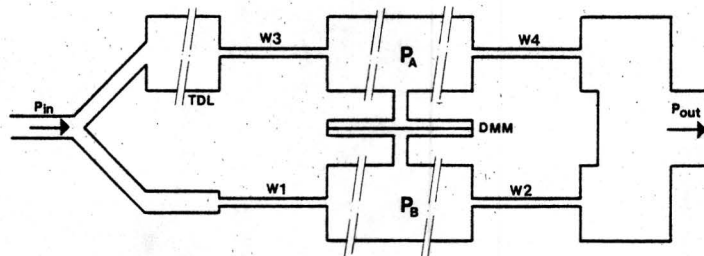
De terugkoppeling gebeurt door een condensatorsysteem in de drukopnemer in te bouwen en gebruik te maken van de krachten die de platen in een condensator op elkaar uitoefenen. Door de condensatorspanning te regelen kunnen we de doorbuiging van het membraan tot een factor 50 verkleinen.

## II. Inleiding.

Een bekende analyse-methode in de chemische techniek is de chromatografie. Deze scheidingsmethode berust op de verschillen in verblijftijden van diverse componenten van een stof bij stroming door een kolom. Achter de kolom gebruikt men een detector, waarmee de aard en de hoeveelheid van de componenten worden bepaald. Afhankelijk van het scheidingsproces kiest men een geschikte detector. De detectie kan geschieden op basis van de massa, soortelijke warmte, viscositeit, elektrische en magnetische eigenschappen.

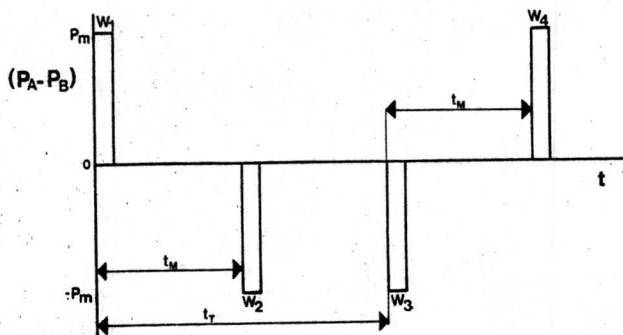
Willems ontwikkelde een detector, die gevoelig is voor viscositeitsveranderingen. Het principe van de detector is geschetst in figuur 1.

De detector bestaat uit een brugschakeling van 4 identieke capillairen en een differentiaal-manometer. Als de viscositeit van de vloeistof, die door de detector stroomt verandert, ontstaan er 4 drukvariaties. Door dat er een vertraginglijn is opgenomen in de bovenste tak, vinden de 4 variaties niet gelijktijdig plaats.

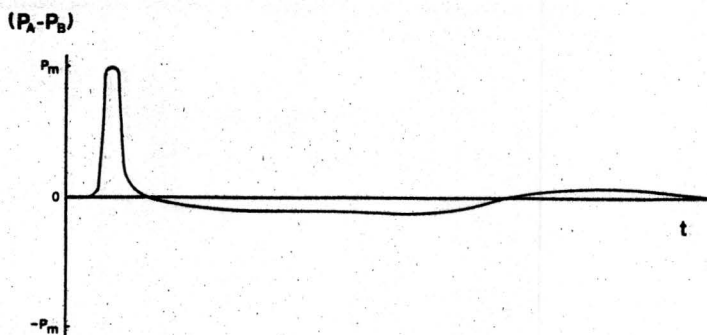


Figuur 1: Principe van de detector van Willems.

$W_1 - W_4$  zijn capillairen. TDL is de tijdvertraginglijn.  
DMM is de differentiaal-manometer.



Figuur 2: Verwacht uitgangssignaal van de drukopnemer na viscositeits-verandering.



Figuur 3: Het uitgangssignaal zoals dat in werkelijkheid wordt gemeten.

In principe zou een verandering van de viscositeit een drukverandering geven, zoals geschetst in figuur 2. Door menging en diffusie krijgen we echter een signaal als in figuur 3.

Als de brug goed gedimensioneerd is, kan er een verband worden gelegd tussen de viscositeitsverandering aan de ingang en de uitgangsspanning van het drukopnemersysteem. De wijze waarop de metingen worden verricht staan uitgebreid beschreven in lit. 1 - 3.

De detector wordt toegepast in twee situaties: voor gassen en voor vloeistoffen. De onderste detectiegrens voor gassen is vergelijkbaar met andere detectoren, voor vloeistoffen is de detector ongevoeliger als bestaande detectoren.

We willen nu bespreken in hoeverre de gevoeligheid van de detector met betrekking tot de drukopnemer te verbeteren is.

We maken daarbij gebruik van de specificaties, zoals Willems die geeft in zijn proefschrift (lit.1).  
 Voor gassen is de detectiegrens  $M_o = 1,1 \cdot 10^{-12}$  kg.  
 Met betrekking tot de drukopnemer geldt dat

$$M_o \propto \frac{1}{S_M} \left( \frac{V_o}{P_o} + 2 B \right) \quad (2.1)$$

Hierin zijn

$$S_M = 4,4 \cdot 10^{-2} \frac{V}{Pa} \quad (\text{gevoeligheid van de drukopnemer. Afhankelijk van het toegepaste membraan})$$

$$B = 8,4 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{Pa} \quad (\text{de compliantie. Dit is een maat voor de doorbuiging van het membraan})$$

$$P_o = 10^5 \text{ Pa} \quad (\text{gemiddelde druk})$$

$$V_o = 7,3 \cdot 10^{-6} m^3 \quad (\text{volume van de meetkamer en direct aangrenzend volume})$$

De compliantie verkleinen heeft in deze situatie weinig zin.

$$\left( 1 + \frac{2 B P_o}{V_o} \right) = ( 1 + 2,3 )$$

Zelfs als de compliantie B gelijk aan 0 zou worden, dan zou de onderste detectiegrens slechts  $\frac{1}{1 + 2,3} = \frac{1}{3,3}$  keer zo groot worden.

Daarmee wordt de onderste detectiegrens dus hoogstens 3 keer zo klein.

Bij vloeistoffen ligt de situatie duidelijk anders.

Hier geldt dat  $M_o = 8,8 \cdot 10^{-10}$  kg.

De afhankelijkheid van de specificaties van de drukopnemer zien we volgens

$$M_o \propto \frac{B}{S_M} \quad (2.2)$$

$$B = 1,7 \cdot 10^{-12} \text{ m}^3 \quad (\text{er is een stijver membraan toegepast})$$

$$S_M = 1,52 \cdot 10^{-3} \frac{\text{V}}{\text{Pa}}$$

Bij terugkoppeling van de manometer kunnen we hier wel winst behalen, omdat dan het quotiënt van B en  $S_M$  verkleind wordt. Daarbij is er nog een randvoorwaarde. Willems koos in zijn opstelling voor een stijver membraan bij de vloeistofmetingen omdat de tijdconstante van de detector  $T_c$  voldoet aan

$$T_c = \frac{\eta_c B}{\alpha} \quad (2.3)$$

$\eta_c$  is de viscositeit van de dragervloeistof,  $\alpha$  is een constante die afhangt van de afmetingen van de capillairen. De tijdconstante willen we graag zelf kiezen en dan ligt B in principe vast.

Als we er nu in zouden slagen de compliantie van het eerst genoemde membraan door terug te koppelen, met een factor 50 te verkleinen, dan zouden we dat stijvere membraan niet nodig hebben. Omdat de gevoeligheid van de drukopnemer met het soepele membraan 30 keer zo groot is, zou de onderste detectiegrens 30 keer zo klein worden.

De toegepaste drukopnemer is gebaseerd op inductie-verandering. We kunnen in principe op twee manieren door een tegenkracht op het membraan terugkoppelen: Inductief en capacitief.

Bij inductieve terugkoppeling maken we gebruik van krachten die we met stroom door de spoeltjes op het membraan kunnen uitoefenen. Deze experimenten, die tot weinig resultaat leiden, staan beschreven in de hoofdstukken V en VI. In hoofdstuk VII beschrijven we de experimenten met capacitieve terugkoppeling. Het aanbrengen van een condensatorsysteem geeft op eenvoudige wijze mogelijkheden om de compliantie van de manometer tot 50 maal te verkleinen. Ik hoop de lezer hiermee voldoende te hebben gemotiveerd met enig genoegen het nu volgende verslag uit te pluizen.



Op deze plaats wil ik Prof. Poulis graag bedanken voor zijn enthousiaste begeleiding.

Ook anderen droegen hun steentje bij. Prof. Gast uit Berlijn, Dr. Ger Willems en de Heer J. Severs (afd. E) stonden klaar met goede raad. De drukopnemer, die hieronder staat afgebeeld, werd gebouwd in de afdelingswerkplaats Natuurkunde door de Heren Van Asten en Bogers. Hen en de leden van de vakgroep A.F.M. wil ik ook graag bedanken.



Foto 1. De zelfgebouwde drukopnemer met de meetbrug. Het witte draadje vormt de aansluiting voor de condensatorspanning op het membraan.

### III. THEORIE.

#### III.1 De manometer.

Alvorens we kunnen denken over het ontwerpen van een teruggekoppelde manometer is het van belang de reeds toegepaste manometer goed te kennen.

Het gaat hier om een Validyne type MP45, een differentiaalmanometer voor kleine drukverschillen (tot 500 Pa). Het huis van de manometer is van roestvrij staal. De twee meetkamers zijn elk ongeveer  $1 \text{ cm}^3$  groot en worden gescheiden door een soepel metalen membraan. Als er een drukverschil is tussen de meetkamers dan zal het membraan doorbuigen. De maat voor de volume-verandering van de meetkamers bij doorbuiging van het membraan onder drukverschil, noemen we de compliantie. Als symbool voor de compliantie gebruiken we de letter "B", de dimensie is  $\text{m}^3/\text{Pa}$ . Bij het door ons toegepaste membraan is B gelijk aan  $8 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{Pa}$ . De oppervlakte van het membraan is  $10 \text{ cm}^2$ . Het membraan is ingeklemd. Slechts  $6 \text{ cm}^2$  van het oppervlak is soepel door dat er een ril in het membraan is geperst. Die  $6 \text{ cm}^2$  noemen we de effectieve oppervlakte. Een drukverschil van 100 Pa geeft een volume-verandering van de meetkamers van  $8 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$ . Dit correspondeert met een membraanverplaatsing van 0,01 mm.

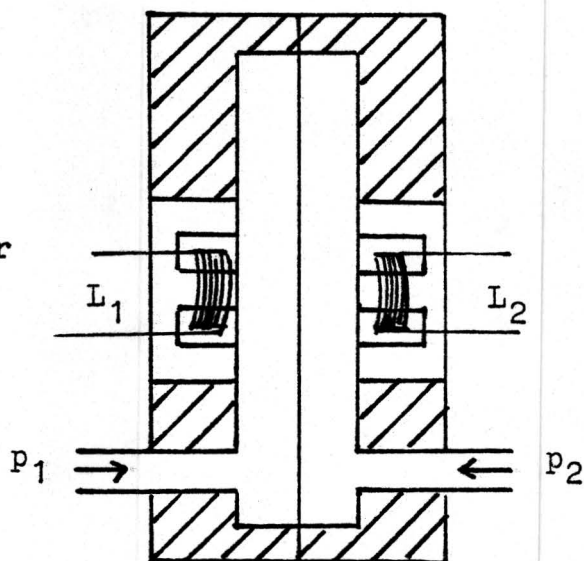
De verplaatsing van het membraan wordt gemeten op inductieve wijze. Aan weerszijden van het membraan, op ongeveer 0,2 mm afstand, bevinden zich spoeltjes op ferroxcube kernen. Deze zijn zo geconstrueerd dat er tussen kern en membraan een kleine luchtspleet is. De spleet bepaalt in hoge mate de zelfinductie van het spoeltje. Zie figuur 4 voor de schematische opbouw. De theorie wordt in de volgende paragraaf nader uitgewerkt.

Bij de detector voor chromatografie die Willems ontwierp is de gevoeligheid onder meer afhankelijk van het ruisniveau van de drukopnemer en van de compliantie. De onderste detectiegrens geeft weinig ruimte tot verbetering. Het verkleinen van de compliantie is het doel van het voorliggende onderzoek.

In principe zijn de gevoeligheid en de compliantie aan elkaar gekoppeld. Als we een stijver membraan toepassen, wordt de compliantie kleiner maar de opnemer wordt ook minder gevoelig. Een soepeler membraan zou de opnemer gevoeliger maken bij een grotere compliantie.

Wanneer we door terugkoppeling het membraan terugsturen, kunnen we de compliantie verkleinen zonder dat dit ten koste gaat van de gevoeligheid. Alle methoden zijn gebaseerd op het uitoefenen van een tegenkracht op het membraan, waardoor het membraan geheel of gedeeltelijk teruggedreven wordt in zijn evenwichtspositie. De tegenkracht is dan een maat voor de te meten druk. Enkele terugkoppelmethoden zijn beschreven in paragraaf III.3.

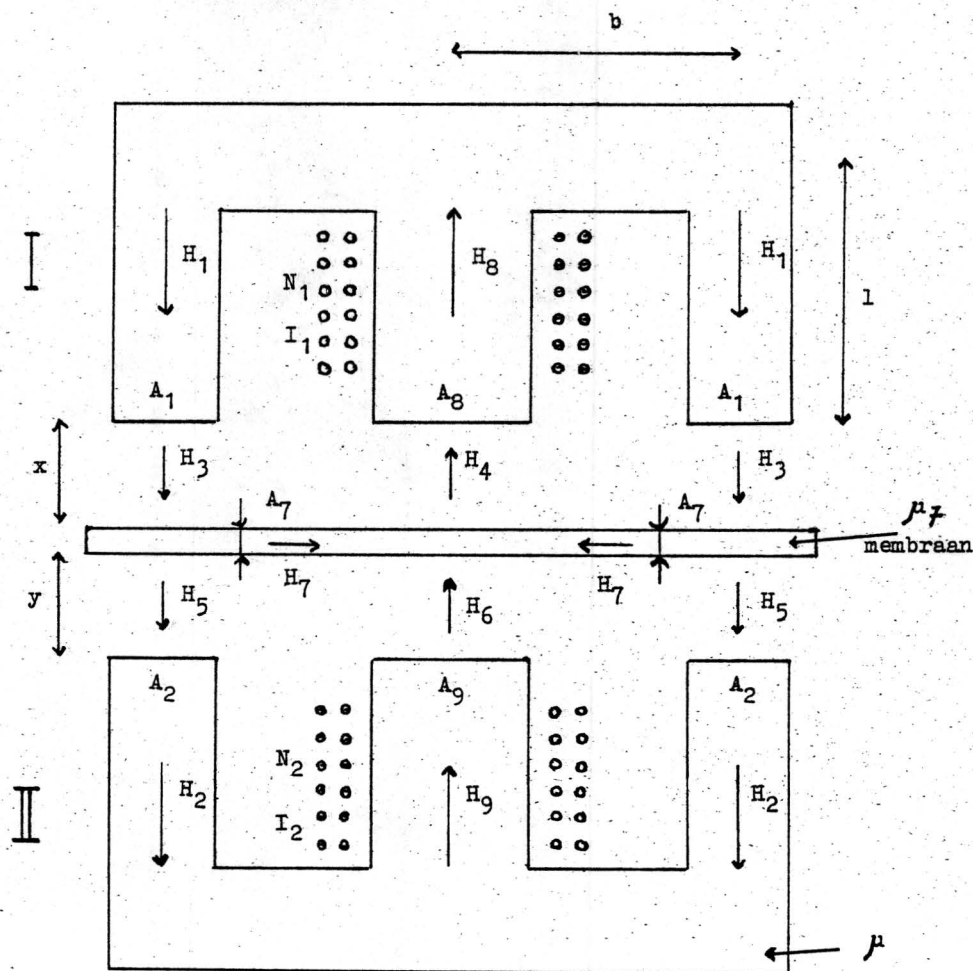
Figuur 4:  
Principe van de  
inductieve drukopnemer



### III.2 Reken model.

Om het samenspel tussen de spoeltjes in de drukopnemer en het membraan te berekenen, maken we gebruik van het model zoals dat is geschetst in figuur 5.

Deze figuur toont een doorsnede door de spoelkernen van de twee drukopnemerhelften. We veronderstellen dat het membraan o.i.v. drukverschil slechts verschuift en dus vlak blijft.  $x$  en  $y$  zijn de afstanden tussen het membraan en de kernen.  $A_8 (=A_9)$  is de oppervlakte van de middenas van de potkern.  $A_1 (=A_2)$  is de oppervlakte van de buitenste ring.  $A_7$  is de oppervlakte van het membraan ter plaatse  $r$ . Dit is een cilinder. Als het membraan een dikte  $n$  heeft, geldt dat  $A_7 = 2 \pi r n$ .  $H_7$  is afhankelijk van  $r$ . De permeabiliteit van het ferroxcube noemen we  $\mu$ , die van het membraan  $\mu_7$ .



**Figuur 5:** Model van de doorsnede door de kernen van de drukopnemer.

Uit de wetten van Gauss en van Ampère vinden we de volgende betrekkingen:

$$H_1 \mu A_1 - H_2 \mu A_2 - H_7 \mu_7 A_7 = 0 \quad (3.1)$$

$$H_7 \mu_7 A_7 - H_8 \mu A_8 + H_9 \mu A_9 = 0 \quad (3.2)$$

$$H_1 \mu - H_3 = 0 \quad (3.3)$$

$$H_4 - H_8 \mu = 0 \quad (3.4)$$

$$H_2 \mu - H_5 = 0 \quad (3.5)$$

$$H_6 \mu - H_9 = 0 \quad (3.6)$$

$$H_1 A_1 - H_8 A_8 = 0 \quad (3.7)$$

$$H_2 A_2 - H_9 A_9 = 0 \quad (3.8)$$

$$H_1 (b + 1) + H_3 x + H_4 x + H_7 b + H_8 l = N_1 I_1 \quad (3.9)$$

$$H_2 (b + 1) + H_5 y + H_6 y - H_7 b + H_9 l = N_2 I_2 \quad (3.10)$$

Om de zelfinductie en de wederkerige inductie te bepalen, laten we  $H_8$  en  $H_9$  in de vergelijkingen staan en verdrijven we de overige onbekenden door substitutie. Tevens voeren we drie nieuwe variabelen in.

$$rx = (x \mu + 1) \left( 1 + \frac{A_8}{A_1} \right) + b \frac{A_8}{A_1} \quad (3.11)$$

$$ry = (y \mu + 1) \left( 1 + \frac{A_8}{A_1} \right) + b \frac{A_8}{A_1} \quad (3.12)$$

$$q = b \frac{A_8 \mu}{A_7 \mu_7} \quad (3.13)$$

De uitdrukkingen worden nu vereenvoudigd tot

$$H_8 (rx + q) - H_9 q = N_1 I_1 \quad (3.14)$$

$$H_9 (ry + q) - H_8 q = N_2 I_2 \quad (3.15)$$

We kunnen nu de magnetische veldsterkte uitdrukken in de stromen  $I_1$  en  $I_2$ .

$$H_8 \left( (rx + q)(ry + q) - q^2 \right) = N_1 I_1 (ry + q) + N_2 I_2 q \quad (3.16)$$

$$H_9 \left( (rx + q)(ry + q) - q^2 \right) = N_1 I_1 q + N_2 I_2 (rx + q) \quad (3.17)$$

De zelfinductie  $L$  en de wederkerige inductie  $M$  volgen hier direct uit.

Voor spoel 1 vinden we voor  $L$  en  $M$  de volgende uitdrukkingen.

$$L_1 = A_8 \mu \mu_0 N_1 \frac{N_1 (ry + q)}{(rx \quad ry + q \quad rx + q \quad ry)} \quad (3.18)$$

$$M_1 = A_8 \mu \mu_0 N_1 \frac{N_2 q}{(rx \quad ry + q \quad rx + q \quad ry)} \quad (3.19)$$

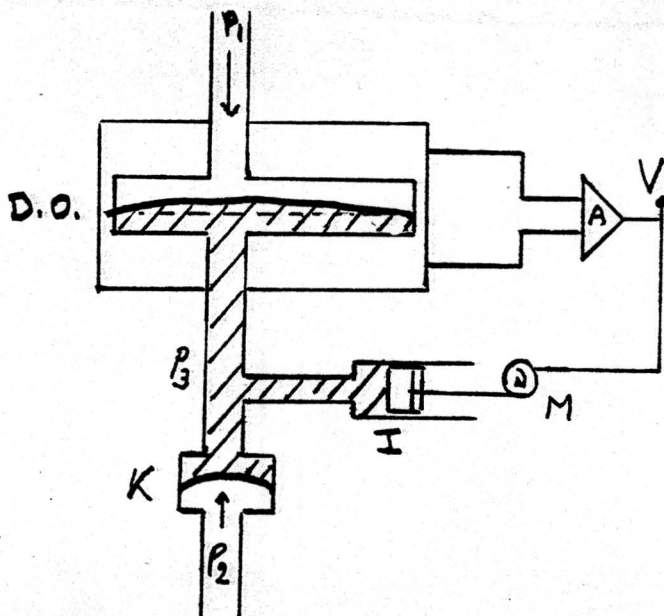
### III.3 Methoden voor terugkoppeling.

We willen enkele principiële mogelijkheden voor terugkoppeling aangeven.

#### 1. Terugkoppeling door hydrostatische tegendruk.

Het principe is geschetst in figuur 6. Zelf hebben we deze methode niet toegepast. Ze wordt nader beschreven in lit.4.

In een kamer K bevindt zich een dun vlies dat zorgt voor overdracht van druk  $p_2$  op  $p_3$ . Ten gevolge van het drukverschil buigt het membraan door. Bij de onderste meetkamer wordt nu een zuiger zo bewogen dat het membraan weer in de evenwichtspositie terug komt. De zuigerbeweging wordt gestuurd door de informatie uit de meetspoeltjes. De meetspanning wordt gebruikt om de motor van de infusor in te schakelen. De stand van de zuiger op dat moment is een maat voor het drukverschil. In de praktijk blijkt de onderste detectiegrens van de drukopnemer  $10^{-3}$  Pa te bedragen. De compliantie is  $8 \cdot 10^{-11}$  m<sup>3</sup>/Pa. Bij een drukverschil van  $10^{-3}$  Pa ontstaat wegens de doorbuiging van het membraan een volumeverandering van  $8 \cdot 10^{-14}$  m<sup>3</sup>. Als de vloeistof in het medium incompressibel is, zou het volume in de infusor eveneens met  $8 \cdot 10^{-14}$  m<sup>3</sup> moeten veranderen. Dit volume is zeer moeilijk te detecteren, waardoor deze methode weinig perspectief biedt.



Figuur 6:

Terugkoppeling door  
hydrostatische tegendruk

## 2. Electromagnetische terugkoppeling.

Bij de electromagnetische terugkoppeling maken we gebruik van inductief opgewekte krachten. Naast de meetstroom kunnen we daartoe extra stromen gebruiken. Die extra stroom kan door het meetspoeltje zelf of door een aparte wikkeling worden gestuurd.

De kracht die we met een opnemerhelpt op het membraan kunnen uitoefenen volgt uit:

$$F = \frac{\partial W}{\partial x} = \frac{\frac{1}{2} \mu_0 H_{\text{lucht}}^2 d (A x)}{x} \quad (3.20)$$

$$F = \frac{1}{2} \mu_0 H_{\text{lucht}}^2 A_{\text{luchtspleet}} \quad (3.21)$$

Stellen we, als ruwe benadering, dat het magnetische veld helemaal geconcentreerd is in de luchtspleet, dan volgt daar uit dat

$$H_{\text{lucht}} = \frac{N I}{2 x} \quad (3.22)$$

Stellen we het aantal windingen  $N = 200$ , en de stroom  $I = 100$  mA. We vinden dan  $F = 0,3$  N. Bij een membraan-oppervlakte van  $10 \text{ cm}^2$  komt dat overeen met een druk  $p = 300$  Pa. We zouden  $300$  Pa kunnen compenseren.

Ter controle van de berekening meten we de kracht die we met de MP 45 op het membraan kunnen uitoefenen. We moeten opmerken dat we het aantal windingen  $N$  niet kennen en dat bovendien niet al het veld in de luchtspleet is geconcentreerd. We vinden bij een spleetafstand van ongeveer  $0,1$  mm en  $I = 100$  mA dat  $F = 0,04$  N. Als  $I = 50$  mA dan meten we  $F = 0,01$  N. De orde van grootte klopt, meer kunnen we niet verwachten omdat we  $N$  niet kennen en erg schematisch gerekend hebben.



### 3. Electrostatistische terugkoppeling.

Hier maken we gebruik van Coulomb-krachten. De manometer wordt aangepast, zodat hij ook als condensatorsysteem kan worden beschouwd. De plaats van de condensatorplaten is geschetst in figuur 7.

De ene condensatorplaat is het membraan. De andere plaat wordt gevormd door het huis van de opnemer. We hebben feitelijk te maken met een combinatie van twee condensatoren.

We kunnen de teruggedrijvende kracht berekenen aan de hand van het model van een vlakke condensator.

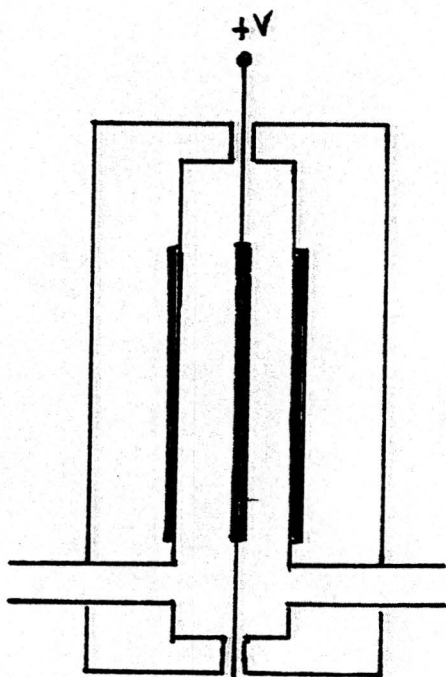
De capaciteit van een vlakke condensator is

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (3.23)$$

Voor de kracht  $F$  volgt nu mits  $V = \text{constant}$  ( $V = \text{de potentiaal}$ )

$$F = \frac{\partial W}{\partial d} = \frac{\partial \frac{1}{2} \frac{\epsilon A}{d} V^2}{\partial d} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon A V^2}{d^2} = \frac{1}{2} C V^2 \quad (3.24)$$

Als  $V = 500$  Volt en  $d = 10^{-4}$  m, dan geldt  $F = 0,04$  N. Bij  $A = 10 \text{ cm}^2$  vinden we zo voor  $p = 40$  Pa.



Figuur 7:

Condensatorsysteem in de drukopnemer. De vette lijnen geven de platen weer.

#### IV. Meetmethode en inleidende metingen.

##### IV.1 Metingen met de vector-impedantiemeter.

We gaan de in de theorie afgeleide formules toetsen aan de metingen met een vector-impedantiemeter en bepalen hieruit enkele grootheden.

1. Met het membraan in evenwicht ( $x = y = x_0 = 10^{-4}$  m) zijn L en M gemeten.

$$\begin{array}{ll} L_1 = 19,1 \text{ mH} & M_1 = 6,6 \text{ mH} \\ L_2 = 21,2 \text{ mH} & M_2 = 6,6 \text{ mH} \end{array}$$

De beide drukopnemerhelften zijn identiek, dus  $N_1 = N_2 = N$ . Er is een verschil tussen  $L_1$  en  $L_2$  wanneer het membraan in de evenwichtspositie niet exact in het midden staat.

Substitutie van  $L = 20,2$  mH en  $M = 6,6$  mH in vergelijking 2.18 en 2.19 geeft

$$r = rx = ry = 37,4 \text{ k} \quad \text{met } k = A_8 \mu \mu_0 N^2$$

$$q = 18,3 \text{ k.}$$

Deze waarden zullen we verder voor r en q gebruiken.

2. Bij metingen aan een helft van de drukopnemer moeten de vergelijkingen worden aangepast. De ene spoel "ziet" de andere niet meer.  $ry$  wordt oneindig groot. De zelfinductie wordt dan beschreven door

$$L = \frac{k}{rx + q} \tag{4.1}$$

We kunnen L berekenen door de zoëven gevonden waarden voor rx en q in te vullen. Dit geeft  $L = 18$  mH.

Metingen met de V.I.M. waarbij we L bepalen als functie van de breedte van de luchtspleet, leveren ons als waarde voor  $L = 17$  mH, bij  $x = x_0 = 10^{-4}$  m. Dit stemt overeen met de theorie.

3. In grafiek 1 is  $\frac{1}{L}$  uitgezet tegen  $x$ , zoals dat werd gemeten. Hier zouden we een rechte lijn verwachten. Doordat bij grotere  $x$ -waarden ook veldlijnen door de lucht oversteken, ontstaat een afwijking. Uit de grafiek kan  $\frac{dL}{dx}$  eenvoudig worden bepaald (voor  $x = x_0$ ).

$$\frac{dL}{dx} = - 12,3 \text{ H/m.}$$

Uit de theorie kan met  $L = \frac{k}{rx+q}$  eveneens een uitdrukking voor  $\frac{dL}{dx}$  gevonden worden, met vgl. (3.11) krijgen we

$$\frac{dL}{dx} = \frac{dL}{dr} \frac{dr}{dx} = - k \mu \left( 1 + \frac{A_8}{A_1} \right) \frac{1}{(r+q)^2} \quad (4.2)$$

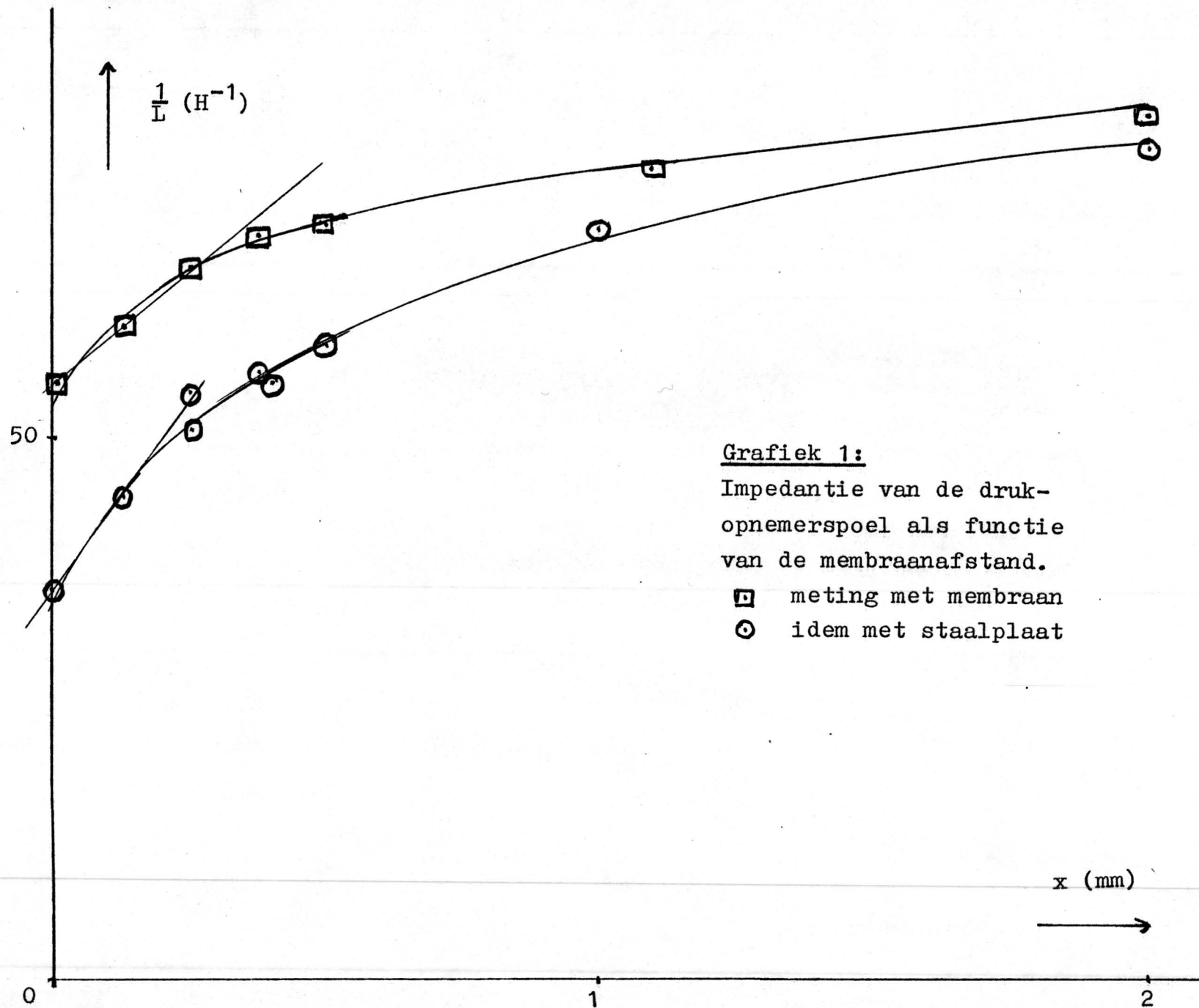
Stellen we de gemeten waarde gelijk aan deze uitdrukking dan vinden we

$$\mu \left( 1 + \frac{A_8}{A_1} \right) = 3,8 \cdot 10^4 k$$

4. We meten de impedantie van een helft van de drukopnemer als die wordt afgesloten met een dikkere roestvrij stalen plaat ( 0,5 mm ) en een luchtspleet ter grootte  $x_0$ .  $A_7$  wordt nu groter, zodat we  $q$  kunnen verwaarlozen in vgl (4.1)

$$L = \frac{k}{r} = 27 \text{ mH.} \quad (4.3)$$

We meten in deze situatie  $L = 28 \text{ mH.}$



Grafiek 1:

Impedantie van de druk-  
opnemerspoeel als functie  
van de membraanafstand.

- ▣ meting met membraan
- idem met staalplaat

Uit deze metingen zijn dus de volgende verbanden tussen grootheden bepaald:

$$q = b \frac{A_8}{A_7} \frac{\mu}{\mu_7} = 18,3 k \quad \text{met } k = A_8 \mu \mu_0 N^2$$

$$r = (x_0 \mu + 1) \left( 1 + \frac{A_8}{A_1} \right) + b \frac{A_8}{A_1} = 37,4 k$$

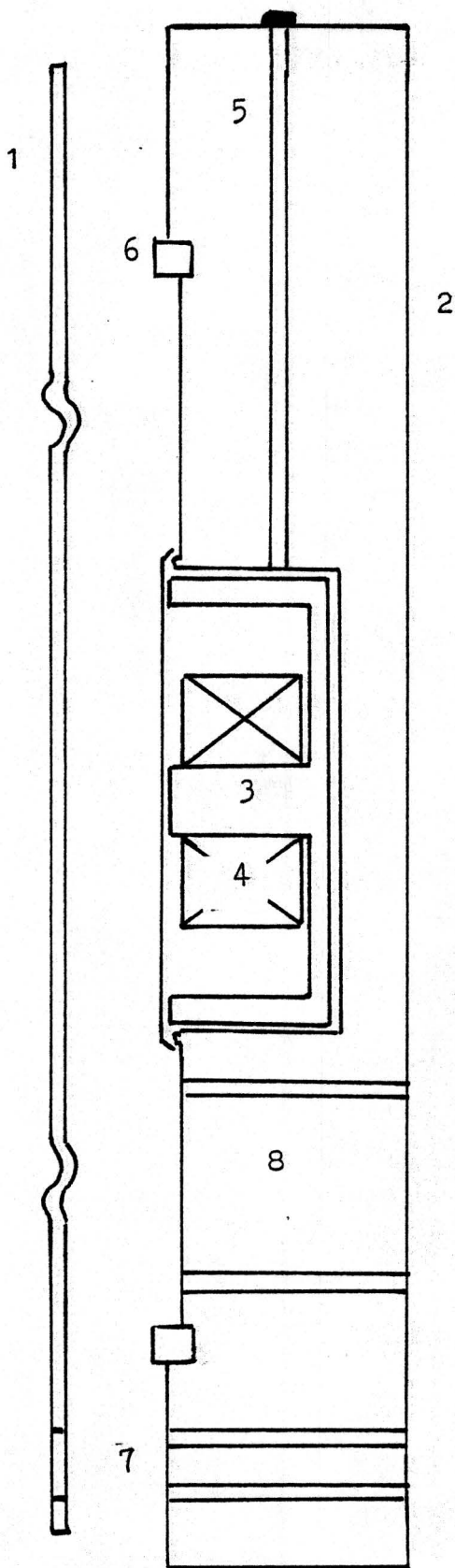
$$\mu \left( 1 + \frac{A_8}{A_1} \right) = 3,8 \cdot 10^4 k$$

#### IV.2 Constructie eigen drukopnemer.

Met de MP 45 - manometer is inductieve terugkoppeling moeilijk te verwezenlijken. De beide spoeltjes zijn immers gelijk en er zijn geen extra wikkelingen beschikbaar. Daarom is er in de afdelingswerkplaats een drukopnemer gebouwd, die wel mogelijkheden biedt om terug te koppelen. Overigens is deze opnemer waar mogelijk identiek aan de MP 45, zodat de originele toebehoren kunnen worden gebruikt. Het magnetisch systeem is opgebouwd uit een potkern P 14/8 van 3H3 ferroxcube met daarop 5 gescheiden wikkelingen. Dat zijn 3 wikkelingen van 80  $\mu$  koperdraad en respectievelijk 150, 100 en 50 windingen. Tevens 2 wikkelingen van koperdraad 50  $\mu$  dik en elk 100 windingen. De opbouw van het huis van de opnemer is geschetst in figuur 8.

Bij deze manometer kunnen we zelf kiezen welke wikkelingen we gebruiken om te meten of om te sturen.

Zie ook figuur 9. Ter illustratie van de opbouw van de drukopnemer de foto's 2 en 3.



Figuur 8:

Schematische doorsnede van drukopnemer.

1 = membraan. 2 = huis.

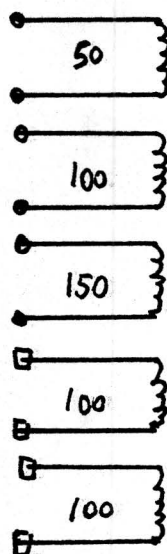
3 = kern. 4 = spoel.

5 = draaddoorvoer.

6 = dichtingsring,

7 = schroefgat.

8 = gasaansluiting.



Figuur 9:

Wikkelingen op elke kern van eigen drukopnemer.

□ 50  $\mu$  draaddikte  
 ○ 80  $\mu$  draaddikte



Foto's 2 en 3 : De eigen drukopnemer, onderdelen en losse spoeltjes. De aansluitingen van de spoeltjes.

### IV.3 Meetmethode.

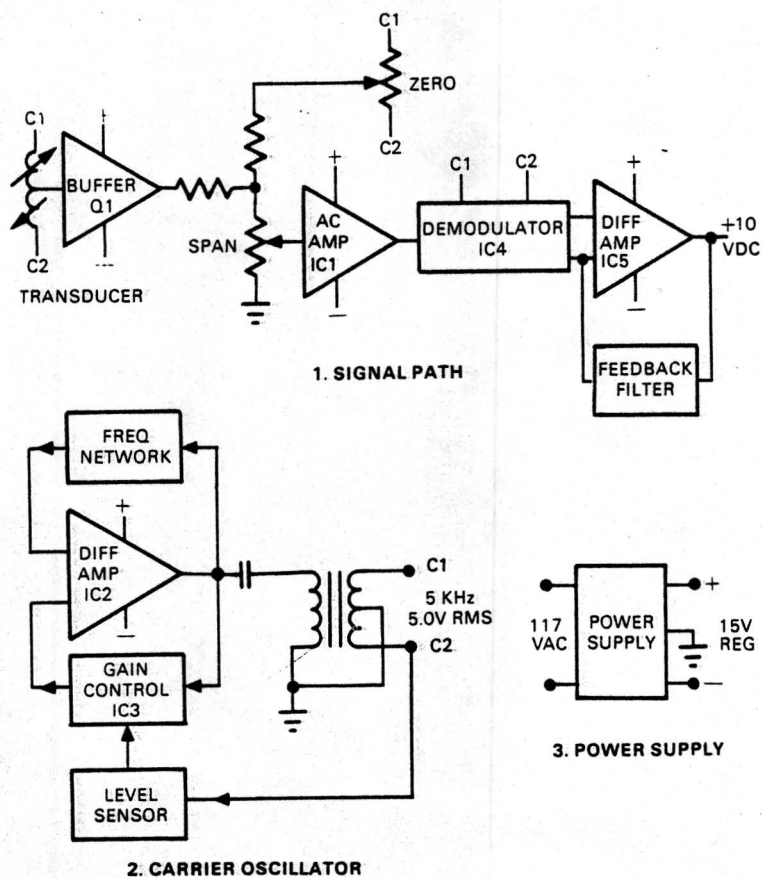
De impedantie-verandering van de meetspoeltjes wordt gemeten als een spannings-variatie.

In figuur 10 is de originele meetbrug ( Validyne CD 101) schematisch weergegeven. (Litt 5 )

Bij de experimenten is gebruik gemaakt van twee meetbruggen. Eén brug is speciaal gebouwd voor het asymmetrische spoelsysteem zoals dat wordt gebruikt by hoofdstuk V . Zie figuur 12.

Het nadeel van deze schakeling is dat de brug ingeregeld wordt door zowel condensatoren als weerstanden te variëren.

Voor de symmetrische meetspoeltjes is er een praktischere meetbrug gebouwd met een balanstransformator. Figuur 11 geeft het schema van deze schakeling.



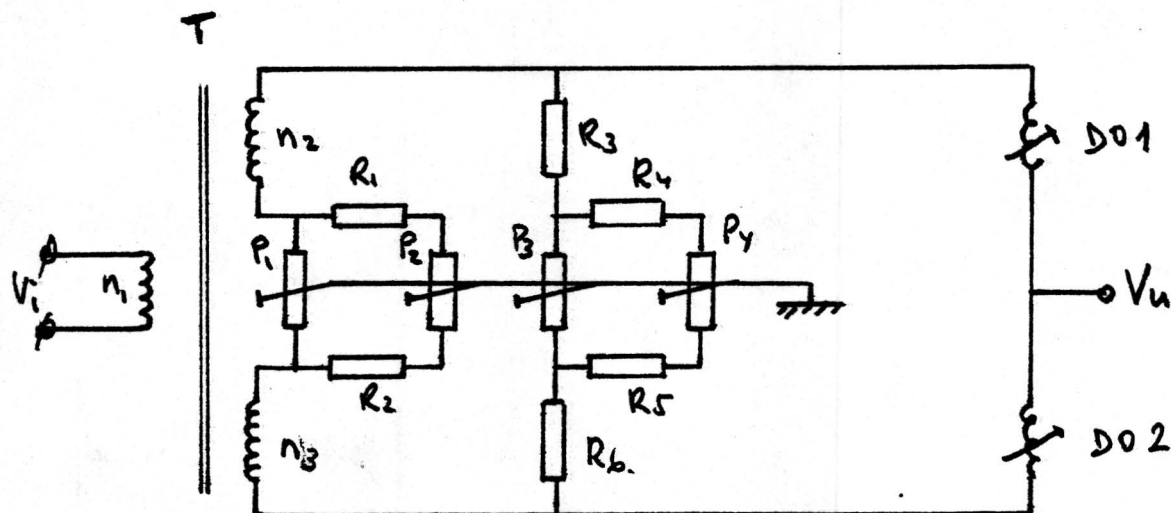
Figuur 10: Blokschema van de oscillator/meetbrug zoals die door Validyne wordt toegepast.



Het uitgangssignaal, dat vaak veel harmonischen bevat, wordt gemeten met een wave-analyzer of met een fase-gevoelige versterker ( lock-in amplifier ). De wave-analyzer geeft de amplitude van  $V_u$ , de lock-in amplifier geeft de amplitude onder een bepaalde fase-hoek  $\phi$ . De brug wordt gevoed met een wisselspanning van  $2 V_{p-p}$  en een frequentie van 5 kHz.

Grafiek 2 geeft het verband tussen het uitgangssignaal  $V_u$  van de brug (gemeten met een lock-in amplifier) en het drukverschil tussen de meetkamers. Dit drukverschil werd gemeten met een tweede manometer.

Uit de helling van deze lijn ( $9 \cdot 10^{-4} \text{ V/Torr}$ ) en het ruis-signaal ( $0,1 \text{ uV}$ ) kunnen we de onderste meetgrens van de drukopnemer bepalen. Deze bedraagt ongeveer  $10^{-4} \text{ Torr}$ .



Figuur 11: Schema van de meetbrug.

T = balanstrafo met primair 150 en secundair 2 x 200 windingen.

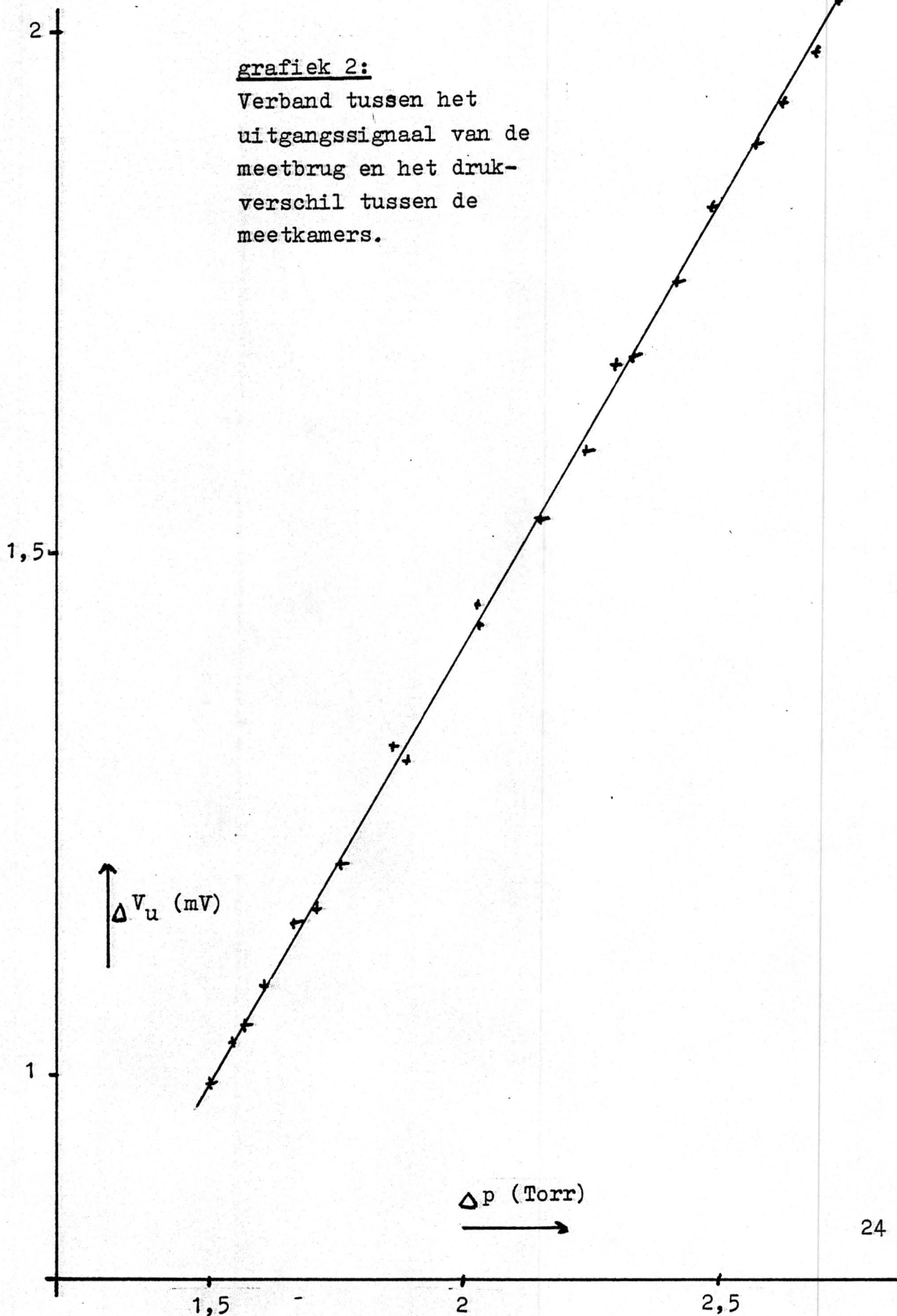
Potmeters  $P_1, P_3 = 5 \text{ k}$  .  $P_2, P_4 = 100$  .

$R_1 = R_2 = 10 \text{ k}$  .  $R_3 \text{ t/m } R_6 = 4,7 \text{ k}$  .

DO1 en DO2 zijn de beide drukopnemerhelften.

grafiek 2:

Verband tussen het  
uitgangssignaal van de  
meetbrug en het druk-  
verschil tussen de  
meetkamers.



## V. Inductieve terugkoppeling ( via meetstroom ).

Kenmerkend voor deze opnemer is dat we de zelfde wikkeling van het spoeltje in de drukopnemer gebruiken om te meten en om de membraan-positie te sturen. We regelen door de voedingsspanning van de meetbrug te variëren.

### V.1 Vervangingsschema.

Bij de conventionele drukopnemer zijn de inductieve krachten die op het membraan werken in evenwicht. Beide spoeltjes trekken het membraan even sterk aan. Bij inductieve terugkoppeling zijn er een aantal mogelijkheden om dat evenwicht te verbreken.

1. Als de stromen door de beide spoeltjes ongelijk zijn, is er een resulterende kracht. Daartoe kan de stroom door een spoel worden verkleind of een gelijkspanning op de wisselspanning worden gesuperponeerd.
2. Als de  $\frac{dI}{dx}$  - waarden verschillen krijgen we een resulterende kracht bij gelijke stromen. Hier kan men denken aan een verschil in zelfinductie of aan een verschil in de afstanden tussen het membraan en de spoeltjes.

Het electrisch vervangingsschema van een spoeltje bestaat uit de serie-schakeling van een weerstand en een zelfinductie. De impedantie is afhankelijk van de breedte van de luchtspleet. Met de complexe rekenwijze kunnen we het gedrag beschrijven, mits we alle parameters kennen.

De uitwijking van het membraan noemen we weer  $x$ . Als  $F$  gelijk is aan de totale kracht die op het membraan werkt en  $A$  en  $B$  respectievelijk de oppervlakte en de compliantie zijn dan geldt de volgende betrekking

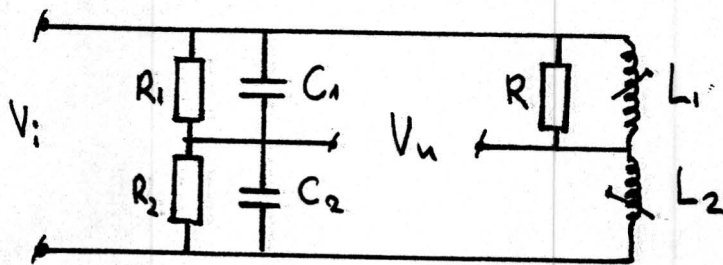
$$x = \frac{B F}{A^2} \tag{5.1}$$

Immers de definitie van  $B$  luidt  $B = \frac{dV}{dp}$  en  $dV = A dx$ . De totale kracht op het membraan kunnen we opgebouwd denken uit 3 componenten. Dit zijn de uitwendige kracht ten gevolge van het drukverschil, en de inductie-krachten van de beide spoeltjes.

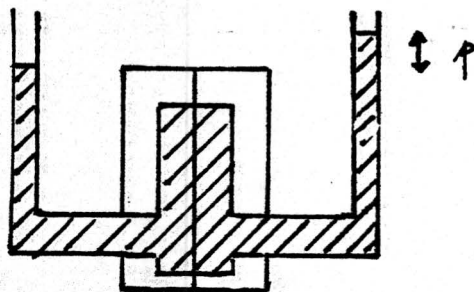
## V.2 Schakeling met gelijke spoeltjes en ongelijke stromen.

We schakelen de MP 45 drukopnemer zoals getekend is in figuur 12. Van terugkoppeling is nog geen sprake. We regelen  $V_i$  met de hand. De stroom door  $L_1$  is ongeveer half zo groot als de stroom door  $L_2$ . We kunnen nu, ondanks de identieke spoeltjes, een electromagnetische kracht op het membraan uitoefenen. De grootte van de kracht is een functie van  $V_i$ . We willen graag weten hoe  $V_u$  afhangt van  $V_i$  en van de uitwendige druk  $p$ . Daartoe verbinden we de drukopnemer met twee waterkolommen. (Zie figuur 13). De druk is dus het niveausverschil tussen die twee waterkolommen. De drukstappen die we straks nodig hebben, maken we door steeds een druppel water aan een kolom toe te voegen. Dit komt in de praktijk overeen met 0,18 Pa.

Figuur 12: Schema van de meetbrug. Met  $R_1, R_2, C_1$  en  $C_2$  wordt de brug ingeregeld.  $R = 750$  ohm.



Figuur 13: De manometer aangesloten op twee waterkolommen.



Nadat de meetbrug ingeregeld is kunnen we  $\hat{V}_u$ , de amplitude van  $V_u$  meten met een wave-analyzer. De meting loopt als volgt: Bij een bepaalde druk wordt de brugspanning  $V_i$  gevarieerd. We meten dan curve 1. Daarna wordt de druk met  $dp$  verhoogd tot  $p + dp$ . We variëren nu opnieuw  $V_i$  en meten zo curve 2. Volgens dit principe zijn er 36 curves gemeten. Het rangnummer van de curve is een maat voor het drukverschil. Tussen twee opvolgende curves bedraagt dat verschil dus 0,18 Pa.

Een aantal op deze wijze gemeten curves is geschetst in grafiek

3. Omdat  $V_u$  ook direct afhangt van  $V_i$  in in grafiek 4  $V_u/V_i$  uitgezet tegen  $V_i$ . In eerste benadering zijn het hyperbolen. Het valt op dat de minima van de hyperbolen verschuiven ( Zie grafiek 5.) en dat de dalen opgetild worden. In eerste instantie zouden we dat optillen niet verwachten. Een verklaring zou kunnen zijn dat de impedantie van de drukopnemer-spoeltjes niet alleen afhankelijk is van de membraan-positie, maar ook van de voedingsspanning van de brug (niet lineariteit).

### V.3 Interpretatie.

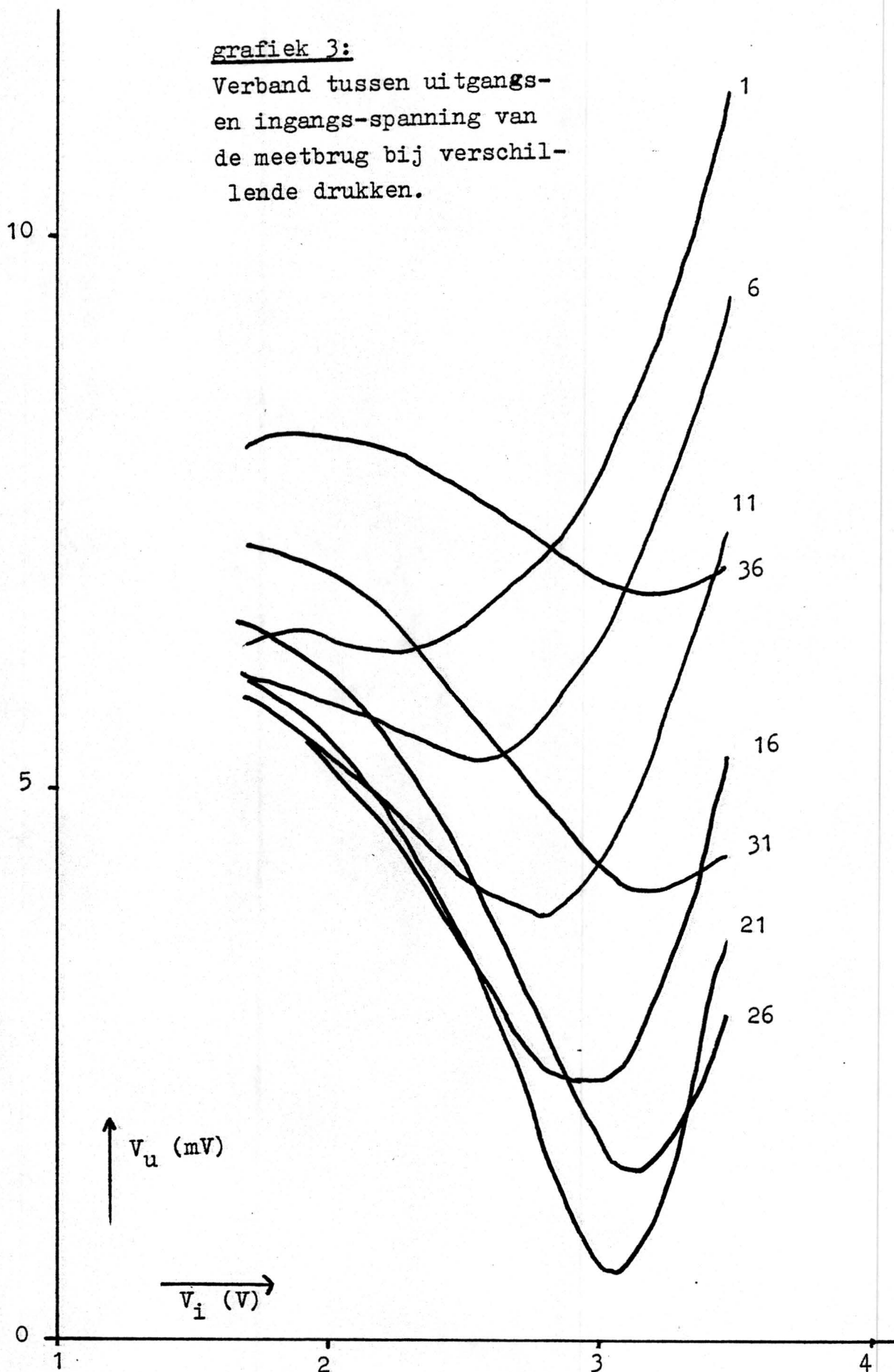
De interpretatie van deze metingen is vrij complex. Omdat we de resultaten ervan voor de uiteindelijke terugkoppeling niet gebruiken, volstaan we hier met enkele vergelijkingen van de eerste orde benadering. We bekijken daarbij twee situaties:

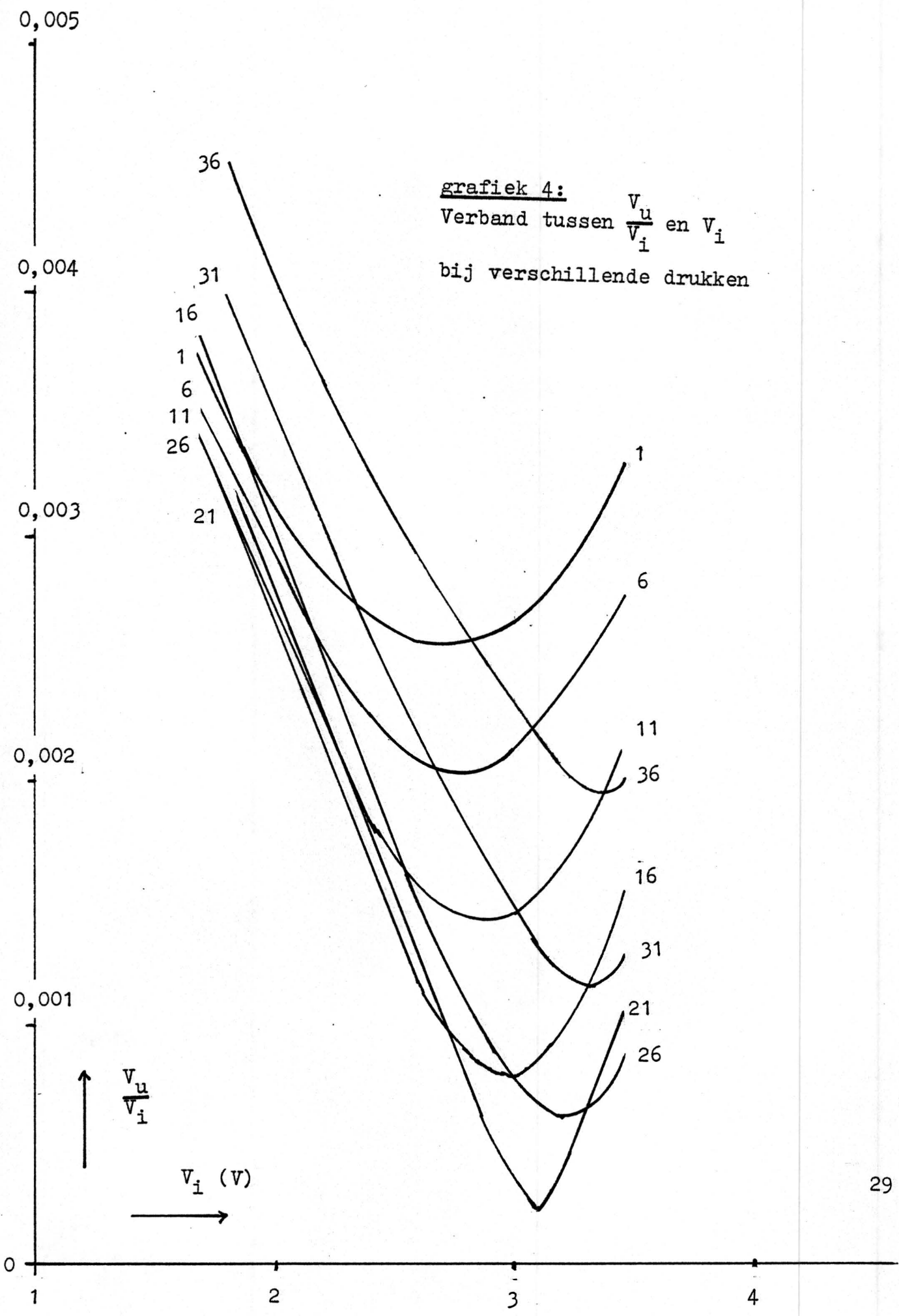
1. We gaan uit van de complexe spanningen. Deze vormen namelijk de grondslag voor het model waarin we de amplitudes met elkaar vergelijken. De complexe spanningen kunnen we meten met een fase-gevoelige versterker.

2. We rekenen alleen met  $\hat{V}_u$  en  $\hat{V}_i$ , de amplitude van  $V_u$  en  $V_i$ .

grafiek 3:

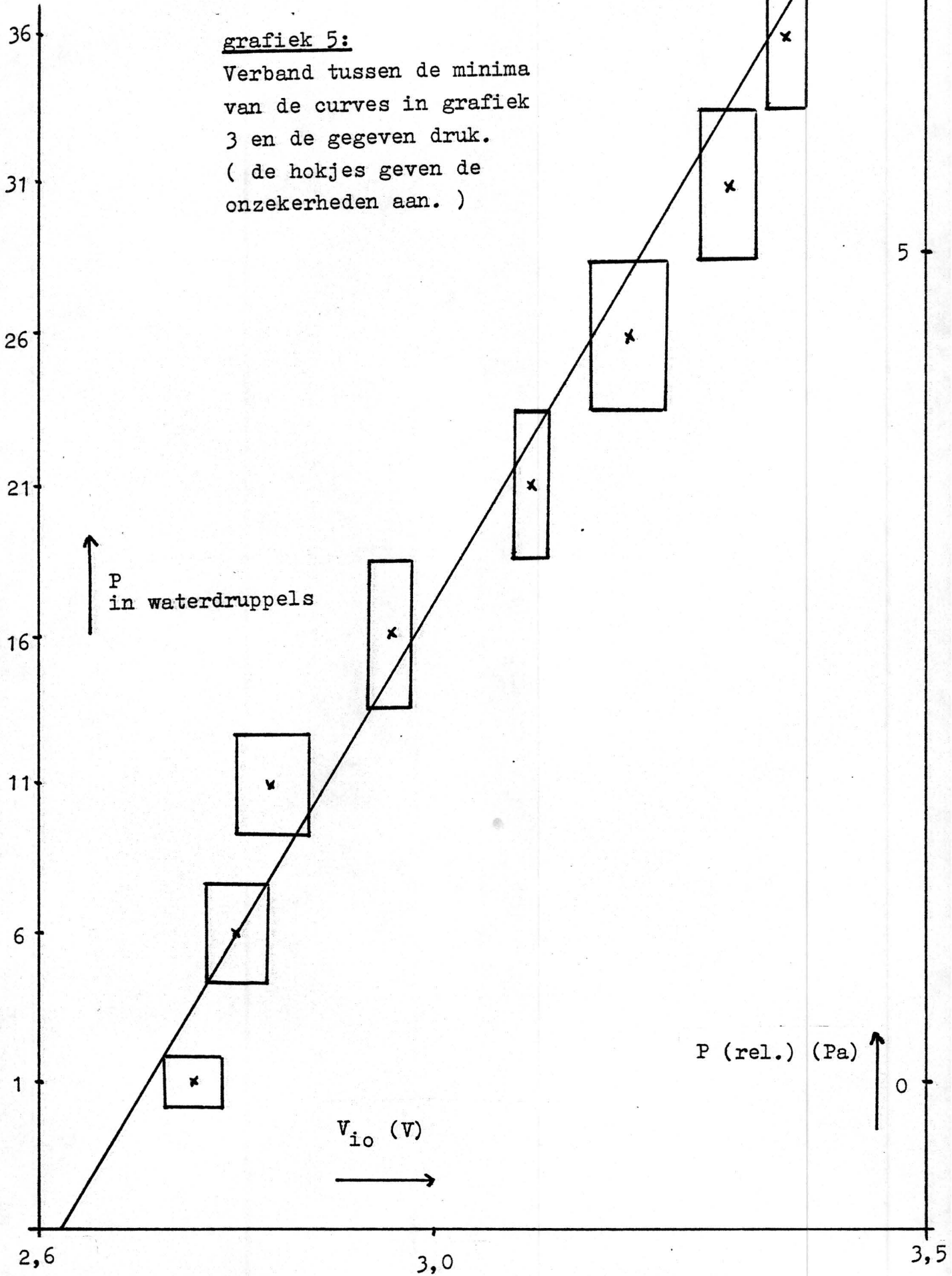
Verband tussen uitgangs-  
en ingangspanning van  
de meetbrug bij verschil-  
lende drukken.





grafiek 5:

Verband tussen de minima  
van de curves in grafiek  
3 en de gegeven druk.  
( de hokjes geven de  
onzekerheden aan. )





### V.3.1 Amplitude.

Omdat we slechts de amplitude van  $V_u$  en  $V_i$  hebben gemeten, beginnen we met het volgende model.

Als we de assen van deingangsspanning  $V_i$  en de druk  $p$ , verschuiven kunnen we de vergelijkingen eenvoudiger weer-geven. Om aan te geven dat we getransformeerd hebben gebruiken we accenten:  $V_i'$  en  $p'$ .

1. Bij één bepaalde druk  $p$  proberen we de metingen zoals die zijn weergegeven in grafiek 3 te beschrijven met

$$\hat{V}_u^2 = a (\hat{V}_i' - c p')^2 + d^2 p'^2 \quad (5.2)$$

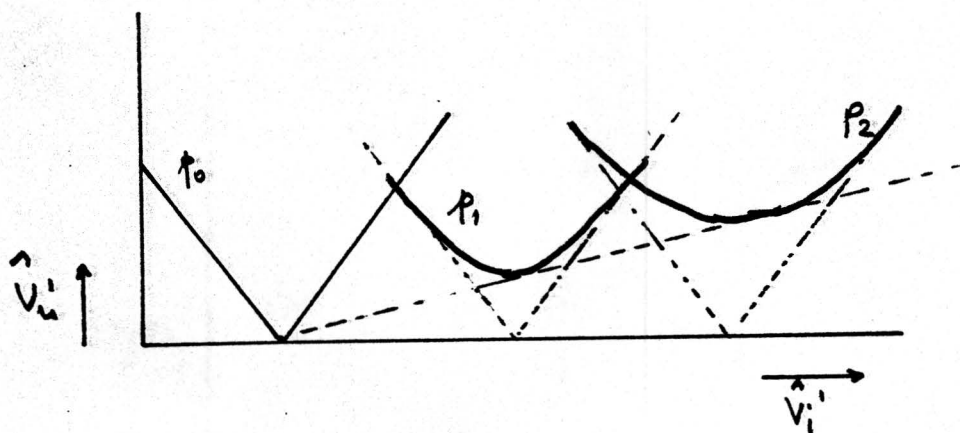
Dit zijn hyperbolen met asymptoten

$$\hat{V}_u = \pm \sqrt{a} (\hat{V}_i' - c p') \quad (5.3)$$

2. Bij willekeurige druk geldt

$$\hat{V}_u^2 = P \hat{V}_i'^2 + Q \hat{V}_i' p' + R p'^2 \quad (5.4)$$

Schematisch is het verloop voor 3 waarden van de druk in het  $\hat{V}_u - \hat{V}_i'$  - vlak geschetst in figuur 14.



Figuur 14: Verband tussen  $\hat{V}_u$  en  $\hat{V}_i'$

voor drie waarden van de druk  $p$ .

Als we een coördinatenstelsel met als assen  $\hat{V}_i$ ,  $p$  en  $\hat{V}_u$  beschouwen, vormen de metingen in deze drie-dimensionale ruimte volgens deze beschrijving een kegelooppervlak om de  $\hat{V}_u$  - as. De vergelijking van deze kegel luidt:

$$\hat{V}_u^2 = 81 (\hat{V}_i - 3,09)^2 - 4,15 (\hat{V}_i - 3,09)(p - 22,5) + 0,17 (p - 22,5)^2 \quad (5.5)$$

Hierin is  $\hat{V}_u$  uitgedrukt in millivolt,  $\hat{V}_i$  in Volt en de druk  $p$  in waterdruppels (= nummer van de meetserie.) In grafiek 6 staat de functie voor enkele waarden van  $p$  getekend. De voorwaarde dat de membraan-uitwijking  $x=0$  is, levert ons ook een vergelijking

$$x = a p + b \hat{V}_i + c = 0 \quad (5.6)$$

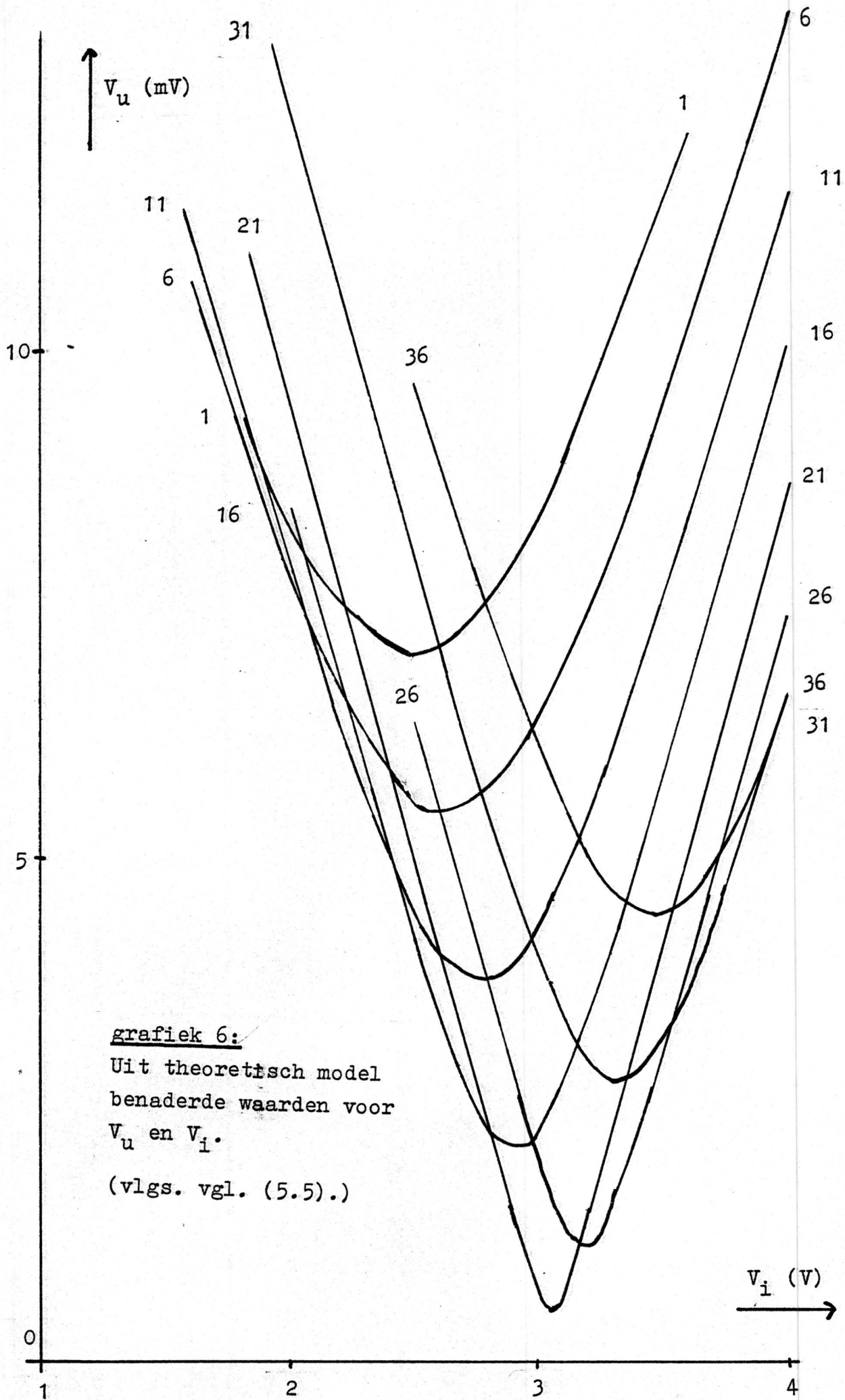
Deze vergelijking wordt voorgesteld door een plat vlak in de  $\hat{V}_i$ ,  $p$ ,  $\hat{V}_u$  -ruimte. De snijding van dit vlak met de kegel levert ons de voorwaarde voor terugkoppeling.

In de praktijk wordt de situatie weer iets simpeler als we transformeren, zò dat de top van de kegel in de oorsprong komt en het platte vlak van verg.(5.6) door de oorsprong gaat. De snijlijnen blijken rechten te zijn. Als voorwaarde voor terugkoppeling is dit echter zo ingewikkeld dat andere methoden zijn geprobeerd.

### V.3.2 Complexe spanningen.

Kijken we ook naar de complexe spanningen bij overigens de zelfde schakeling dan blijkt dat nieuwe mogelijkheden te geven. Het zelfde model waar al de voorgaande vergelijkingen uit zijn afgeleid geeft ons de relatie

$$\frac{V_u}{V_i} = C (a p' + b \hat{V}_i') + C' \hat{V}_i' \quad (5.7)$$



grafiek 6:

Uit theoretisch model  
benaderde waarden voor  
 $V_u$  en  $V_i$ .

(vlgs. vgl. (5.5).)

Hierin is  $p'$  en  $\hat{V}_i$  respectievelijk het drukverschil en het spanningsverschil ten opzichte van de evenwichtswaarde, waarbij de brug is ingeregeld.  $C$  en  $C'$  zijn complexe constanten,  $a$  en  $b$  zijn reële constanten.

We kunnen weer voor de membraan-uitwijking invullen

$$x = a p' + b \hat{V}_i \quad (5.6)$$

daarmee wordt

$$\frac{V_u}{V_i} = C x + C' \hat{V}_i \quad (5.8)$$

Volgens deze beschouwing is er ook een ander meetprincipe mogelijk.

Als immers geldt dat

$$\arg \left( \frac{V_u}{V_i} \right) = \arg ( C' ) \text{ dan is } x = 0. \quad (5.9)$$

We zouden dus de brugvoedingsspanning zo moeten regelen dat aan deze voorwaarde is voldaan, d.w.z. zo regelen dat de fasehoek tussen  $V_u$  en  $V_i$  constant blijft en wel gelijk aan  $\arg ( C' )$ .

Uit verg (5.6) kunnen we dan  $p$  berekenen als  $V_i$  gemeten is.

$$\begin{aligned} x &= a p' + b \hat{V}_i = 0 \\ p' &= - \frac{b}{a} \hat{V}_i \end{aligned} \quad (5.10)$$

Om zo te kunnen meten moet voldaan zijn aan twee extra voorwaarden.

1. De verhouding van  $C$  en  $C'$  moet gunstig zijn, zowel qua modulus als argument. Als  $C$  en  $C'$  het zelfde argument hebben kunnen we niet meten.

2. Een faseverschil-meter werkt alleen als  $V_u$  groot genoeg is, anders hebben we te veel storing van boventonen, waardoor de oorspronkelijke puls-vorm moeilijk te herkennen is.

Wanneer we er in slagen de fasehoek goed te meten met een lock-in amplifier (LIA) of met een faseverschil-meter dan kunnen we deze methode toepassen. Bij elke drukopnemer moet dan wel  $C'$  worden bepaald. Gezien de veel eenvoudigere resultaten die bij capacitieve terugkoppeling mogelijk blijken te zijn, zullen we de verdere beschrijving van de experimenten in dit kader achterwege laten.

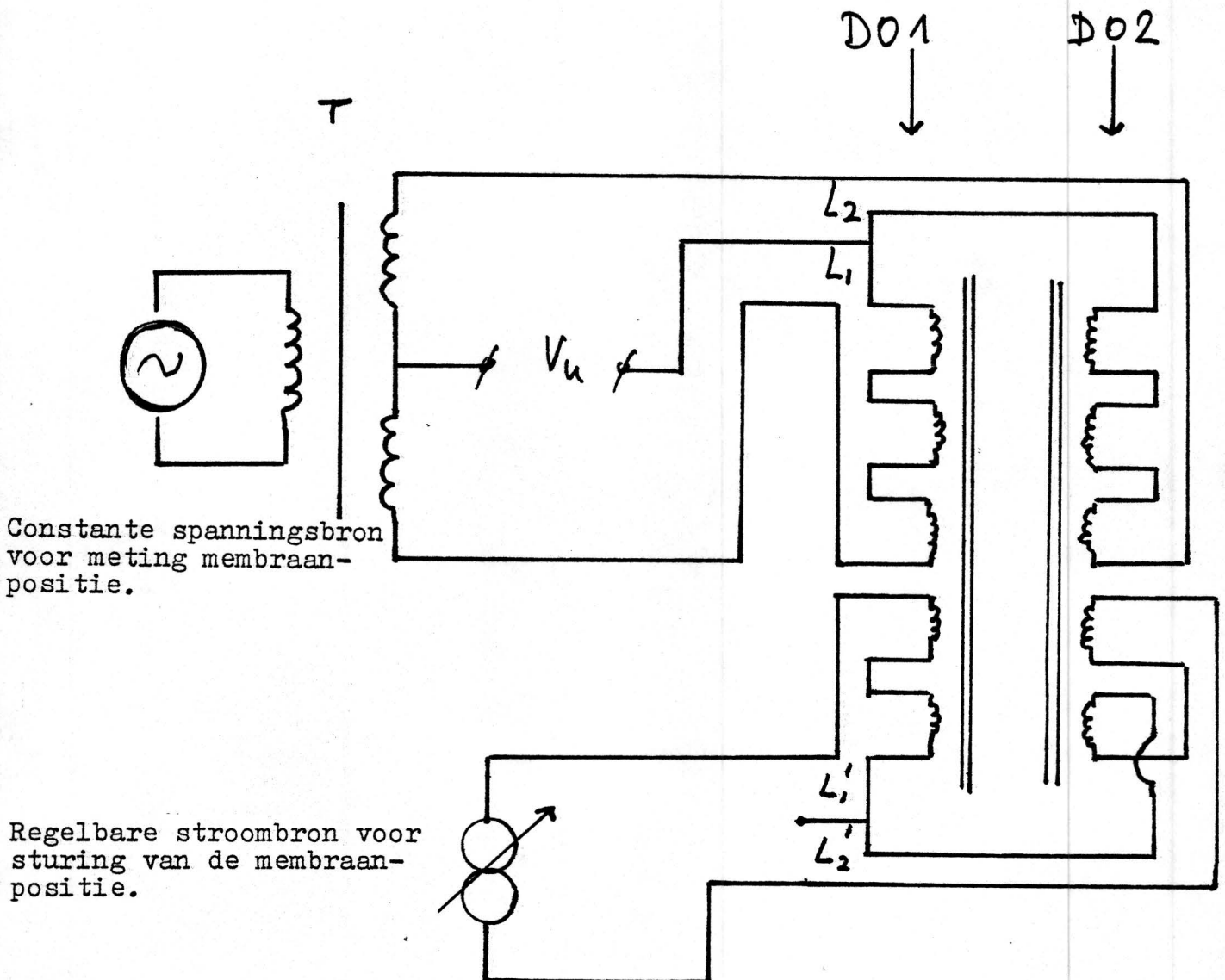
#### V.4 Schakeling met ongelijke spoeltjes en gelijke stromen.

Er is een drukopnemer gebouwd met ongelijke spoelen. De bijbehorende meetbrug is iets eenvoudiger. De impedanties van de spoelen zijn nu verschillend en de stromen gelijk. Hieraan is met een LIA gemeten. De schakeling gedraagt zich in principe gelijk aan de voorgaande schakeling. De resultaten zijn niet volledig geanalyseerd.

VI. Inductieve terugkoppeling ( via gescheiden stroom ).

Kenmerkend voor deze drukopnemer is dat er gescheiden wikkelingen gebruikt worden voor de meetstroom en voor de stroom waarmee we de membraan-positie regelen.

In principe werken we met een schakeling zoals die is geschetst in figuur 15.



Constante spanningsbron voor meting membraan-positie.

Regelbare stroombron voor sturing van de membraan-positie.

Figuur 15: Schakeling van het meetsysteem.

Omdat de twee meetspoeltjes  $L_1$  en  $L_2$  gelijk zijn ( 300 windingen ), kunnen we de Wheatstone-brug bouwen met een balans-transformator. In de figuur zijn de potmeters waarmee de brug wordt ingeregeld niet getekend.

De spannings-afhankelijkheid van de impedantie van de meetspoeltjes speelt nu geen rol meer omdat de voedingsspanning van de brug constant is.

We kunnen een kracht op het membraan uitoefenen door stroom te sturen door de wikkelingen  $L_1^!$  en  $L_2^!$ . Doordat zowel  $L_1^!$  als  $L_2^!$  beide 2 x 100 windingen hebben, is de warmte-ontwikkeling t.g.v. de stuurstroom aan beide zijden gelijk. Bij  $L_2^!$  zijn de twee wikkelingen tegen elkaar in geschakeld, waardoor het netto aantal windingen 0 is en  $L_2^!$  dus geen zelfinductie heeft. We meten de kracht die we met de stuurstroom opwekken met een tweede manometer. Deze manometer is geijkt en heeft een beduidend kleinere compliantie. De manometers worden aan een zijde met elkaar verbonden en meten beide tegen buitenlucht. Zie figuur 16.

In grafiek 7 is de drukverandering op de tweede manometer uitgezet tegen de grootte van de stuurstroom.

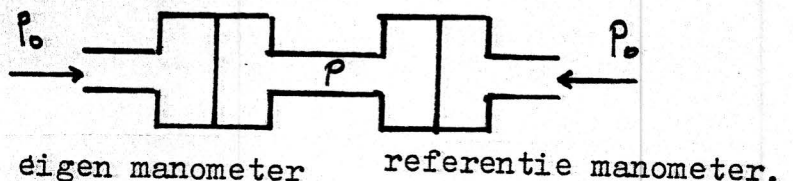
We kunnen dus 1 Pa druk opwekken door 7 mA door de spoeltjes te sturen.

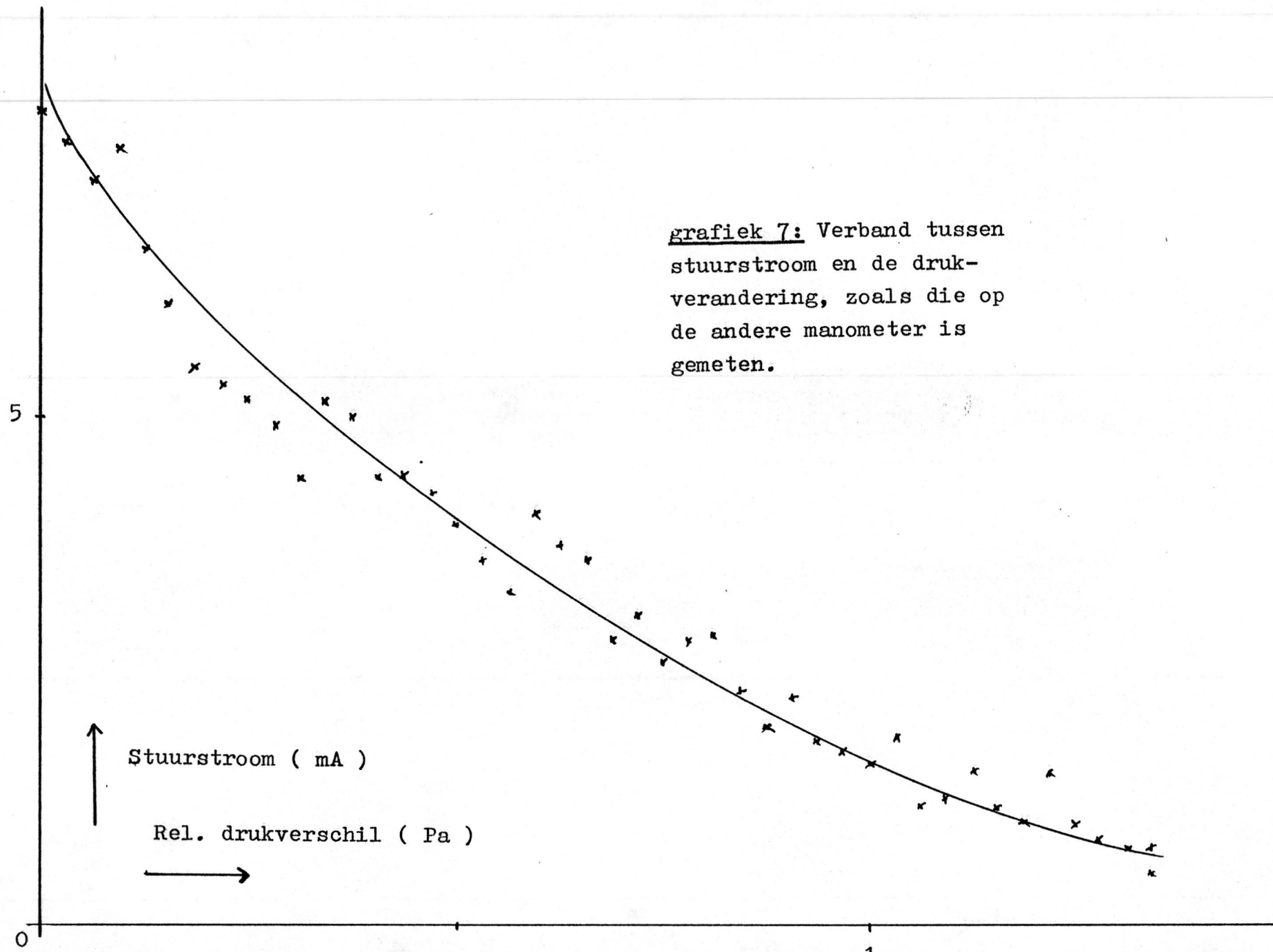
Bij terugkoppeling wordt er een verbinding gelegd tussen het meetsysteem en het stuursysteem. Het principe is gelijk aan de schakeling zoals die in het volgende hoofdstuk wordt beschreven.

Ook deze metingen zijn niet nader geanalyseerd omdat de capacitieve terugkoppeling betere perspectieven biedt. Een nadeel van deze inductieve sturing is het feit dat er geen garantie is dat het meetsysteem niet rechtstreeks beïnvloed wordt door de stuurstroom. Bij de capacitieve terugkoppeling is zo'n beïnvloeding veel onwaarschijnlijker.

figuur 16:

Verbinding tussen twee manometers.







## V.II Capacitieve terugkoppeling.

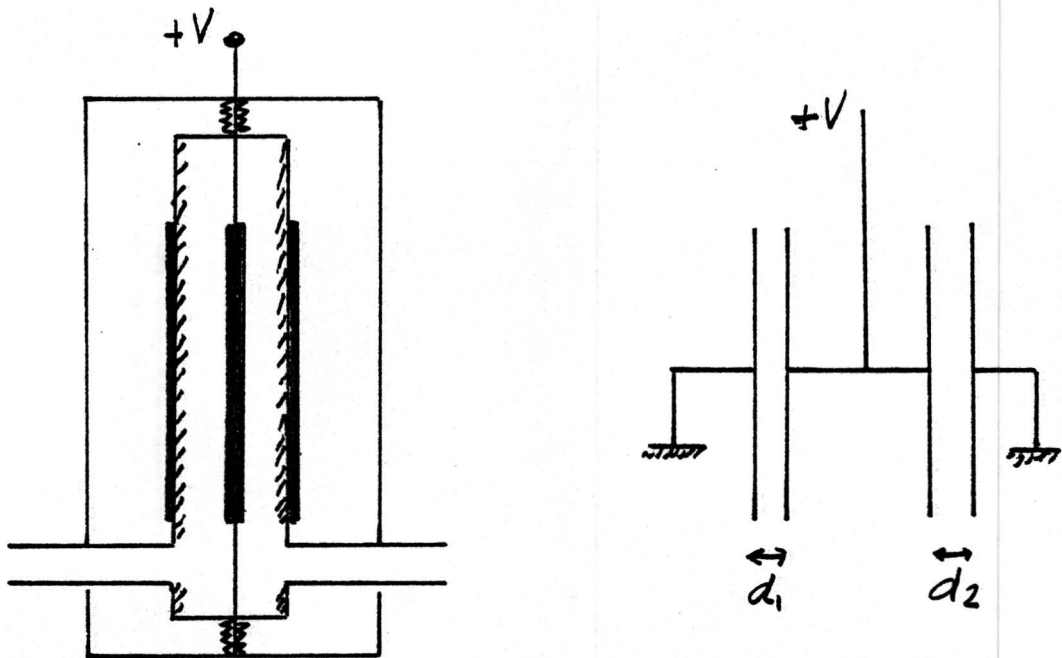
Kenmerkend voor deze manometer is dat we met in de opnemer aangebrachte condensatorplaten en Coulombkrachten het membraan terug sturen in zijn evenwichtspositie.

Het principe van deze methode werd al aangeduid in paragraaf III.3. De manometer die zelf gebouwd werd, is voor deze opstelling aangepast. Het membraan is met kunststoffolie en schellak electrisch geïsoleerd van het huis en beveiligd tegen spanningsdoorslag tot 500 V. Zie figuur 17.

De combinatie membraan - huis kunnen we nu beschouwen als een parallel-schakeling van twee condensatoren. Noemen we de twee luchtspleten volgens figuur 17  $d_1$  en  $d_2$  dan hangt bij gegeven spanning  $V$  en plaatoppervlakte  $A$ , de kracht op het membraan naar links af van  $d_1$  en naar rechts af van  $d_2$ . Als  $d_1$  gelijk zou zijn aan  $d_2$  dan is de resulterende kracht gelijk aan nul. Het proefmodel is daarom asymmetrisch gemaakt. In evenwicht is de ene luchtspleet gelijk aan 300 micron en de andere aan 400 micron. Het verschil in gasvolume van de meetkamers kan worden opgeheven door de grootste kamer op te vullen met een geschikte isolator. Bij deze constructie is de oppervlakte van de condensatorplaten ongeveer  $2/3$  van de effectieve oppervlakte van het membraan. De druk die we dan bij  $V = 500$  Volt electrostatisch op het membraan kunnen uitoefenen is berekend in vgl. (7.1).

$$p = \frac{F}{A} = \frac{\epsilon V^2}{2} \left( \frac{1}{d_1^2} - \frac{1}{d_2^2} \right) = 4,3 \text{ Pa} \quad (7.1)$$

Overigens kan de waarde van  $p$  sterk verhoogd worden wanneer we de luchtspleten gunstiger kiezen. Bijv.  $d_1 = 100$  en  $d_2 = 200$  micron geeft een waarde voor  $p$  van ongeveer 70 Pa. De waarde van deze druk is ongeveer een derde van het meetbereik.



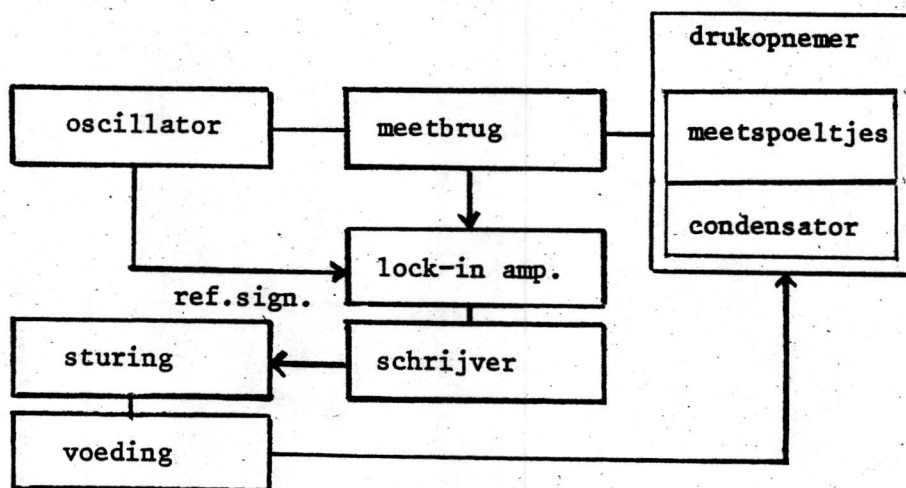
Figuur 17: Condensatorsysteem in de drukopnemer. De vette lijnen geven de platen weer, de arcering de schellak en de zigzag lijntjes de folie-isolatie. Rechts het vervangingschema.

Het membraan dat we in deze drukopnemer toepassen is iets soepeler als het membraan dat Willems gebruikte in zijn detector. De compliantie van dit membraan is ongeveer  $1,6 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3/\text{Pa}$ .

Op de aangegeven wijze kan het membraan slechts in één richting worden bewogen. Om dit bezwaar voor de terugkoppeling te ondervangen, is de meetbrug in evenwicht gebracht bij gelijke gasdrukken in beide kamers, maar bij een spanningsverschil tussen membraan en huis dat ongelijk aan nul was. In figuur 18 is de schakeling voor de terugkoppeling schematisch weergegeven. De verbinding tussen het detectiegedeelte en de terugsturing is gelegd via een compensatieschrijver met een extra potentiometer.

De as van deze extra potentiometer is bevestigd aan de as van de servomotor van de schrijver. De stand van de servomotor bepaalt de stand van deze extra potentiometer en daarmee de hoogte van de voedingsspanning van de condensator. Door de mechanische traagheid van het membraan kan zowel gelijk- als wisselspanning worden gebruikt voor deze spanning. Bij de experimenten gebruiken we een wisselspanning met een frequentie van 80 Hz.

Het zo gecreëerde regelsysteem is te vergelijken met een veer waarvan de starheid afhankelijk is van de mate van terugkoppeling. Hoeveel we terug kunnen koppelen hangt in ons systeem af van de geëiste meetnauwkeurigheid (stabiliteit) en van de toegestane traagheid (tijdconstante).



Figuur 18: Schakeling van de drukopnemer met terugkoppeling.

## VII.1 Beschrijving van de teruggekoppelde manometer.

Als we de membraan-uitwijking  $x$  noemen, krijgen we het volgende verband tussen  $x$  en de te meten druk  $p$  en de condensatorspanning  $V_c$ .

$$x = \alpha p + \beta V_c^2 \quad (7.2)$$

$\alpha$  is evenredig met de compliantie en  $\beta$  is een constante die bepaald wordt door de condensatorplaten.

De transducer vertaalt  $x$  in een elektrisch signaal. De meetbrug levert  $V_{li}$ . Deze spanning is evenredig met  $x$  volgens

$$V_{li} = S x \quad (7.3)$$

De lock-in amplifier detecteert de amplitude van  $V_{li}$  onder de fasehoek  $\phi$ . Als deingangsspanning van de lock-in amplifier gelijk is aan het meetbereik  $V_{ls}$  dan levert de LIA een gelijkspanningssignaal van 1 Volt.

De schrijver aan de uitgang van de LIA geeft een penpositie  $y$  die afhankelijk is van de spanning aan de uitgang van de LIA. Als bij volle schaal (100 hokjes) het bereik van de schrijver  $R$  Volt is, dan kunnen we de penpositie  $y$  relateren aan  $V_{li}$  volgens

$$y = \frac{V_{li}}{V_{ls}} \cdot 1 \cdot \frac{100}{R} + y_0 \quad (7.4)$$

$y_0$  is de offset van de schrijver.

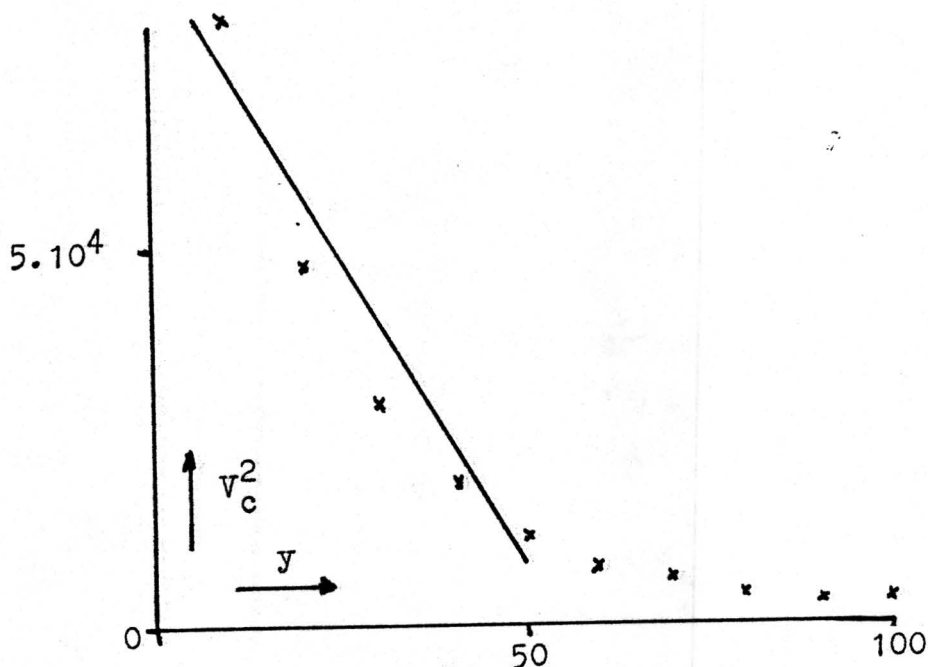
Doordat we een terugkoppeling toepassen is  $V_c^2$  afhankelijk van  $y$ . Hoewel  $V_c$  monotoon afhangt van  $y$  is er geen lineair verband. Om enig inzicht te krijgen benaderen we

$$V_c^2 = g(y) \quad (7.5)$$

eens door

$$V_c^2 = a - b y \quad \text{met } a = 90200 \text{ en } b = 1640. \quad (7.6)$$

Hoe ruw deze benadering is, zien we in figuur 19 .



figuur 19: De condensatorspanning als functie van de stand van de schrijverpen.

De vergelijkingen 1 - 4 (of 1,2,3 en 5) bekijken we als 4 vergelijkingen met als onbekenden  $x$ ,  $V_{1i}$ ,  $V_c$  en  $y$ . We kunnen dus als  $p$  gegeven is,  $x$  uitrekenen. Gebruiken we vgl. 5 in plaats van vgl. 4 dan krijgen we

$$x = \frac{\alpha p + \beta a}{1 + \frac{100 \beta b S}{V_{1s} R}} \quad (7.7)$$

Doel van het onderzoek is de compliantie van de manometer te verkleinen.

$$B = \frac{\partial v}{\partial p} = A_{\text{eff}} \frac{\partial x}{\partial p} \quad (7.8)$$

waarin  $A_{\text{eff}}$  de effectieve oppervlakte van het membraan is. Hier uit kunnen we de compliantie  $B$  berekenen.

$$B = A_{\text{eff}} \frac{\partial x}{\partial p} = A_{\text{eff}} \frac{\alpha}{1 + \frac{100 \beta b S}{V_{1s} R}} \quad (7.9)$$

De in deze vergelijking in te vullen getalwaarden zijn:

$$S = 28,33 \frac{V}{m}$$

$$\alpha = 3 \cdot 10^{-5} \frac{m}{Torr}$$

$$\beta = 1,41 \cdot 10^{-11} \frac{m}{V^2}$$

$$A_{eff} = 7 \cdot 10^{-4} m^2$$

$$V_{1s} = 25 \cdot 10^{-6} V$$

Er zijn 4 meetseries verricht.

1. zonder terugkoppeling	$B = 2 \cdot 10^{-8} \frac{m^3}{Torr}$
2. terugkoppeling R=1	$B = 5,8 \cdot 10^{-9}$
3. terugkoppeling R=0,2	$B = 1,5 \cdot 10^{-9}$
4. terugkoppeling R=0,1	$B = 7,7 \cdot 10^{-10}$

Volgens deze benadering is de compliantie 26 keer verkleind. Als we deze berekening uitvoeren met vgl. 4 dan blijkt dat we de compliantie kunnen verkleinen tot 50 keer.

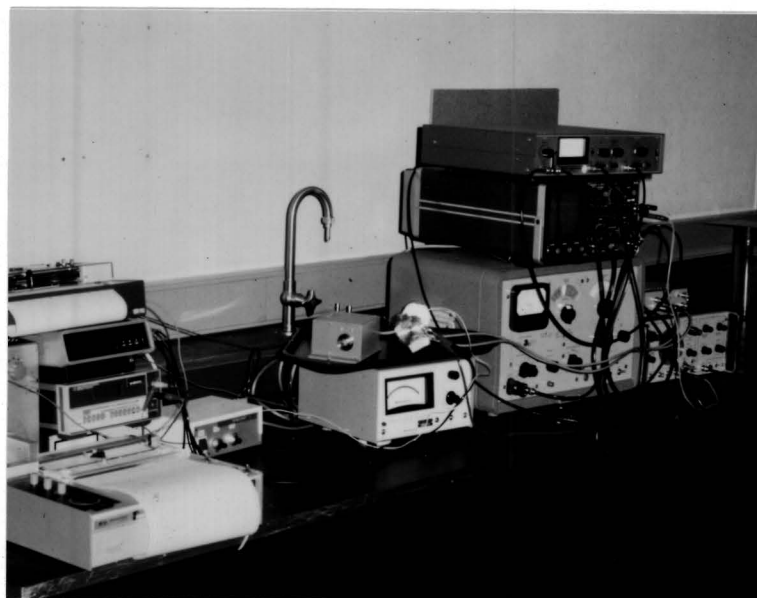
Bij de meting is de gang van zaken zo dat  $y$  gemeten wordt en dus bekend is. We willen dan uit de vgl. 1,2,3 en 4 de onbekende  $p$  oplossen. (er zijn nog 3 andere onbekenden:  $x$ ,  $V_{1i}$  en  $V_c$ .)

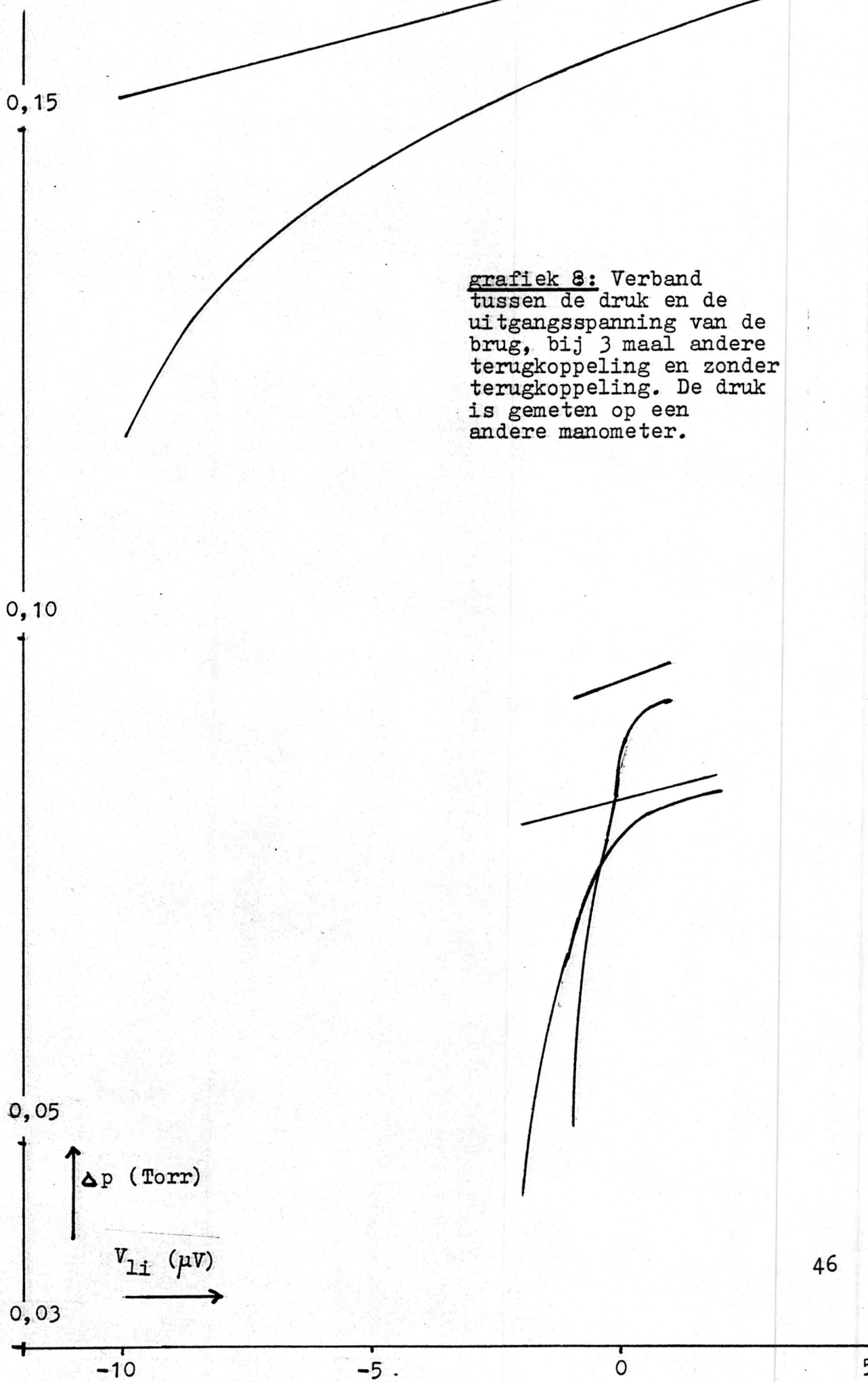
$$p = (y - y_0) \cdot \frac{V_{1s} R}{100 \alpha S} - \frac{\beta}{\alpha} \cdot g(y) \quad (7.10)$$

Met  $V_c$  dan vinden we, als we stellen dat  $x = h(V_c)$  en  $x_0 = h(V_{c0})$ , als uitdrukking voor  $p$

$$p = \frac{R V_{1s}}{100 \alpha S} h(V_c) - h(V_{c0}) - \frac{\beta}{S \alpha} V_c^2 \quad (7.11)$$

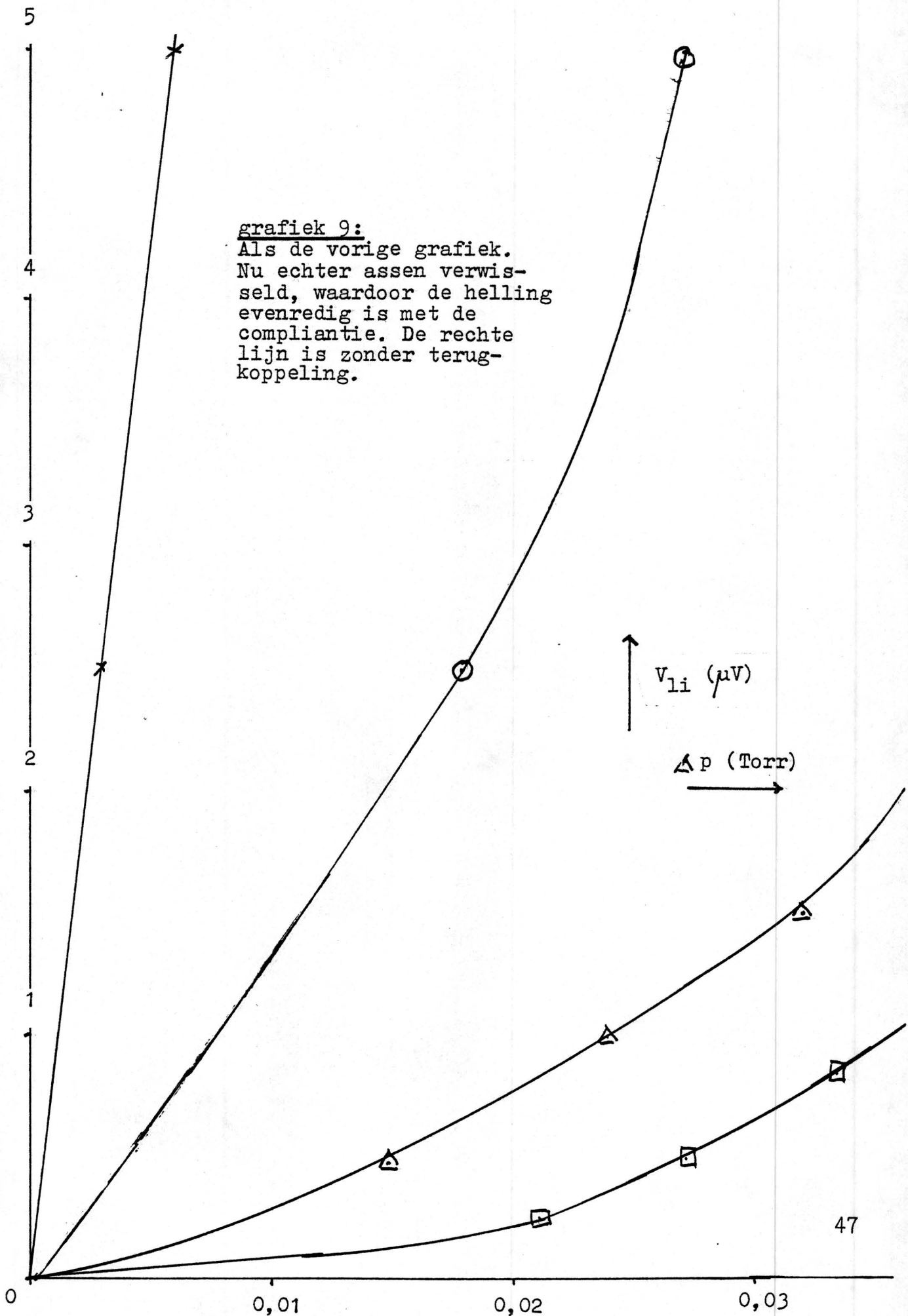
We kunnen de metingen goed weergeven in een grafiek. Grafiek 8 toont bij 3 maal een andere terugkoppeling en zonder terugkoppeling het verband tussen de uitgangsspanning en de druk, zoals die werd gemeten met een tweede manometer. Als we de x en y-as van deze grafiek verwisselen, krijgen we grafiek 9. In deze grafiek is de tangens van de hoek tussen de raaklijn en de as een maat voor de compliantie. Grafiek 10 toont ons het effect van de krachtwerking van het condensatorsysteem. Als we voor de 3 meetseries het drukverschil nemen bij al dan niet ingeschakelde condensatorspanning en die uitzetten tegen  $V_c^2$ , dan krijgen we grafiek 10. Foto 4 toont ons een overzicht van de meetopstelling. Rechts staat het oscillator- en meetgedeelte. Centraal de drukopnemer en <sup>links</sup> ~~rechts~~ de apparatuur voor de terugkoppeling.



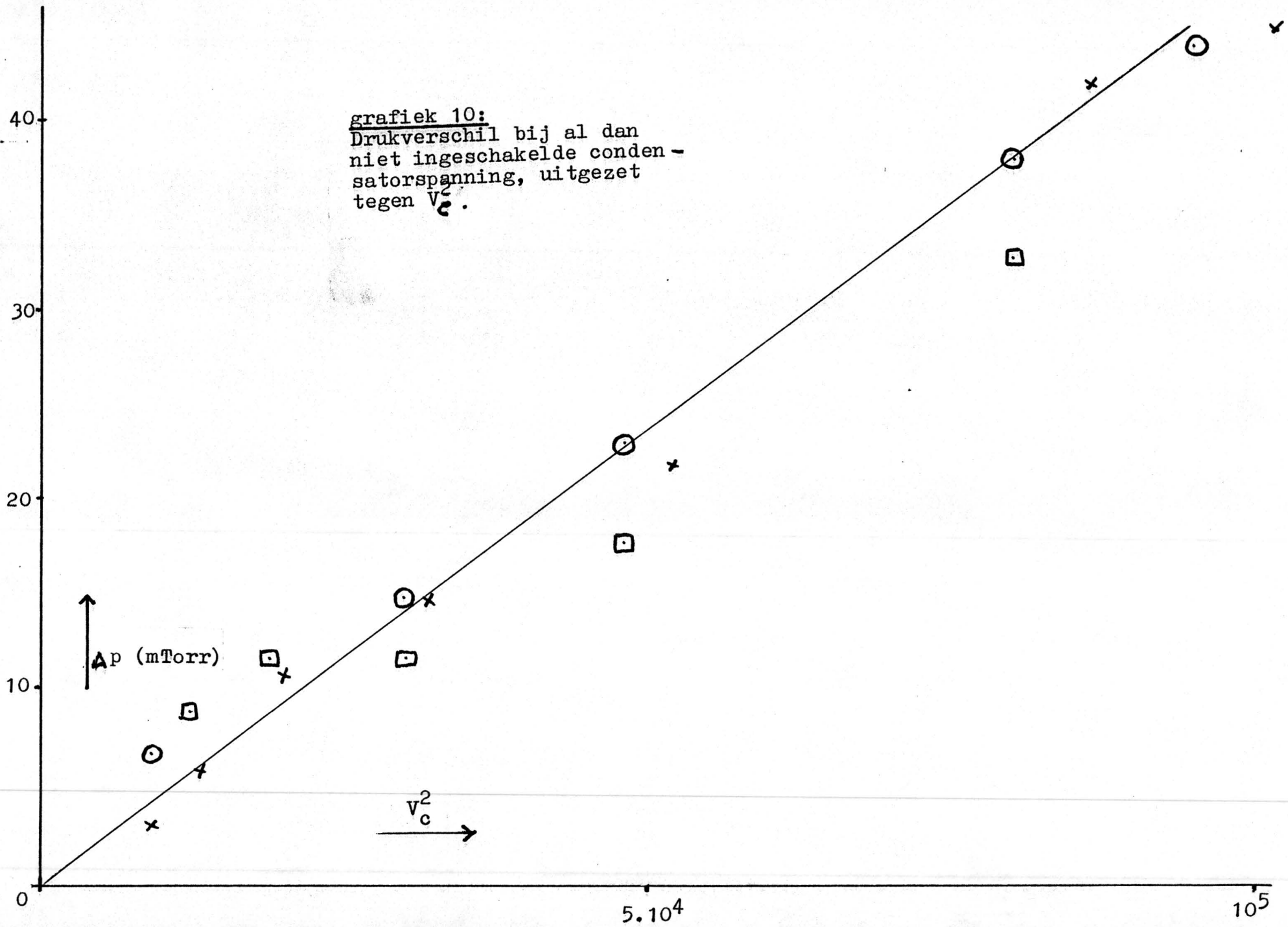


grafiek 8: Verband tussen de druk en de uitgangsspanning van de brug, bij 3 maal andere terugkoppeling en zonder terugkoppeling. De druk is gemeten op een andere manometer.





grafiek 10:  
Drukverschil bij al dan  
niet ingeschakelde conden-  
satorsparing, uitgezet  
tegen  $v_c^2$ .



## VIII. Conclusies.

Het blijkt zinvol en mogelijk te zijn de compliantie van een inductieve drukopnemer te verkleinen door terugkoppeling. Nadat we moeizaam probeerden inductief terug te koppe/en, blijkt de capacitieve terugkoppeling perspectieven te bieden. Bij onze experimenten zijn we er in geslaagd de compliantie tot een factor 50 te verkleinen. Wegens de niet-lineariteit van de toegepaste terugkoppeling is de compliantie geen constante meer. Dit heeft vervelende consequenties voor de theoretische achtergrond van de detector waarin de drukopnemer wordt toegepast. Als we de compliantie over een groter bereik met een constant bedrag van 50 maal zouden kunnen verkleinen, wordt de detector 30 maal gevoeliger bij alle metingen aan vloeistoffen. Bij de capacitieve terugkoppeling zonder meer kan echter alleen gas worden gebruikt als medium. Bij vloeistoffen zouden we tussen-membranen moeten gebruiken. Hierom was de inductieve terugkoppeling eigenlijk te prefereren. Op grond van de gegevens uit capacitieve terugkoppeling zouden we het krachten-spel bij inductieve terugkoppeling misschien beter kunnen begrijpen. Een voordeel van de capacitieve terugkoppeling is dat er geen extra warmte-ontwikkeling is. Die beïnvloedt immers de druk van het gas. De temperatuur-invloed op de druk was overigens bij het gehele onderzoek al een belangrijke beperkende factor.

De gevoeligheid van de manometer hoeft bij terugkoppeling niet te veranderen, mits we een zeer constant meet- en stuursysteem gebruiken. In het algemeen vormen de mechanische eigenschappen van de drukopnemer de zwakste schakel in de meetketen. (Litt. 8.

Volgens de litteratuur wordt de lineariteit van de teruggekoppelde drukopnemer beter ( litt. 16. ). Bij onze schakeling komt dit nog niet tot uiting.

### IX. Suggesties.

Als we ook de beide helften van het huis van de drukopnemer nog onderling zouden isoleren, krijgen we een andere situatie bij capacitieve terugkoppeling. Zie figuur 20.

Stel dat geldt

$$V_1 = V_0 \quad V_r = -V_0 \quad V_m = V$$

De kracht in de linker condensatorhelft bedraagt dan

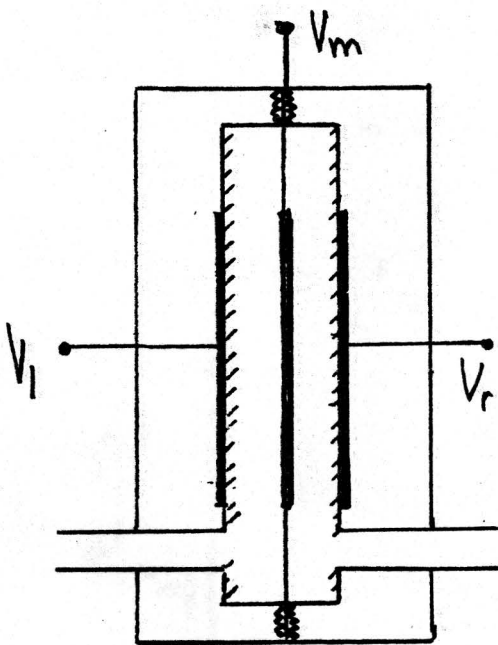
$$F_1 = \frac{\epsilon A}{2 d^2} (V_1 - V_m)^2 = \frac{\epsilon A}{2 d^2} (V_0 - V)^2 \quad (9.1)$$

Voor de rechterhelft geldt

$$F_r = \frac{\epsilon A}{2 d^2} (V_r - V_m)^2 = \frac{\epsilon A}{2 d^2} (V_0 + V)^2 \quad (9.2)$$

De resulterende kracht  $F$  wordt dan gelijk aan  $F_1 - F_r$

$$|F| = \frac{\epsilon A}{2 d^2} \cdot 4 V_0 V \quad (9.3)$$



Figuur 20:

Condensatorsysteem met drie aansluitingen.

Als geldt dat  $A = A_{\text{eff}}$ , dan kunnen we de druk  $p$  berekenen

$$p = \frac{2\xi}{d^2} \cdot V_0 V \quad (9.4)$$

Als  $V$  het gebied doorloopt van  $-V_0$  tot  $+V_0$  en we stellen dat  $V_0 = 500$  V en  $d = 100$  micron, dan is de druk die we maximaal op het membraan kunnen uitoefenen

$$p = \frac{4\xi}{d^2} \cdot V_0^2 = 900 \text{ Pa} \quad (9.5)$$

Doordat de luchtspletten aan beide zijden even breed zijn, kunnen we ook de originele Validyne drukopnemer weer toepassen. Als ook de carrier demodulator weer wordt gebruikt, krijgen we een veel eenvoudigere opstelling. Ook is de compensatie-druk  $p$  nu lineair afhankelijk van  $V$ . Daardoor is het nu mogelijk de compliantie wel constant te maken over een groot gebied.

Twee effecten die nadelig kunnen werken, zijn het gevaar voor spanningsdoorslag bij de spoeltjes en de mogelijke polarisatie-effecten in het isolatie-folie.

De mogelijkheid om met tussen-membranen te werken bij drukmetingen aan vloeistoffen werd ook al in de conclusie genoemd.

## X. Apparatuur.

Overzicht van de gebruikte (meet-)apparatuur.

1. Power supply Delta E 60.06
2. Function generator Farnell FG 1
3. Toongenerator Philips GM 2308
4. Trafo Wijdeven 220-3500 V (50 Hz)
5. Oscilloscoop Philips PM 2333
6. Mini multimeter Takeda-Riken TR 6364
7. Digitale multimeter Hewlett Packard 3465 A
8. Universal bridge Marconi TF 2700
9. Vector-impedance meter Hewlett Packard 4800 A
10. Differential input phase meter Wiltron 351
11. Wave analyzer Hewlett Packard 302 A
12. Lock-in amplifier EG & G/PAR model 5101  
met selectieve versterker
13. Fase-gevoelige detector Brookdeal 411
14. Voorversterker Brookdeal 451
15. Compensatie-schrijver Servogor RE 5111  
met extra potentiometer
16. Electronic manometer Barocel model 1173  
met sensor 581D-10T-2B2-V1
17. Differentiaal manometer Validyne MP 45  
met carrier-demodulator CD 101
18. Mettler-balans.

## XI. Literatuur.

1. G.H.W. Willems  
Development of a detector for chromatography  
proefschrift 1981
2. Hans Keulen  
Metingen met een stromingsweerstand brug detector  
stageverslag THE 1979
3. Lex Brounts  
Viscositeiten van binaire vloeistof/gasmengsels:  
theorie en meting m.b.v. een stromingsweerstand  
brug detector  
stageverslag THE 1980
4. Fachgebietsbericht 1978-1980  
Institut für Mess- und Regelungstechnik  
Technische Universität Berlin
5. Instruction-manual Validyne CD 101  
carrier demodulator
6. R. Kronig (red)  
Leerboek der Natuurkunde  
Amsterdam 1966
7. Fysische analyse methoden  
collegedictaat THE 1979
8. K.B. Klaassen  
Elektronische meettransducenten  
Elektronica 81/11
9. J.C.L. van Peppen  
Coherent detection and its use in lock-in  
amplifiers  
in Regtien  
Modern Electronic Measuring Systems  
Delft 1978

10. W.D. Cooper  
Electronic Instrumentation and measurement  
Englewood Cliffs NJ 1978
11. P.M. Frank  
An automatic compensating-method for measuring  
pressures varying with time within a range of  
 $10^{-6}$  ...  $10^{-2}$  torr, independent of the type of  
gas employed  
Microtecnic XXI/1967
12. P. Frank  
Selbsttätige elektrostatische Membranrückstellung  
bei einem kapazitieven Membranmanometer  
ATM 1965
13. B.O. Smith  
A differential pressure meter for open hearts  
Instruments 26/1953
14. Philips Databook  
Components + Materials groene serie 4A  
Eindhoven 1975
15. H.K.P. Neubert  
Instrument transducers  
Oxford 1975