



**TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT**  
**VLIEGTUIGBOUWKUNDE**

**Memorandum M 81**

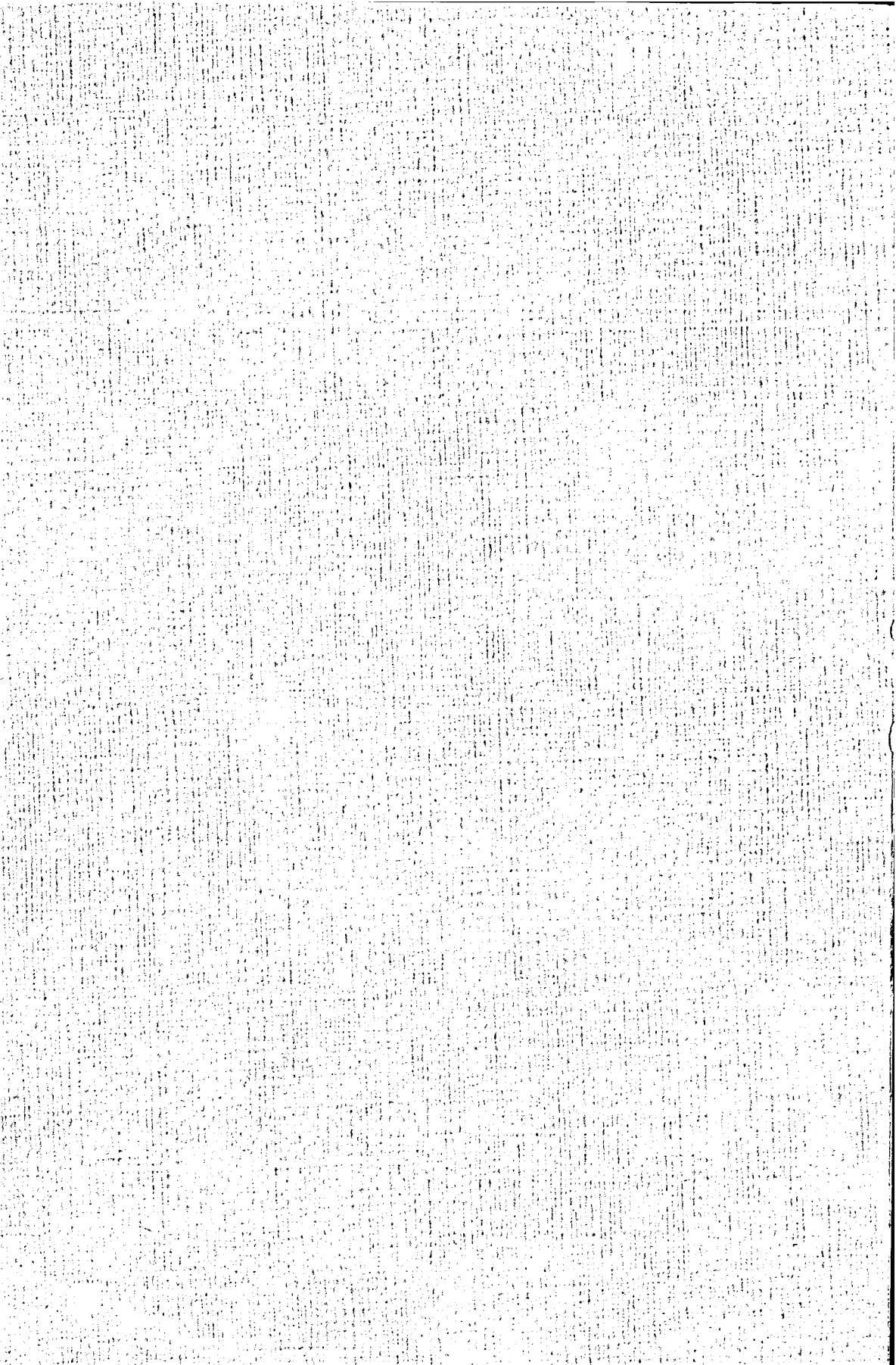
**HET GEBRUIK EN HET IJKEN VAN**  
**GEVOELIGE DRUKMETERS**

door

**A. Burgers**

**Delft - Nederland**

**november 1964**



Errata:

pag. 8 : laatste regel lees:

beschermende i.p.v. beschermden

pag.29 : form (8.9) moet luiden

$$2 \pi r dh(\gamma_{13} - \gamma_{12}) = \pi r^2 dh \gamma h$$

regel 8 v.o.

dn  $\neq$  cm moet zijn: dncm

pag.31.: regel 13 en 14 v.o.

H moet zijn: h

regel 9 v.o. lees:

meet i.p.v. moet

TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT  
VLIEGTUIGBOUWKUNDE

Memorandum M 81

Het gebruik en het ijken van gevoelige drukmeters

door

A.Burgers

DELFT-NEDERLAND

november 1964

## Inleiding.

Het gehele gebied van drukmetingen is zeer uitgebreid. Er kunnen drukken worden gemeten van  $10^{-17}$  kg/cm<sup>2</sup> ( $10^{-14}$  torr) en drukken van meer dan  $10^5$  kg/cm<sup>2</sup>.

Om deze drukken te meten bestaan zeer uiteenlopende meetmethoden. De laagste drukken (ultra-hoog vacuum) worden gemeten met apparaten waarin gassen worden geïoniseerd en de stroom die hier het gevolg van is, is een maat voor de druk.<sup>1)</sup> Hogere drukken kunnen worden gemeten met meetinstrumenten die berusten op de warmtegeleiding van gassen. In vacuum wordt minder warmte van een gloeidraad afgevoerd dan bij een hogere druk.<sup>2)</sup>

De McLeod manometer is een vacuummeter, die berust op de wet van Boyle:

$$P.V = \text{constant.}$$

Deze manometer kan niet continu worden afgelezen zoals de vorige manometers. Het meetbereik hangt alleen af van de afmetingen van het instrument. Deze manometer kan daarom als een standaardinstrument worden gebruikt.<sup>3)</sup>

Er wordt bij sommige vacuummeters gebruik gemaakt van de weerstand die een trillend voorwerp in een gas ondervindt. (b.v. de weerstand die een snaar of een kwarts kristal ondervindt in een gas).<sup>2)</sup> De benodigde energie om b.v. een snaar met een constante amplitude te laten trillen is een maat voor de druk.

Om hogere drukken te meten wordt gebruik gemaakt van de vervorming van een materiaal.

Bij veel drukmeters wordt door het vervormde materiaal direkt een wijzer bediend, die één of meermalen roteert. Bij veel Bourdon manometers roteert de wijzer  $270^{\circ}$ , bij gevoelige hoogte- en snelheidsmeters roteert de wijzer soms meer dan 10-maal.

In andere drukmeters worden verplaatsingen gemeten met variaties in weerstanden, zelfinducties of capaciteiten. De hoogste drukken worden gemeten met behulp van weerstandsveranderingen die optreden, wanneer het weerstandsmateriaal aan die druk wordt onderworpen.<sup>4)</sup>

Snel wisselende drukken worden o.a. met piezoelectrische drukmeters gemeten.

Als bijzondere drukmeter wordt nog genoemd, die, waarbij van een trillende snaar of cylinder <sup>5)</sup> de resonantiefrequentie verandert onder invloed van een drukverandering.

Veel drukmeters hebben een beperkt gebied, waarin ze kunnen worden toegepast. Beperkende factoren kunnen de invloeden van de omgeving zijn of het gedrag van de te meten druk(fluctuaties).

In de volgende hoofdstukken wordt de opbouw van een drukmeter besproken. Van een drukmeter die speciaal voor het gebruik bij vliegproeven is ontworpen, wordt nagegaan of er meer toepassingsgebieden zijn en of door modificaties het toepassingsgebied kan worden uitgebreid.

<u>Inhoud.</u>	blz.
1. Inleiding	1
2. Inhoud	3
3. Notaties	5
4. De opbouw van een drukmeter	6
4.1. Het gevoelige deel van een drukmeter	6
4.1.1. Invloed van moduli	6
4.1.2. De invloed van de proportionaliteitsgrens	7
4.1.3. De invloed van hysteresis en kruip	7
4.1.4. Vermoeing van het materiaal	7
4.1.5. De invloed van de uitzettingscoëfficiënt	8
4.1.6. De invloed van de temperatuur op E en G	8
4.1.7. De corrosiebestendigheid	8
4.2. De zijde van de drukmeter, waar de druk wordt toe- gevoerd	9
4.3. Het deel van de drukmeter, waarmee de vervorming van het drukgevoelige deel wordt gemeten	10
4.3.1. Drukmeters met directe aanwijzing	11
4.3.2. Drukmeters met elektrische aanwijzing	11
4.3.2.1. Het gebruik van potentiometers in drukmeters	11
4.3.2.2. Drukmeters met inductieve verplaat- singsmeters	12
4.3.3. Force-balance drukmeters	12
5. Een gevoelige inductieve drukmeter	13
5.1. De invloed van de temperatuur op de drukmeter en het meetcircuit	14
5.2. De invloed van de stand van de drukmeter	17
6. Het wegfilteren van ongewenste signalen	17
6.1. Het gebruik van passieve filters	18
6.2. Het gebruik van actieve filters	20
7. Het gebruik van gevoelige drukmeters	22
8. Het ijken van drukmeters	24
8.1. Het ijken van drukmeters met een vloeistofmanometer	25

	blz.
8.1.1. De hoogte van de vloeistofkolom	26
8.1.2. Het soortelijk gewicht van de vloeistof	26
8.1.3. De temperatuur van de manometer en de vloeistof	27
8.1.4. De tapsheid van buis en bak	27
8.1.5. De capillaire opstijging van de vloeistof	28
8.1.6. Het nalopen van de vloeistof langs de wand	30
8.2. Het ijken van drukmeters met een drukbalans	31
9. Conclusies	38
10. Literatuur	39

Figuren



Notaties.

a	constante
A	oppervlak
C	capaciteit
D	diameter (= 2r)
e	spanning
G	gewicht
h	hoogteverschil
i	stroom
j	$\sqrt{-1}$
K	kracht
l, L	lengte
M	koppel
p	drukverschil
Q	hoeveelheid
r	straal
R	weerstand
t	tijd
$\Delta t$	temperatuurverschil
v	snelheid
$\Delta V$	volume van de achterblijvende vloeistof
x, y	afstand
$\alpha$	temperatuur coëfficiënt
$\beta$	hoek
$\gamma$	s.g. van de vloeistof
$\gamma_{ij}$	oppervlakte spanning tussen de stoffen i en j
$\delta$	fasehoek
$\omega$	hoeksnelheid, cirkelfrequentie
$\tau$	tijdconstante
$\zeta$	dempingsverhouding
$\nu$	randhoek
$\eta$	viscositeit
$\varphi$	hoek

#### 4. De opbouw van een drukketer.

Een van de methoden om een druk te meten is de methode die gebruik maakt van de vervorming van een materiaal. Drukketers die op dit principe berusten zijn opgebouwd uit de volgende delen:

- 1<sup>o</sup> Het deel dat voor drukken gevoelig is.
- 2<sup>o</sup> De zijde van de drukketer, waar de druk wordt toegevoerd.
- 3<sup>o</sup> Het deel van de drukketer, waarmee de vervorming van het drukgevoelige deel wordt gemeten.

##### 4.1. Het gevoelige deel van de drukketer.

Dit deel van de drukketer kan op verschillende manieren vervaardigd zijn. De vorm van het drukgevoelige deel hangt af van de druk die er mee wordt gemeten en de manier waarop er mee wordt gemeten (zie 4.3.).

Er bestaan drukketers met:

- a. vlakke membranen
- b. gegolfde membranen
- c. capsules (uit twee gegolfde membranen)
- d. gegolfde buizen (balgen)
- e. gebogen of getordeerde buizen

Van het materiaal van deze drukgevoelige elementen hangt in een belangrijke mate de eigenschappen van de drukketer af.

Aan het materiaal, dat voor drukketers wordt gebruikt, kunnen de volgende eisen worden gesteld.<sup>6)</sup>

1. Lage waarde van E en G.
2. Hoge proportionaliteitsgrens.
3. Kleine hysteresis en kruip.
4. Goed bestand zijn tegen vermoeiing.
5. Kleine uitzettingscoëfficiënt.
6. Weinig invloed van de temperatuur op E en G.
7. Corrosiebestendig.

##### 4.1.1. Invloed van moduli.

Indien een materiaal lage moduli heeft, kan het bij een gegeven materiaalspanning meer vervormen. Het instrument waarvan de werking berust

op deze vervorming is dan gevoeliger. Omdat ook andere eigenschappen van belang zijn is b.v. rubber minder geschikt voor drukmeters dan metalen.

#### 1.2. De invloed van de proportionaliteitsgrens.

Een hoge proportionaliteitsgrens wil zeggen, dat een materiaal aan een grote vervorming kan worden onderworpen zonder dat er een blijvende vervorming optreedt. Zo'n instrument kan een groot meetbereik bezitten en overdrukken verdragen zonder dat de specificaties van het instrument worden overschreden.

Indien een instrument toch grote overdrukken moet kunnen verdragen moeten hiervoor voorzieningen worden getroffen. In figuur 4.1 is getekend hoe de golven van het membraan in een gegolfde ondersteuningsplaat vallen, wanneer de maximale druk bereikt is. Voor verschildrukkmeters (figuur 4.2) worden twee ondersteuningsplaten gebruikt.

#### 1.3. De invloed van hysteresis en kruip.

Hysteresis is het verschijnsel dat het materiaal na een vervorming niet geheel in de oorspronkelijke stand terugkomt.

Hysteresis is het gevolg van verplaatsingen langs kristalgrenzen in het metaal. Figuur 4.3, die het verband aangeeft tussen de vervorming van een materiaal en de belasting, laat een hysteresislus zien. De hysteresis is onafhankelijk van de tijd.

Bij een ijking kan de hysteresis van een drukmeter uit een heen- en een terugijking worden bepaald.

Kruip van een materiaal daarentegen is afhankelijk van de tijd. Het is het gevolg van de visceuze vloeit van een materiaal. Een materiaal dat kruip vertoont blijft vervormen tot na verloop van tijd een eindwaarde van de vervorming voor een bepaalde belasting is bereikt.

Indien genoemde effecten klein zijn zal dit het instrument ten goede komen.

#### 1.4. Vermoeing van het materiaal.

Indien een drukmeter vaak aan wisselende drukken wordt onderworpen moet het materiaal tegen vermoeing bestand zijn. Het is dan ook nodig

om zich bij het ontwerp van een instrument op de hoogte te stellen van de eigenschappen van de gebruikte materialen.

Soms wordt de weerstand tegen vermoeiing opgegeven. Door ACB (Frankrijk) wordt opgegeven dat het membraan van drukmeters voor de lage meetbereiken  $10^6$  drukwisselingen van 0-100% met een frequentie van 5Hz moet kunnen verdragen, tegen  $3,10^3$  wisselingen bij de hoogste meetbereiken.

#### 4.1.5. De invloed van de uitzettingscoëfficiënt.

Indien de materialen, waaruit een instrument is opgebouwd kleine uitzettingscoëfficiënten bezitten zal het niet nodig zijn voor zo'n instrument temperatuurcorrecties toe te passen, of het op een constante temperatuur te houden. Het kan ook gewenst zijn materialen te kiezen die dezelfde temperatuurcoëfficiënt bezitten, om ongewenste materiaalspanningen te vermijden.

#### 4.1.6. De invloed van de temperatuur op E en G.

Een kleine invloed van de temperatuur op de elasticiteits- en glijdingsmodulus wil zeggen, dat de optredende vervormingen van het drukgevoelige element over een groot temperatuurgebied vrijwel constant blijven.

De in 4.1.5. en in 4.1.6. genoemde invloeden bepalen wat de temperatuurinvloed op het gehele instrument zal zijn en in welk temperatuurgebied het instrument mag worden gebruikt.

#### 4.1.7. De corrosiebestendigheid.

Een instrument moet, indien het met agressieve vloeistoffen of gassen in aanraking komt uit corrosievaste materialen zijn vervaardigd. Het gevoelige deel van het instrument kan ook worden afgeschermd, indien het niet van de juiste materialen kan worden vervaardigd.

In figuur 4.4 is het gevoelige membraan aan één of aan twee zijden beschermd door een vloeistof (om de druk over te brengen) samen met een zo slap mogelijk membraan, dat wel van een corrosievast materiaal is vervaardigd (b.v. rubber of een kunststof). Het tweede membraan dient alleen om de beschermingsvloeistof af te sluiten. Het membraan kan ook met een beschermden laag worden bedekt.

Er zal geen materiaal aan alle eigenschappen kunnen voldoen, maar de materialen zullen gekozen worden om die eigenschappen waardoor ze het best bruikbaar zijn.

Fosforbrons wordt om zijn corrosie-eigenschappen gekozen. Beryllium-koper om zijn lage hysteresis en het is goed bestand tegen vermoeiing. Invar en Modulvar om hun kleine thermische uitzettingscoëfficiënt. Elinvar, Isoelastic en Ni-span-C om hun constante moduli.

2. De zijde van de drukmeter, waar de druk wordt toegevoerd.

De druk wordt meestal naar het drukgevoelige deel gevoerd via een buis. De andere zijde van het drukgevoelige element staat meestal in verbinding met de atmosfeer.

Wanneer drukverschillen (niet t.o.v. de atmosfeer) worden gemeten wordt de andere zijde van het drukgevoelige element via een buis verbonden met een tweede druk.

Indien de drukken niet of slechts langzaam variëren, is de lengte van de buizen niet zo erg belangrijk. Bij snel wisselende drukken is dit, indien aan gassen wordt gemeten, zeer belangrijk, omdat door de compressibiliteit van het gas, een buis, een weerstand voorstelt, waar het gas door moet stromen naar het volume van het instrument.

De compressibiliteit is:

$$K = -V \cdot \frac{dp}{dV}$$

Bij langzame variaties geldt:

$$pV = RT$$

en is:

$$K = +p$$

Bij snelle drukvariaties geldt:

$$pV^k = RT$$

en is:

$$K = kp.$$

De compressiemodulus van een gas is dus gelijk aan de druk van het gas, bij isotherme toestandsveranderingen en gelijk aan  $k$  maal de druk bij adiabatische toestandsveranderingen. In beide gevallen geldt dat de druk niet te hoog mag zijn, anders treden afwijkingen van de gaswet op.

Bij vloeistoffen is de compressiemodulus veel minder drukafhankelijk. Enkele waarden van de compressiemodulus zijn<sup>4)</sup>:

water  $2,3 \cdot 10^4$  kg/cm<sup>2</sup>.

methylnalcohol  $1,1 \cdot 10^4$  kg/cm<sup>2</sup>.

ethylalcohol  $1,2 \cdot 10^4$  kg/cm<sup>2</sup>.

Door de hoge compressiemodulus van een vloeistof stroomt er door dezelfde leiding veel minder vloeistof dan gas bij gelijke drukvariaties. Ook een groot volume in de drukmeter is van invloed bij wisselende drukken. In een groot volume moet veel gas stromen. Indien dit door een nauwe buis (hoge weerstand) plaats moet vinden, kost dit veel tijd.

Bij metingen aan wisselende gasdrukken moet de leiding tussen de meetplaats en de drukopnemer zo kort mogelijk zijn, en het eigen volume van het instrument zo klein mogelijk. Er worden wel drukmeters vervaardigd waar het gevoelige membraan direct met de te meten druk in contact wordt gebracht. (flush-type drukmeter). Dergelijke instrumenten worden o.a. gebruikt in pressure scanners, waarbij max. 48 drukken per seconde worden afgetast en gemeten. Het gevoelige oppervlak van deze drukmeters heeft een diameter van 15 mm.

Door de fabrikant van deze pressurescanners (Scannivalve Co) worden drukmeters voor deze scanners gemaakt die een meetbereik hebben van 15 cm water.

#### 4.3. Het deel van de drukmeter, waarmee de vervorming van het drukgevoelige deel wordt gemeten.

De vervorming die in het drukgevoelige deel van de drukmeter door een druk wordt veroorzaakt, wordt gemeten als een verplaatsing. In plaats van een verplaatsing kan men ook de kracht meten die nodig is om de verplaatsing van het drukgevoelige deel te niet te doen.

Verplaatsingen kunnen op zeer veel manieren worden gemeten. Meestal worden ze langs mechanische of elektrische weg gemeten.

### 3.1. Drukmeters met directe aanwijzing.

De meest gebruikte drukmeters zijn met een mechanische overbrenging uitgevoerd. Er worden vaak tandwielen gebruikt of hefboomen om een wijzer te verdraaien (Bourdon manometer) of een telwerk te verstellen. (Telwerken worden toegepast in instrumenten, waarbij de wijzer meer dan 1 omwenteling moet maken).

Deze methode van verplaatsingsmeting heeft als nadeel dat in de mechanische vergroting wrijving optreedt in de draaipunten en dat er tussen de tandwielen speling op kan treden. De hysteresis van het drukgevoelige deel wordt ook vergroot op de wijzer overgebracht. De onderdelen van een mechanische verplaatsingsmeting moeten goed uitgebalanceerd zijn om ongevoelig te zijn voor de stand van het instrument of voor trillingen waaraan het instrument is onderworpen.

Een voordeel van mechanische drukmeters is, dat de constructie eenvoudig is en dat de druk direct kan worden afgelezen.

### 3.2. Drukmeters met elektrische aanwijzing.

Verplaatsingen kunnen in drukmeters o.a. met potentiometers, met inductieve of capacitieve methoden worden gemeten of met rekstrookjes.

#### 3.2.1. Het gebruik van potentiometers in drukmeters.

In drukmeters, waar relatief grote verplaatsingen in optreden worden potentiometers toegepast. Figuur 4.1 is hier een voorbeeld van.

Van de toegepaste potentiometers hebben draadgewonde potentiometers het nadeel dat het oplossend vermogen klein is. De afmetingen van de weerstand moeten klein blijven, waardoor het aantal windingen beperkt is. Koolpotentiometers daarentegen hebben een oneindig groot oplossend vermogen, maar ze zijn minder stabiel. In plaats van kool kan geleidend plastic (Markite) als weerstandsmateriaal worden gebruikt. Drukmeters met potentiometers zijn eenvoudig van constructie evenals de benodigde meetschakeling. Er is slechts een voedingsbron nodig en een aanwijsinstrument.

#### 4.3.2.2. Drukmeters met inductieve verplaatsingsmeters.

Inductieve verplaatsingsmeters kunnen worden onderscheiden in:

##### a. Differentiaaltransformatoren.

Dit zijn spoelen, waarin een verplaatsbare kern is opgesteld (figuur 4.5). De uitgangsspanning is een maat voor de verplaatsing van de kern. Met een fasegevoelige detector kunnen zowel positieve als negatieve verplaatsingen (t.o.v. de middenstand) worden gemeten. Verplaatsingen van  $+ 0,125$  mm kunnen zo worden gemeten. (Schaevitz Engineering). Met differentiaaltransformatoren worden drukopnemers vervaardigd die een lineariteit bezitten van  $0,2\%$ .

b. Opnemers, waarbij de magnetische weerstand varieert. Deze verplaatsingsmeters bestaan uit een kern die E-vormig is en waarvoor een I-vormig juk beweegt. (zie fig. 4.6a en b). Er kan met deze verplaatsingsmeter worden gemeten zoals bij differentiaaltransformatoren is beschreven of in brugschakelingen. In figuur 4.7 is een mogelijke brugschakeling getekend. De uitgangsspanning is voor kleine verplaatsingen van het juk evenredig met deze verplaatsingen. In de hierna te beschrijven drukmeter wordt de verplaatsing van het membraan met zo'n E-vormige (hier cilindrische) kern gemeten. De totale verplaatsing van  $0,030$  mm kan met een nauwkeurigheid van  $0,1\%$  worden gemeten. Deze verplaatsingsmeters hebben evenals differentiaaltransformatoren een oneindig groot oplossend vermogen.

#### 4.3.3. Force-balance drukmeters.

Verplaatsingen kunnen te niet worden gedaan, door het verplaatste onderdeel met een te meten kracht naar het uitgangspunt terug te brengen. Deze kracht wordt meestal met behulp van een servomotor opgewekt of met een stroom die door een versterker wordt geleverd. De verplaatsingsmeter wordt hier alleen gebruikt om een afwijking van een middenstand te meten en moet dus zeer gevoelig zijn.

In figuur 4.8 is de C.E.C.<sup>1)</sup> electromanometer getekend. Deze verschilddrukmeter meet met een differentiaaltransformator de verplaatsing van de balgen bij een drukverschil. Na versterking en demodulatie wordt het

<sup>1)</sup> C.E.C. = Consolidated Electrodynamics Corporation.



signaal als een stroom naar een electromagnetisch systeem gestuurd dat een kracht opwekt om de balgen naar de oorspronkelijke stand terug te brengen. Over een weerstand wordt deze stroom als een spanning gemeten. De nauwkeurigheid van dit instrument is  $0,1^0$  /o.

In figuur 4.9 is een ander type force-balance drukmeter getekend. Hier wordt de verplaatsing van de arm a gemeten met een verplaatsingsmeter die in figuur 4.6b is getekend. Het door een druk opgewekte signaal wordt versterkt en voedt een servomotor die het uiteinde van de veer V verplaatst, zodat de arm weer in de evenwichtsstand komt.

De motor kan ook een potentiometer of een ander indicatiesysteem verdraaien. Met 2 drukdozen kan een drukverschil worden gemeten.

De nauwkeurigheid van deze drukmeter is  $0,03^0$  /o.

Force-balance instrumenten zijn meestal veel nauwkeuriger dan instrumenten waarbij verplaatsingen worden gemeten. 7)

#### Een gevoelige inductieve drukmeter.

De drukmeters die hierna worden beschreven 8) 9) zijn speciaal ontworpen voor gebruik in vliegtuigen, waar vaak in een omgeving moet worden gemeten die aan trillingen onderhevig is.

Deze drukmeters,\* (zie fig. 5.1<sup>A</sup> voor een foto van twee uitvoeringen), waarmee kleine drukverschillen kunnen worden gemeten is geschetst in figuur 5.1<sup>B</sup>. Het instrument bezit twee zilveren membranen  $m_1$  en  $m_2$  die door een stang s met elkaar zijn verbonden. Het te meten drukverschil staat over  $m_1$ ; aan weerszijde van  $m_2$  staat dezelfde druk.  $m_2$  dient alleen om s te geleiden.

Wanneer er over  $m_1$  een drukverschil staat wordt  $m_1$  met de stang s verplaatst, evenals de kern k die met s is verbonden. De verplaatsing van het membraan, dus van k, wordt gemeten met een opnemer waarbij de magnetische weerstand varieert (zie 4.3.2.2.). De opnemer bestaat uit twee vaste symmetrische delen. Tussen deze vaste delen bevindt zich de gemeenschappelijke kern k. Deze kern is beweeglijk. De beweging van de kern veroor-

\* Deze drukmeters worden vervaardigd door de firma: Ateliers de Construction de Bagneux te Bagneux in Frankrijk (A.C.B.)

zaakt een verandering van de magnetische weerstand in de beide helften door variatie van de luchtspleet. In de ene helft wordt de magnetische weerstand groter, in de andere helft kleiner.

De uitgangsspanning van de transformatorhelft, waar de magnetische weerstand groter wordt, wordt kleiner en in de andere helft wordt de uitgangsspanning kleiner. Het verschil tussen de twee uitgangsspanningen varieert dus met de beweging van de kern.

De secundaire spanningen zijn evenals het verschil van de twee secundaire spanningen evenredig met de primaire spanning, de frequentie en de magnetische weerstand.

De nauwkeurigheid, waarmee met deze drukmeters kan worden gemeten is afhankelijk van de spanning en de frequentie van de voeding. De voedingspanning moet voor nauwkeurige metingen worden gestabiliseerd, evenals de frequentie.

De uitgangsspanningen van de twee secundaire spoelen worden gelijkgericht en het verschil tussen de twee gelijkgerichte signalen wordt gemeten na afvlakking door een condensator. (zie figuur 5.2.). Omdat de twee secundaire spoelen niet geheel gelijk zijn bestaat de mogelijkheid om met de potentiometer het uitgangssignaal ( $e_u$ ) op nul te brengen, indien het te meten drukverschil nul is.

#### 5.1. De invloed van de temperatuur op de drukmeter en het meetcircuit.

De temperatuur oefent invloed uit op alle onderdelen van de drukmeter en het meetcircuit.

In de drukmeter zijn het de afmetingen, de elasticiteitsmodulus en de permeabiliteit van de kern.

Door de verandering van de afmetingen en de permeabiliteit kan de gevoeligheid (verandering in uitgangsspanning per drukverandering) veranderen. Door verandering van de elasticiteitsmodulus kunnen de membranen onder een bepaald gewicht meer doorhangen en het nulpunt veranderen. Tussen 0 en + 70°C is de invloed van de temperatuur op de gevoeligheid te verwaarlozen volgens de fabrikant.

De temperatuurinvloed op het nulpunt is 0,2°/o per °C zonder en 0,02°/o per °C met temperatuurcompensatie.

De temperatuur oefent invloed uit op alle onderdelen van het circuit, zoals dioden, weerstanden en andere onderdelen. Voor enkele dioden wordt opgegeven:

OA 85 (Germanium diode): temperatuurinvloed ongeveer  $2,5 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  bij een stroom  $i_d$  van 5 ma.

OA 202 (Silicium diode): temperatuurinvloed ongeveer  $2 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  bij  $i_d$  van 0,1 ma. en 1 ma. en  $1,5 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  bij 10 ma.

Deze spanningsvariatiës bij constante stroom kunnen worden vertaald in weerstandsvariatiës als gevolg van de temperatuursvariatiës.

Een variatie van  $2 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$  wil zeggen dat de temperatuurcoëfficiënt gelijk is aan  $\frac{2 \times 10^{-3}}{0,5} = 4 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$

(bij een spanningsval over de diode van 0,5 volt).

Wordt de diode in het circuit vervangen door een diode en een weerstand  $R_d$ , dan is volgens figuur 5.3:

$$e_o = e_i \frac{R_B}{R_B + R_d + R_L} \quad (5.1)$$

$$\frac{e_o}{e_i} = \frac{1}{1 + \frac{R_d + R_L}{R_B}} \quad (5.2)$$

Bij een temperatuurvariatie van  $\Delta t^{\circ}$  wordt (5.2):

$$\frac{e_o}{e_i} = \frac{1}{1 + \frac{R_d(1+\alpha_1\Delta t) + R_2(1+\alpha_2\Delta t)}{R_B(1+\alpha_3\Delta t)}} \quad (5.3)$$

Voor een OA 202 is  $R_d = 5000 \Omega$  bij  $i_d = 0,1 \text{ ma}$ .

$R_1$  is  $95 \Omega$  (aan een drukmeter opgemeten).

Indien  $E = 13 \text{ V}_{\text{eff}}$  is, is bij  $i = 0,1 \text{ ma}$   $R_B = 130 \text{ k}\Omega$ .

$$\alpha_1 = 4 \times 10^{-3} \text{ (diode)}$$

$$\alpha_2 = 4 \times 10^{-3} \text{ (koperdraad)}$$

$$\begin{aligned}\alpha_3 &= -4 \times 10^{-4} \text{ voor opgedampte koolweerstand} \\ &= 1 \times 10^{-4} \text{ voor metaalfilmweerstand (electrolytisch} \\ &\quad \text{neergeslagen) en} \\ &= 5 \times 10^{-5} \text{ voor opgedampte metaalfilm weerstanden.}\end{aligned}$$

(5.3) wordt:

$$\begin{aligned}\frac{e_o}{e_i} &= \frac{1}{1 + \frac{(R_d + R_L)(1 + \alpha_1 \Delta t)}{R_B(1 + \alpha_3 \Delta t)}} = \\ &= 1 - \frac{5090(1 + \alpha_1 \Delta t)}{130.000(1 + \alpha_3 \Delta t)} = \\ &\approx 1 - \frac{5}{130} (1 + (\alpha_1 - \alpha_3) \Delta t)\end{aligned}$$

Hierbij is aangenomen, dat de stroom door de diode constant blijft. De stroom blijft echter niet constant en de weerstand  $R_d$  dus ook niet. Omdat niet zo eenvoudig is aan te geven, hoe de weerstand  $R_d$  varieert en hoe de temperatuurinvloed op  $R_d$  is, wordt de gehele schakeling op een constante temperatuur gehouden.

Bij het complete circuit (fig. 5.2) worden twee dioden gebruikt en het verschil van twee spanningen gemeten. Indien sommige onderdelen in de ene helft van het circuit zich maar weinig anders gedragen dan in de andere helft van het circuit, kan dit al een duidelijke invloed hebben op de verschilspanning. Ook daarom wordt het gehele circuit op een constante temperatuur gehouden.

Metingen aan een demodulator die niet op een constante temperatuur werd gehouden lieten een variatie in de uitgangsspanning zien (bij ingangssignaal 0), die gedurende uren tot 10<sup>0</sup>/o van de maximale waarde kon oplopen.

Bij een demodulator die wel op een constante temperatuur werd gehouden was de uitgangsspanning binnen een half uur constant en varieerde daarna minder dan 1 mV.

### De invloed van de stand van de drukmeter.

Zoals fig. 5.1 laat zien hangt de kern  $k$  aan de membranen  $m_1$  en  $m_2$ . Afhankelijk van de stand van de drukmeter zullen de membranen onder invloed van de kracht die  $k$  er op uitoefent doorbuigen. Hierdoor verplaatst ook de kern zich en is de uitgangsspanning dus ook afhankelijk van de stand van de drukmeter.

De invloed van deze stand is afhankelijk van de dikte van het membraan, dus van het meetbereik van de drukmeter.

Voor een instrument met een meetbereik van  $\pm 5$  mb is de fout ongeveer  $5^\circ$ /o per "g" en voor  $\pm 50$  mb is de fout ongeveer  $0,5^\circ$ /o per "g".

De invloed van versnellingen kan worden opgeheven, door het instrument dubbel uit te voeren. De spoelen worden dan zo geschakeld, dat de uitgangsspanning constant blijft bij verandering van de stand. De ene helft van het instrument laat een spanningstoename zien en de andere helft een spanningsafname. De invloed van versnellingen is op deze wijze verminderd tot ongeveer  $0,1^\circ$ /o per "g".

### Het wegfilteren van ongewenste signalen.

Bij metingen moet ernaar worden gestreefd, alleen het gezochte verschijnsel te meten, zonder storende verschijnselen mee te meten. Ongewenste invloeden moeten zoveel mogelijk worden geëlimineerd. Deze ongewenste invloeden kunnen worden geëlimineerd door ze constant te houden (b.v. de storende invloed van temperatuurvariaties door de temperatuur constant te houden) of door ze weg te filteren (b.v. storingen van voedingen). Storingen kunnen uit een meetsignaal worden gefilterd door ze te elimineren voor ze het meetelement bereiken (b.v. trillingsdempers gebruiken) of ze uit het uitgangssignaal van het meetelement te filteren.

Het hangt van de amplitude van het stoorsignaal af welke methoden van filteren men toe zal passen. Filteren van een electricch uitgangssignaal zal meestal eenvoudiger zijn.

Filteren van het ingangssignaal zal nodig worden, indien de som van het meetsignaal en het stoorsignaal de verzadigingsgrens van het meetinstrument overschrijdt. Een meetwaarde die boven de verzadigingsgrens van het meetinstrument uitkomt geeft geen bijdrage in het uitgangssignaal meer.

Aan de hand van figuur 6.1, waar de meetwaarde bijna de verzadigingsgrens van het meetinstrument bereikt, is dit eenvoudig in te zien. Indien op de te meten grootte een sinusvormige stoorgrootte wordt gesuperponeerd, zodat de verzadigingsgrens wordt overschreden, wordt de gemiddelde meetwaarde door deze storing verlaagd. Bij sinusvormige storingen is de gemiddelde bijdrage van deze storing gelijk nul. Worden van de sinus de maximale waarden begrensd, dan wordt het gemiddelde kleiner dan nul.

De uitgangsgrootte van het meetelement wordt nu lager, dan indien geen storing aanwezig was.

Bij stoorsignalen van enige betekenis moet hier rekening mee worden gehouden.

Meestal kan het meetbereik worden aangepast, zodat het meetinstrument niet boven het meetbereik wordt belast.

Electrische stoorsignalen kunnen met verschillende soorten filters worden weggefilterd.

Er wordt onderscheid gemaakt tussen passieve en actieve filters. Passieve filters zijn filters, waarin alleen elementen worden toegepast die energie consumeren. Actieve filters bevatten elementen die de aan het filter toegevoerde energie kunnen versterken. In passieve filters worden alleen weerstanden, condensatoren en zelfinducties toegepast en in actieve filters ook versterkers.

### 6.1. Het gebruik van passieve filters.

Het eenvoudigste passieve filter is het RC netwerk. Indien het netwerk als laagdoorlaat filter is geschakeld (fig. 6.2), geldt:

$$\frac{e_o}{e_i} = \frac{1}{1+j\omega\tau} \quad (\tau = RC) \quad (6.1)$$

(De karakteristiek is getekend in fig. 6.4).

Indien één filter onvoldoende is kunnen twee filters achter elkaar worden geschakeld (fig. 6.3). Dan wordt de verhouding tussen het uitgangssignaal ( $e_o$ ) en hetingangssignaal ( $e_i$ ):

$$\frac{e_o}{e_i} = \frac{1}{1 + j\omega(\tau_1 + \tau_2 + R_1 C_2) - \omega^2 \tau_1 \tau_2} \quad (6.2)$$

Hierin is  $R_1 C_2$  de interactieterm.  $C_2$  moet n.l. ook via  $R_1$  worden opgeladen. De invloed van de interactieterm is in fig. 6.4 te zien. Wanneer  $R_1 C_2 = 0$  is, kan de schakeling beschouwd worden als 2 RC filters, die elkaar niet belasten. Ook indien  $R_1 C_2 \leq 0,1$  is, (d.w.z.  $R_2 > 10R_1$ ), zijn de afwijkingen ten opzichte van de onbelaste filters minder dan 2%.

De schakeling kan dan worden opgevat als de serieschakeling van twee aparte RC filters.

Bij grotere waarden van  $R_1 C_2$  ontstaan grote fouten en bij  $R_1 C_2 \approx 10$  zijn in de karakteristiek 2 hellingen te herkennen n.l. het eerste deel van  $\omega = 0,1$  tot  $\omega = 10$ , waar de helling gelijk is aan die van een enkel RC netwerk. Voorbij  $\omega = 10$  krijgt de helling de dubbele waarde.

Het kan van het te corrigeren systeem afhangen welke waarden voor de R's en C's worden gekozen.

Wanneer een filter wordt belast komt dit tot uiting in de overdrachthouding. Voor een eerste orde filter wordt dit (zie fig. 6.5)

$$\frac{e_o}{e_i} = \frac{1}{\frac{R_B + R_1}{R_B} + j\omega\tau} \quad (\tau = R_1 C_1) \quad (6.3)$$

en voor twee eerste orde filters in serie (fig. 6.6)

$$\frac{e_o}{e_i} = \frac{1}{\frac{R_1 + R_2 + R_B}{R_B} + j\omega(\tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \frac{R_2}{R_B} + R_1 C_2) - \omega^2 \tau_1 \tau_2} \quad (6.4)$$

Hieruit blijkt, dat een belasting de uitgangsamplitude verlaagt in de verhouding van de belastingsweerstand tot de totale ohmse weerstand, mits  $\omega$  voldoende laag is. In figuur 6.7 is (6.3) grafisch uitgezet. Het is gunstig om  $R_1$  zo klein mogelijk te houden, dan kan ook de interactie-

term uit (6.2) zo klein mogelijk worden gehouden. In (6.4) is een tweede interactieterm aanwezig n.l.  $\tau_1 \frac{R_2}{R_B}$ . Kies nu  $R_B > 10 R_2$ , dan is deze invloed evenals die van  $R_1 C_2$  ( $< 0,1 \tau_1$  of  $< 0,1 \tau_2$ ) te verwaarlozen. Uit het voorgaande volgt dat, indien  $R_2 > 10 R_1$  en  $R_B = 10 R_2 = 100 R_1$ , de verzwakking van het uitgangssignaal is:

$$\frac{R_B}{R_1 + R_2 + R_B} \approx 0,89.$$

In veel gevallen is  $R_B$  een meetinstrument. Indien de eigen frequentie hiervan gunstig is, kan het meetinstrument (snelle galvanometer) als extra filterelement worden gebruikt. Als vuistregel kunnen wij stellen dat de overdrachtsverhouding van een filter, dat is opgebouwd uit een aantal RC secties ongeveer gelijk is aan het product van de afzonderlijke overdrachtsverhoudingen, indien de ohmse weerstanden van de opeenvolgende secties steeds een factor 10 (of meer) groter worden en de afsnijfrequenties gelijk blijven.

## 6.2. Het gebruik van actieve filters.

In actieve filters worden versterkerelementen toegepast. Een voorbeeld van zo'n filter<sup>10)</sup> is in figuur 6.8 geschetst. De overdrachtsverhouding kan als volgt worden afgeleid.

$$e_i = V + i_1 R_1$$

$$e_o = V + i_4 R_3$$

$$e = i_2 R_2$$

$$e = \frac{i_3}{j\omega C_1}$$

$$i_2 = i_1 + i_4 - i_3$$

Hierbij is aangenomen, dat de ingangsspanning van de versterker = 0. Voor versterkers met een zeer hoge versterkingsfactor (rekenversterker) is deze benadering toelaatbaar.



Het resultaat wordt dan:

$$\frac{e_o}{e_i} = -\frac{R_3}{R_1} \left\{ \frac{1}{1 + j\omega C_2 \left( \frac{R_2 R_3}{R_1} + R_2 + R_3 \right) + (j\omega)^2 C_1 R_3 C_2 R_2} \right\} \quad (6.5)$$

Wanneer  $\omega = 0$ , is:  $\frac{e_o}{e_i} = -\frac{R_3}{R_1}$  d.w.z. dat de uitgangsspanning in tegenfase is ten opzichte van de ingangsspanning.

Het gedeelte van vergelijking (6.5) tussen de accoladen heeft dezelfde gedaante als de algemene vergelijking van de overdrachtsverhouding van een tweede orde systeem

$$\frac{e_o}{e_i} = \frac{1}{1 + 2j \frac{\omega}{\omega_o} \zeta + \left( \frac{j\omega}{\omega_o} \right)^2} \quad (6.6)$$

Vergelijken we deze twee vergelijkingen, dan zien we dat:

$$\omega_o^2 = \frac{1}{C_1 C_2 R_2 R_3}$$

of: 
$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2 R_2 R_3}} \quad (6.7)$$

en: 
$$\zeta = \sqrt{\frac{(R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1})^2}{4R_2 R_3 C_1}} \quad (6.8)$$

Hieruit kan bij aanname van enkele grootheden de benodigde weerstanden en condensatoren worden berekend, die nodig zijn om een gewenste  $\omega_o$  en  $\zeta$  te verkrijgen. In  $R_1$  moet ook de uitgangsimpedantie van de voorgaande schakeling in aanmerking worden genomen.

Een voordeel van dit actieve filter is, dat de uitgangsimpedantie die van een versterker is en in veel gevallen laagohmig. Het filter mag dus worden belast.

Een tweede voordeel is dat de ingangsspanning kan worden versterkt

(verhouding  $\frac{R_3}{R_1}$ ) of zonodig verzwakt.

Wordt in het filter een verzwakking toegepast, dan behoeft achter de uitgang geen verzwakker te worden gebruikt.

Hierdoor kan de ruis van een verzwakker worden geëlimineerd.

Een derde voordeel is, dat in het filter met het meetsignaal een gelijkspanning kan worden gesommeerd, zodat de uitgangsspanning altijd dezelfde polariteit heeft. (Dit is soms gewenst).

Een nadeel van elk filter is, dat er een extra faseverschuiving optreedt.

Indien de faseverschuiving als functie van de frequentie lineair verloopt, komt deze faseverschuiving overeen met een vaste tijdvertraging voor dit frequentiegebied n.l.  $\delta = a \cdot \omega$  (6.9)

De hoek  $\delta$  (radialen) veroorzaakt een vertraging van  $\frac{\delta}{2\pi\omega}$  seconden.

Nu is deze vertragingstijd gelijk aan:

$$t = \frac{a \cdot \omega}{2\pi\omega} = \frac{a}{2\pi}$$

seconden en dus onafhankelijk van de frequentie in het beschouwde gebied.

## 7. Het gebruik van gevoelige drukmeters.

Het voorgaande is toegepast bij het meten van kleine hoogteverschillen met behulp van de in hoofdstuk 5 beschreven instrumenten. Met een gevoelig instrument (b.v.  $\pm 2$  mb) kan een hoogteverschil van maximaal  $\pm 16,7$  meter worden doorlopen op 0 m hoogte. Op grotere hoogte wordt dit meer (op 2500 m hoogte  $\pm 21,2$  m en op 10.000 m hoogte  $\pm 49,4$  m). Indien een verschildrukmeter als statoscoop wordt gebruikt kan worden geconstateerd, hoe groot de afwijkingen van een horizontale vlucht zijn. Het is mogelijk om met twee gevoelige drukmeters (elk met een meetbereik van  $\pm 2$  mb) een groter hoogteverschil te meten dan met één instrument, door ze na elkaar in te schakelen.

De twee drukmeters worden geschakeld, zoals in figuur 7.1 is getekend. De beide zijden van de drukmeters staan in verbinding met de ruimte, waarvan de druk moet worden gemeten. De ene zijde van de drukmeter is via

eenleiding direct met deze ruimte verbonden. De andere zijde van de drukmeter is via twee wegen met dezelfde ruimte verbonden. De ene weg is met kraan A af te sluiten (voor de andere drukmeter is dit kraan B). De andere weg die door twee thermosflessen leidt is door kraan C (of kraan D) af te sluiten.

Tijdens het meten worden de kranen in een speciale volgorde bediend. Bij het begin van de meting worden de kranen A en B gelijktijdig gesloten. Tevens wordt b.v. kraan C gesloten en kan met meetelement I worden gemeten. Wanneer meetelement I ongeveer 80<sup>o</sup>/o van het meetbereik heeft doorlopen wordt kraan D gesloten. Hierdoor begint meetelement II te meten. 0,5 sec. na het inschakelen van meetelement II wordt kraan C geopend en wordt het drukverschil over meetelement I weer nul. Wanneer meetelement II ongeveer 80<sup>o</sup>/o van het meetbereik heeft doorlopen wordt kraan C gesloten en begint I weer te meten. 0,5 sec. na het sluiten van C wordt kraan D geopend en kan de cyclus worden herhaald. De meting wordt beëindigd door de kranen A en B te openen.

De meetelementen meten gedurende een tijd van 0,5 sec. gelijktijdig. Hierdoor kan de juiste aansluiting van de meetpunten worden verkregen. Figuur 7.2 is een voorbeeld van een meting met twee drukmeters.

Dit instrument kan buiten de bovengenoemde meting worden gebruikt voor alle metingen, waar kleine drukverschillen moeten worden gemeten.

Voorbeelden hiervan zijn:

1. Het meten van kleine gas- of vloeistofsnelheden
2. Het meten van stroomsnelheden in leidingen.

De A.B.C.-drukmeters worden met succes toegepast bij research aan C.V.-ketels, om het ontstekingslawaai te verminderen. Andere toepassingen zijn het meten van windvlagen om gebouwen of het meten van drukken in grenslagen om modellen in stromingen.

Wanneer drukstoten moeten gemeten, moet het instrument in staat zijn deze drukfluctuaties te volgen. Omdat de tijdconstante van een drukmeter voornamelijk wordt bepaald door de toevoeropening en het eigen volume van de drukmeter, moet de toevoeropening een zo klein mogelijke weerstand bezitten en het eigen volume van de drukmeter zo klein mogelijk zijn. Aan deze voorwaarden is voldaan, wanneer het gevoelige membraan direct in contact wordt gebracht met de stof, waarvan de druk moet worden gemeten

(b.v. in de wand van een buis).

De hiervoor beschreven drukmeters hebben in de enkele (cilindrische) uitvoering (zie fig. 5.1A) een tijdconstante van 0,01 sec. en in de dubbele uitvoering is de tijdconstante 0,05 sec.

Om kleinere drukverschillen met deze drukmeter te kunnen meten moet de verplaatsingsmeter die de uitwijking van het membraan meetgevoeliger worden. In de beschreven uitvoering is het bereik van de verplaatsingsmeter  $\pm 30 \mu$ .

Met een capacitieve methode <sup>11)</sup> kunnen bij een afstand tussen de elektroden van 0,1 mm variaties van  $10^{-5}$  mm worden gemeten. Het membraan moet dan vlak zijn.

De in de beschreven drukmeters toegepaste verplaatsingsopnemers worden ook gebruikt in drukmeters voor hoge drukken.

#### 8. Het ijken van drukmeters.

Het ijken van instrumenten is noodzakelijk om te controleren of de instrumenten voldoen aan de opgegeven specificaties. Dat bij aankoop een instrument moet worden gecontroleerd spreekt vanzelf. Het geleverde instrument moet toch voldoen aan de opgegeven specificaties.

Ook wanneer een instrument voor een proef wordt gebruikt is het noodzakelijk het instrument te ijken. Dan kan men bij het uitwerken zonedig de aan te brengen correcties in rekening brengen. Het is gewenst een instrument voor en na een experiment te ijken, vooral indien het een experiment betreft dat niet zo gemakkelijk kan worden herhaald. De ijking na de proef is nodig om te kunnen constateren, of het instrument dezelfde prestaties heeft als voor de proef. Indien dit niet het geval is kan een gedeelte van de proef of de gehele proef waardeloos zijn. Het is daarom nuttig om een proef zo op te zetten, dat verschillende grootheden op meer dan een manier uit de metingen zijn af te leiden (b.v. bij vliegproeven kunnen hoogtevariatiën uit drukmetingen en uit integratie van versnellingen worden bepaald). Hiermee heeft men een controlemogelijkheid en is de kans op een waardeloze proef geringer. Bij het ijken van instrumenten is het ook nuttig op twee onafhankelijke manieren te ijken. Het is dan mogelijk om systematische fouten, die met

het ene ijkapparaat niet ontdekt worden met het andere te bepalen, omdat ze daar waarschijnlijk andere waarden hebben.

Men moet proberen de ijkapparaten zo te maken dat ze alleen afhankelijk zijn van grootheden die direct (en nauwkeurig) zijn te meten, zoals b.v. lengte, massa, aantal (eventueel tijd) en zo goed mogelijk onafhankelijk van effecten die systematische fouten kunnen veroorzaken (b.v. invloed van temperatuur, stand of wrijving).

Het is altijd nuttig ook ijkapparaten regelmatig te controleren, omdat er door verouderen, en vervuilen afwijkingen op kunnen treden. Verouderen is bijvoorbeeld het geval bij weerstandsdraad. Afwijkingen van enkele honderdste procenten van normaalelementen zijn geen uitzondering en bij nauwkeurige analoge rekenmachines kunnen de integratiecondensatoren wel worden ingesteld op een gemiddelde waarde, maar deze gemiddelde waarde kan met enkele honderdste procenten per jaar verlopen. Dit is ook het geval met (mica) standaardcondensatoren.

Vervuiling kan optreden bij kwik of andere vloeistoffen in manometers. Instrumenten, waarmee dynamisch wordt gemeten, moeten ook dynamisch worden geijkt. Er moet worden gecontroleerd of de bandbreedte van het te ijken instrument wel groot genoeg is. Ook moet bij het ijken worden nagegaan hoe de frequentie- en fasekarakteristiek is. Er kunnen afwijkingen ontstaan zijn in deze karakteristieken. De fasekarakteristiek is van belang om eventueel tijdcorrecties aan te kunnen brengen, indien verschillende grootheden na elkaar worden gemeten (b.v. met een automatische schakelaar).

Drukmeters kunnen op twee manieren worden geijkt.

1. met behulp van de lengte van een vloeistofkolom die evenwicht maakt met dit drukverschil.
2. door de kracht te meten die evenwicht maakt met het drukverschil indien dit op een gegeven oppervlak werkt.

De onder 1. genoemde apparaten noemt men vloeistofmanometers en de onder 2. genoemde: drukbalansen.

#### Het ijken van drukmeters met vloeistofmanometers.

De vloeistofmanometer bestaat over het algemeen uit een glazen buis,

waarin een vloeistof onder invloed van de druk stijgt of daalt.

De buis is of gebogen (U-buis), of staat in verbinding met een groter vat. (zie figuur 8.1).

Het verschil in hoogte tussen de twee vloeistofniveaus is een maat voor het te meten drukverschil.

$$p = h\gamma \text{ kg/m}^2 \quad (8.1)$$

Wanneer een druk nauwkeurig moet worden bepaald, is het nodig om zowel  $h$  als  $\gamma$  nauwkeurig te kennen, alsmede de factoren die de nauwkeurigheid van de meting kunnen beïnvloeden.

De hierna volgende grootheden bepalen mede de nauwkeurigheid van de drukmeting.

De temperatuur van de manometer en de vloeistof

De afmetingen van de buis en de bak

De oppervlaktespanning van de vloeistof

Het nalopen van een vloeistof langs een wand.

#### 8.1.1. De hoogte van de vloeistofkolom.

De hoogte wordt met een meetlat bepaald. Deze meetlat kan eventueel worden geijkt.

#### 8.1.2. Het soortelijk gewicht van de vloeistof.

Het soortelijk gewicht van vloeistoffen kan nauwkeurig worden bepaald door weging. Het is het best om een vloeistof te gebruiken die gemakkelijk kan worden gezuiverd, niet wordt beïnvloed door licht en weinig vluchtig is. Mengsels van vloeistoffen zijn minder geschikt omdat de vloeistoffen uit een mengsel bijna altijd verschillende vluchtigheid bezitten en de samenstelling van het mengsel dus kan veranderen en daardoor het soortelijk gewicht. Veel gebruikte vloeistoffen zijn: water en alcoholen (van methyl- en aethyl alcohol is het soortelijk gewicht ongeveer 0,8).

1.3. De temperatuur van de manometer en de vloeistof.

Voor een vloeistofmanometer met bak (zie fig. 8.2) geldt:

$$p = \gamma h$$

$$p = \gamma (h_1 + h_2)$$

met  $h_1 A_1 = h_2 A_2$

$$p = \gamma h_1 \left( 1 + \frac{A_1}{A_2} \right) \quad (8.2)$$

De temperatuurinvloed op de verschillende termen in rekening brengend, wordt (8.2):

$$p = \gamma_o (1 + \alpha_1 \Delta t) h_o (1 + \alpha_2 \Delta t) \left[ 1 + \frac{\pi \{r_1 (1 + \alpha_3 \Delta t)\}^2}{\pi \{r_2 (1 + \alpha_4 \Delta t)\}^2} \right]$$

$$= \gamma_o (1 + \alpha_1 \Delta t) h_o (1 + \alpha_2 \Delta t) \left[ 1 + \frac{r_1^2}{r_2^2} \left\{ 1 + 2(\alpha_3 - \alpha_4) \Delta t \right\} \right] \quad (8.3)$$

1.4. De tapsheid van buis en bak.

Indien aan slechts een oppervlak wordt gemeten (dus met nulpuntinstelling bij het begin) moet de buis evenals de vloeistofbak overal hetzelfde oppervlak hebben. De eenvoudigste vorm van zo'n oppervlak is de cilindrische.

Indien de glasbuis conisch is, is het volume op een hoogte  $h_1$  (zie fig. 8.3)

$$\frac{1}{3} \pi h_1 \left\{ 2 r_1^2 - r_2 (r_1 + r_2) \right\}$$

te klein. Met  $r_1 = r_2 + \Delta r$  wordt dit, indien de term met  $(\Delta r)^2$  wordt verwaarloosd:

$$\pi r_1 \Delta r h_1 \quad (8.4)$$

Hierdoor staat de vloeistof in de bak

$$\frac{\pi r_1 \Delta r h_1}{A_2} \quad \text{te hoog} \quad (8.5)$$

Met  $r_1 = 7,5$  mm,  $\Delta r = 0,1$  mm,  $h_1 = 1000$  mm en  $A_2 = \pi (150)^2$  mm<sup>2</sup> wordt dit:

$$\frac{\pi 7,5 \cdot 0,1 \cdot 1000}{r(150)^2} = 0,03 \text{ mm te hoog.}$$

Glasbuis is te verkrijgen met een inwendige diameter die minder dan 0,01 mm varieert. Alleen indien  $A_2$  veel kleiner is dan in het voorbeeld moet er rekening mee worden gehouden.

Wanneer de bak (straal  $r_3$ ) conisch is, wordt de volgende fout gemaakt: De vloeistofhoogte varieert in de bak bij een stijghoogte in de buis van 1000 mm

$$h_2 = \frac{h_1 A_1}{A_2} = \frac{1000 \cdot (7,5)^2 \pi}{\pi \cdot (150)^2} = 2,5 \text{ mm}$$

wanneer over  $h_2$  de straal  $\Delta r$  varieert is de volumefout over dit hoogte-traject:

$$\pi \cdot r_3 \cdot \Delta r \cdot h_2 = \pi 150 \cdot \Delta r \cdot 2,5 = \pi \cdot 375 \Delta r \text{ mm}^3$$

Wordt deze volumefout vergeleken met die van de stijgbuis:

$$\pi r_1 \Delta r h_1 = \pi \cdot 7,5 \cdot \Delta r \cdot 1000 = \pi 7500 \Delta r \text{ mm}^3$$

dan blijkt dat de fout ten gevolge van het conisch zijn in de stijgbuis veel groter is. Aan het zuiver cilindrisch zijn van de bak behoeven we dus niet zulke extreem hoge eisen te stellen.

#### 8.1.5. De capillaire opstijging van de vloeistof.

In een buis, waar vloeistof langs de wand staat, geldt (zie fig. 8.4):

$$\gamma_{23} \cdot \cos \psi + \gamma_{12} - \gamma_{13} = 0 \quad (8.6)$$

Uit de definitie van de oppervlaktespanning is af te leiden hoeveel de vloeistof in een capillair zal stijgen of dalen. (De oppervlaktespanning  $\gamma_{ij}$  is gelijk aan de vrije energie per oppervlakte-eenheid<sup>12</sup>).

Stijgt de vloeistof in een capillair met  $dh$ , dan is de winst aan vrije energie (zie fig. 7.5):

$$2\pi r dh (\gamma_{13} - \gamma_{12}) \quad (8.7)$$



Dit is gelijk aan de toename van de potentiële energie:

$$\pi r^2 dh \gamma h \quad (8.8)$$

(de gehele kolom met lengte h stijgt over een afstand dh).

Wanneer er evenwicht bereikt is, is (8.7) = (8.8)

$$2\pi r dh \gamma_{13} - \gamma_{12} = \pi r^2 dh \gamma h \quad (8.9)$$

of

$$h = \frac{2(\gamma_{13} - \gamma_{12})}{\gamma r} = \frac{2\gamma_{23} \cos \nu}{\gamma r}$$

voor  $\cos \nu = 1$  geldt:

$$h = \frac{2 \gamma_{23}}{\gamma r} \quad (8.10)$$

$\cos \nu = 1$  wil zeggen dat de vloeistof de wand volledig bevochtigt, zoals met water en alcohol het geval is.

Voor water is:

$$\gamma_{23} = 72 \text{ dn/cm}$$

$$\gamma = 1 \text{ g/cm}^3$$

$$hr = \frac{2 \cdot 72}{981} = 0,147 \text{ cm}^2$$

Voor alcohol is:  $\gamma_{23} = 22 \text{ dn} \neq \text{cm}$  en  $\gamma = 0,8 \text{ g/cm}^3$  en wordt

$$hr = 0,056 \text{ cm}^2$$

In figuur 8.6 is het verband tussen h en r uitgezet voor water en alcohol. Kleine variaties van r veroorzaken een variatie in h. Uit (8.10) volgt:

$$dh = - \frac{2 \gamma_{23}}{\gamma r^2} dr \quad (8.11)$$

Voor water is dit bij  $r = 7,5 \text{ mm}$

$$dh = - \frac{14,7}{56} dr = -0,26 dr$$

De verandering in capilaire opstijging is dus ongeveer 1/4 van de variatie in de straal van de buis bij  $r = 7,5$  mm. Bij kleine buisdiameters wordt de waarde  $dh$  belangrijk. Het "-" teken in (8.11) wil zeggen dat  $h$  groter wordt, als de straal van de buis kleiner wordt.

8.1.6. Het nalopen van de vloeistof langs de wand.

Wanneer men een met vloeistof gevulde buis leeg laten lopen zal er aan de wand vloeistof achterblijven. Dit achterblijven van vloeistof wordt naloop of drainage genoemd. Voor het nauwkeurig meten van viscositeiten is dit verschijnsel uitvoerig onderzocht door Tuynman<sup>13)</sup> en Zweegman<sup>14)</sup>. Indien de vloeistof als film aan de wand achterblijft, is door Tuynman afgeleid, dat de achterblijvende hoeveelheid vloeistof gelijk is aan:

$$\Delta V = 4/3 \pi r v t \sqrt{\frac{\eta}{\gamma}} v \quad (8.12)$$

Wanneer wordt aangenomen dat de snelheid constant is, dan is het product  $v \cdot t$  gelijk aan de hoogte van de vloeistofkolom  $h$  en wordt:

$$\Delta V = 4/3 \pi r h \sqrt{\frac{\eta}{\gamma}} \frac{h}{t}$$

De hoogte wordt tengevolge van  $\Delta V$  met een bedrag

$$\Delta h = \frac{\Delta V}{\pi r^2}$$

groter dan zonder naloop. Er loopt een gedeelte naar de bak, (straal  $r_1$ ) zodat de naloop tenslotte wordt:

$$\Delta h' = \Delta h \cdot \frac{r^2}{r^2 + r_1^2}$$

of:

$$\Delta h' = \frac{r^2}{r^2 + r_1^2} \cdot \frac{4}{3} \frac{h}{r} \sqrt{\frac{\eta}{\gamma}} \cdot \frac{h}{t} \quad (8.13)$$

Neemt men als voorbeeld:

$$\begin{aligned} h &= 100 \text{ cm} & \eta &= 1 \text{ cp (water)} \\ r &= 0,75 \text{ cm} & \gamma &= 1 \text{ g/cm}^3 \\ r_1 &= 20 \text{ cm} & t &= 60 \text{ sec.} \end{aligned}$$

dan wordt:

$$\begin{aligned} \Delta h' &= \frac{(0,75)^2}{20^2 + (0,75)^2} \cdot \frac{4}{3} \cdot \frac{100}{0,75} \sqrt{\frac{0,01}{981} \cdot \frac{100}{60}} \\ &= 3 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \end{aligned}$$

gemeten werd de waarde 0,01 mm.

Bij een Betz manometer, waar de waarde  $\frac{r^2}{r^2 + r_1^2} = 1/10$  dus veel groter dan

in het gegeven voorbeeld, waren de verschillen tussen de gemeten en berekende waarden van de naloop kleiner dan 0,01 mm.

De naloop:

$$\Delta h' = \text{const } h \sqrt{\frac{h}{t}}$$

is dus evenredig met  $t^{-1/2}$ . Indien er zekerheid moet zijn dat  $\Delta h$  voldoende klein is, moet lang genoeg worden gewacht. Wanneer  $t$  bekend is, kan  $H$  worden berekend, maar ook omgekeerd kan  $t$  worden berekend bij een gegeven waarde van  $H$ .

De snelheid van uitstromen kan zo worden geregeld dat de gegeven waarde  $\Delta h'$  wordt bereikt op het eindpunt van de uitstroming na  $t$  seconden.

## 2. Het ijken van drukmeters met een drukbalans.

Met drukbalansen moet men een druk, door gebruik te maken van de definitie van druk:

Druk = kracht per oppervlakteëenheid.

Een drukbalans bestaat uit een cilinder, waarin een zuiger vrij op en neer kan bewegen (fig. 8.7).

Tussen de zuiger en de cilinder moet een spleet aanwezig zijn. Wanneer de zuiger in de cilinder in rust is, zal de zuiger de cilinderwand raken, waardoor de wrijving tussen zuiger en cilinder een belangrijke rol gaat spelen. Daarom wordt de zuiger in rotatie gebracht om dit aan-

raken op te heffen en komt er tussen de zuiger en de cilinder een vloeistof- of gasfilm. De wrijving tussen zuiger en cilinder vermindert hierdoor aanzienlijk.

Er zijn drukbalansen waar een vloeistof wordt gebruikt om de zuiger omhoog te duwen, en drukbalansen waarbij een gas wordt gebruikt. Bij de meeste drukbalansen staan de zuiger en de cilinder met de as verticaal opgesteld en roteert de zuiger met de er op geplaatste gewichten.

Bij deze drukbalansen met verticale rotatieas worden verschillende drukken gemeten door het gewicht van de zuiger te veranderen.

Dit wordt meestal gedaan door stapsgewijs gewichten op de zuiger te plaatsen. Het kleinste gewicht is dan het gewicht van de zuiger zelf.

Er is echter ook een uitvoering, waarbij de druk continue kan worden veranderd en wel met de hellende buis drukbalans <sup>15)</sup>. (figuur 8.8.).

Bij dit instrument draait de cilinder en staat de zuiger stil. De cilinder wordt via een rubber snaar door een motor aangedreven, en draait om een zo goed mogelijk passend vast luchtlager.

De rotatieas kan hierbij over een hoek van  $0^{\circ}$  tot bijna  $90^{\circ}$  ten opzichte van de horizontaal kantelen. Er kan dus ook een drukverschil van "0" mee worden bepaald.

Indien de zuiger rotatiesymmetrisch was, zou ze meedraaien. Daarom is de zuiger met een excentrisch gewicht uitgevoerd.

Wanneer tijdens een meting de zuiger in rust is, is er evenwicht tussen de component van het gewicht van de zuiger in axiale richting en de kracht die door de druk tegen de zuiger wordt uitgeoefend. Dan geldt:

$$G \sin \beta = p.A. \quad (8.14)$$

Met de waarden uit fig. 8.9 wordt dit:

$$G \frac{y}{L} = p.A$$

of

$$p = \frac{Gy}{LA} \quad (8.15)$$

Alle grootheden uit deze formule kunnen nauwkeurig worden bepaald.

G: het gewicht van de zuiger kan met een nauwkeurigheid van  $1:10^6$  worden bepaald door de Dienst van het IJkwezen.

y: De afstand waarover het eind van de grondplaats wordt opgetild. Deze kan worden bepaald met eindmaten en een fijninstelling met een micrometer. Deze afstand kan met een nauwkeurigheid van beter dan 0,01 mm worden ingesteld (Bereik 300 mm)

L: Deze afstand is nauwkeurig opgemeten (0,01 mm op een afstand van 350 mm)

A: Deze waarde is het oppervlak van de zuiger plus het halve spleetoppervlak. Deze waarde voor A geldt,<sup>16)</sup> wanneer de zuiger zich concentrisch in de cilinder bevindt en de snelheid, waarmee de zuiger zakt alleen wordt veroorzaakt door lek in de spleet.

Gemeten is aan een zuiger

$$D_{\max} = 50,676 \text{ mm}$$

$$D_{\min} = 50,673 \text{ mm}$$

$$D_{\text{gem}} = 50,674_5 \text{ mm}$$

en aan een cilinder:

$$D_{\max} = 50,695 \text{ mm}$$

$$D_{\min} = 50,692 \text{ mm}$$

$$D_{\text{gem}} = 50,693_5 \text{ mm}$$

De dubbele spleet ( $2\Delta r$ ) is dus maximaal 0,022 mm en minimaal 0,016 mm.

De spleet is dus gemiddeld 0,0095 mm wijd met variaties van  $\pm 0,0015$  mm ( $\partial r$ ).

Het zuigeroppervlak is ongeveer  $\pi r^2 = \pi (25,337)^2 \approx 2000 \text{ mm}^2$ .

Het halve spleetoppervlak:

$$\frac{1}{2} \cdot 2\pi \cdot r \cdot \Delta r = 1,51 \text{ mm}^2$$

De variaties in het spleetoppervlak : ongeveer:

$$2\pi r \partial r = 0,2 \text{ mm}^2.$$

Dit is 0,01<sup>o</sup> van het spleetoppervlak.

De maximale fout die wordt gemaakt bij het meten van een druk is:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta p}{p} &= \frac{\Delta G}{G} + \frac{\Delta y}{y} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta A}{A} \\ &= \frac{1}{10^6} + \frac{1}{30.000} + \frac{1}{35.000} + \frac{1}{10.000} = 1,6 \cdot 10^{-4}\end{aligned}$$

en de middelbare fout:

$$\frac{\Delta p}{p} = \sqrt{\left(\frac{1}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{33}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{29}{10^6}\right)^2 + \left(\frac{100}{10^6}\right)^2} = 1,1 \times 10^{-4}.$$

Aan het oppervlak van de zuiger en cilinder moet dus de meeste zorg worden besteed om een grote nauwkeurigheid te krijgen. Zowel de zuiger als de cilinder moeten een geringe onrondheid vertonen. Ook moeten de zuiger en cilinder cilindrisch zijn om een constante spleetwijdte te hebben. De meting is dan onafhankelijk van de plaats van de zuiger in de cilinder.

Wanneer de cilinder draait werken er op de zuiger twee koppels die met elkaar evenwicht maken:

1<sup>e</sup> Het koppel ten gevolge van de viscositeit van de lucht in de spleet

$$M = \frac{\eta \ 2\pi \ell \omega}{\frac{1}{r^2} - \frac{1}{(r+\Delta r)^2}} \quad (8.16)$$

In deze formule is:  $\ell$  de lengte van de spleet (zuiger)(axiaal).

2<sup>e</sup> Het koppel dat ontstaat ten gevolge van de excentrische masse

$$M = G \cdot x \sin \varphi \quad (8.17)$$

Zie figuur 8.10.

Dus: 
$$G \cdot x \cdot \sin \varphi = \frac{\eta \ 2\pi \ell \omega}{\frac{1}{r^2} - \frac{1}{(r+\Delta r)^2}} \quad (8.18)$$

Dit is het geval wanneer de zuiger horizontaal staat. Bij een helling  $\beta$  drukt de zuiger op de wand van de cilinder met een gewicht van:

$$G_1 = G \cos \beta \quad \text{zie fig. 8.11.}$$

Nu wordt:

$$G \cos \beta \sin \varphi = \frac{\eta \cdot 2\pi \ell \omega}{\left\{ \frac{1}{r^2} - \frac{1}{(r+\Delta r)^2} \right\} \cdot x} \quad (8.19)$$

Wanneer  $\sin \varphi = 1$  is geworden gaat de zuiger mee roteren (fig. 7.10). Voor een bepaald gewicht van de zuiger wordt  $\beta$  dus bepaald door de afmetingen van de zuiger de diameter van de cilinder en de rotatiesnelheid. De hoek  $\beta$  waarbij de zuiger gaat roteren wordt dan (aangenomen is dat  $\sin \varphi = 1$ ):

$$\cos \beta = \frac{\eta \cdot 2\pi \ell \omega}{G \left( \frac{1}{r^2} - \frac{1}{(r+\Delta r)^2} \right) x} \quad (8.20)$$

$$\cos \beta = \frac{\eta \cdot 2\pi \ell \omega r^3}{G \cdot 2\Delta r x} \quad (8.21)$$

Wanneer bijvoorbeeld:

$\eta = 180 \cdot 10^{-6} \text{ dn/sec/cm}^2$	$G = 550 \text{ g}$
$\omega = 2.700 \text{ rad/min}$	$\Delta r = 0,0009 \text{ cm}$
$r = 2,5 \text{ cm}$	$x = \frac{r}{2}$
$\ell = 5 \text{ cm}$	

is, dan wordt:  $\cos \beta \approx 5 \cdot 10^{-3}$   
 $\beta \approx 89^{\circ}40'$

Bij axiaal bewegende zuiger werkt er op de zuiger een kracht die tegengesteld is aan de bewegingsrichting. Deze kracht <sup>17)</sup> is:

$$K = \frac{\eta \cdot 2\pi \cdot v \cdot \ell}{\ln \left( 1 + \frac{\Delta r}{r} \right)} \quad (8.22)$$

deze formule wordt voor kleine  $\frac{\Delta r}{r}$  :

$$K = \frac{\eta 2\pi \cdot v \cdot \ell r}{\Delta r} \quad (8.23)$$

Hierin is  $v$  de valsnelheid. (tengevolge van het drukverschil aan beide zijden van de zuiger stroomt er lucht door de spleet waardoor de zuiger zakt).

Nemen we bijvoorbeeld  $v = 0,1$  cm/sec (een snelheid die gemakkelijk kan worden waargenomen), dan wordt:

$$K = 1,6 \text{ dn}$$

Deze kracht is ten opzichte van het gewicht van de zuiger, dat 550 gram bedraagt, te verwaarlozen.

Indien de zuiger in evenwicht is, is het drukverschil over de spleet gelijk aan het te meten drukverschil. Tengevolge van dit drukverschil stroomt er lucht door de spleet. Voor een onsamendrukbare stof geldt voor de stroming door een rechthoekige spleet:

$$Q = \frac{\pi p r (\Delta r)^3}{6\eta l} \quad (8.24)$$

De snelheid waarmee de zuiger zakt is:

$$\frac{Q}{\pi r^2} = \frac{p (\Delta r)^3}{6\eta l r} \quad (8.25)$$

met  $p = 250$  mm water en de andere waarden zoals hierboven staan wordt de daalsnelheid  $14 \cdot 10^{-3}$  mm/sec. Een snelheid die veel lager is dan in (8.23) is aangenomen.

De effecten waardoor de zuiger sneller zakt dan volgens (8.25) is berekend kunnen zijn:

lekkage door het vaste luchtlager en het pompeffect.

Het lekken van het lager kan worden nagegaan door het vaste lager met een druppel dunne olie af te dichten.

Het pompeffect kan ontstaan, wanneer de spleet tussen zuiger en cilinder niet op elke plaats dezelfde waarde heeft, maar variaties vertoont, die spiraalvormig kunnen zijn evenals krasjes in een van de oppervlakken. Er kunnen dan stromingen in axiale richting ontstaan. De stromingsrichting hangt dan af van de draaiingsrichting van de cilinder.

De temperatuursinvloed kunnen we met behulp van (8.14) nagaan. De grootheden  $y, L$  en  $A$  zijn afhankelijk van de temperatuur.

$$p = G \cdot \frac{y(1+\alpha_1 \Delta t)}{L(1+\alpha_2 \Delta t)A(1+2\alpha_3 \Delta t)} = p_0 \left\{ 1 + (\alpha_1 - \alpha_2 - 2\alpha_3) \Delta t \right\} \quad (8.26)$$



De fout tengevolge van de temperatuurvariatie is dus

$$\frac{p - p_o}{p_o} = (\alpha_1 - \alpha_2 - 2\alpha_2) \Delta t \quad (8.27)$$

Bij een uitvoering met:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 12 \cdot 10^{-6} \text{ (staal)} \\ \alpha_2 &= 23 \cdot 10^{-6} \text{ (aluminium)} \\ \alpha_3 &= 8 \cdot 10^{-6} \text{ (glas)} \end{aligned}$$

is:

$$\frac{p - p_o}{p_o} = -27 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

Door goede materialen te kiezen, kan men:

$$\alpha_1 = \alpha_2 - 2\alpha_3 \text{ maken}$$

Dit kan ongeveer worden verwezenlijkt wanneer:

$$\alpha_1 = \alpha_2 \text{ en } \alpha_3 < 10^{-6}$$

b.v. met kwarts ( $\alpha_3 = 5,4 \cdot 10^{-7}$ ) en verder L en y van hetzelfde materiaal te maken. Dan is:

$$\frac{p - p_o}{p_o} = -1 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}.$$

Het 0-punt van de drukbalans kan elke keer voor een of een reeks metingen worden gecontroleerd door bij een drukverschil  $p = 0 \text{ kg/cm}^2$  de waarde voor y zo in te stellen, dat de zuiger niet beweegt.

Om te controleren of deze stand ook reproduceerbaar is, moet de basis reproduceerbaar kunnen worden ingesteld. Hiervoor wordt een waterpas gebruikt dat een gevoeligheid heeft van minstens

$$\frac{0,01}{350} \text{ radialen} \approx 6''$$

Een waterpas met een gevoeligheid van 2 boogsec. is hiervoor goed bruikbaar.

9. Conclusies.

Bij het werken met nauwkeurige drukmeters moet ervoor worden gezorgd dat storende invloeden zoveel mogelijk worden vermeden of geëlimineerd en dat het instrument kan worden geijkt.

Bij de meeste drukmeters wordt door de druk een verplaatsing teweeggebracht. Met een capacatieve meting kunnen de kleinste verplaatsingen worden gemeten.<sup>11)</sup>

Om met de beschreven drukmeter nauwkeurig te kunnen werken moet de drukmeter en de onderdelen van het demodulatiecircuit op een constante temperatuur worden gehouden.

Om voor de stand van de drukmeter te kunnen corrigeren moet de stand van het vliegtuig tijdens vliegproeven worden bepaald.

Aan RC filters kan eenvoudig worden gerekend, indien de ohmse weerstand van elke volgende sectie steeds minstens 10 maal zo groot is als de beschouwde en de afsnijfrequenties gelijk blijven.

De filters, die nodig zijn om storende signalen weg te filteren kunnen worden ontworpen met een dempingsverhouding kleiner dan 1, indien alleen passieve (RC) elementen worden gebruikt en groter dan 1, indien ook actieve elementen worden toegepast.

De hellende-buis drukbalans is minder afhankelijk van storende invloeden dan een vloeistofmanometer en biedt daarom de beste perspectieven bij het ijken van drukmeters. De beschreven drukbalans kan zo worden ontworpen dat de temperatuurinvloed te verwaarlozen is. Bij een lekkage in het systeem blijft de druk constant. Zolang de zuiger zakt verandert het volume.

10. Literatuur.

1. Klopfer, A. An ionization gauge for measurement of ultra-high vacua.  
Trans 8<sup>th</sup> Vac. Symp. and Sec. Int. Congress 1961 p. 439.
2. Booy, M. Elektrische vacuümmeetapparatuur  
P T 18 (1963, 910<sup>e</sup> en 951<sup>e</sup> en 19 (1964), 13e, 45e, 80e, 155e en 181e.
3. Jansen, C.G.J. A McLeod manometer with prescribed volumes for use as a standard instrument.  
Venema, A. Vacuum 9 (1959), 219.
4. Bridgman, P.W. The physics of high pressures.  
Londen 1931.
5. Halford, R.J. Pressure measurement using vibrating cylinder pressure transducer.  
Instr. Pract. 18 (1964), 823.
6. Neubert, H.K.P. Instrument Transducers.  
Oxford 1963.
7. MacDonald, W.R. Acceleration transducers of the force-balance type.  
Proc. First flight test instrumentation Symp. 1960 p. 15.
8. Pengelly, A.E. Apparatus for the measurement of gas velocity in furnaces and models.  
J.Sci. Instr. 37 (1960), 339.
9. Gondet, P. Mesures et enregistrement des faibles pressions dans les gas.  
Mesures 26 (1961), 657.
10. Huskey, H.D. Computer Handbook p 2-19.  
Korn, G.A.
11. Waard, P. de Electronic instruments for capacitive displacement gauge instruments.  
De Ing. 41 (7 Oct 1960), 0-38.
12. Kronig, R. Leerboek der natuurkunde.  
3<sup>e</sup> druk hoofdstuk VII par. 7.



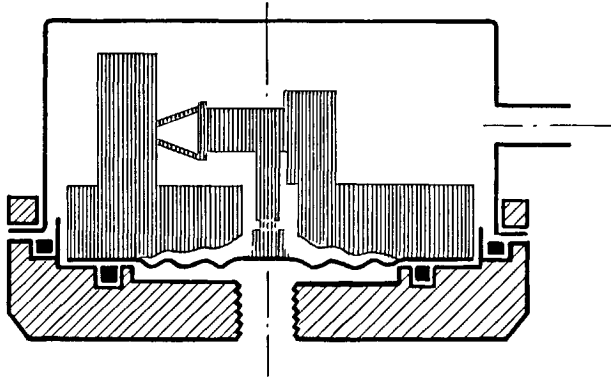


Fig.4.1: Drukmeter, beschermd tegen 1-zijdige overdruk.

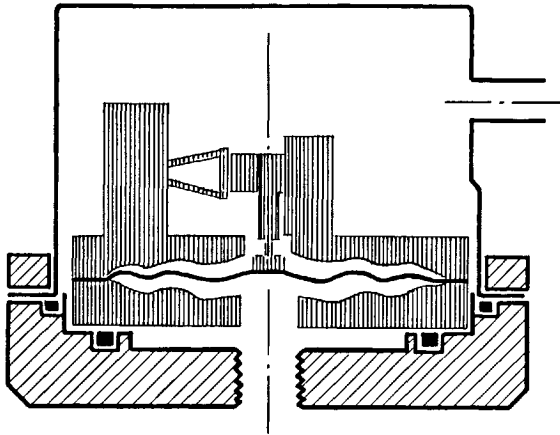


Fig.4.2: Drukmeter, beschermd tegen 2-zijdige overdrukken.

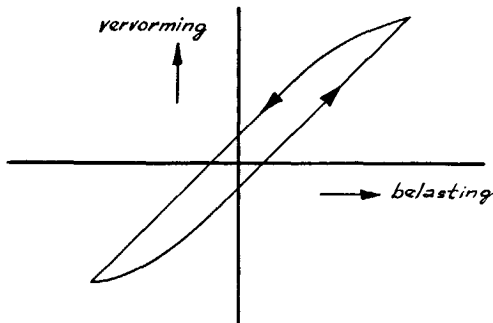


Fig.4.3: Hysteresis lus

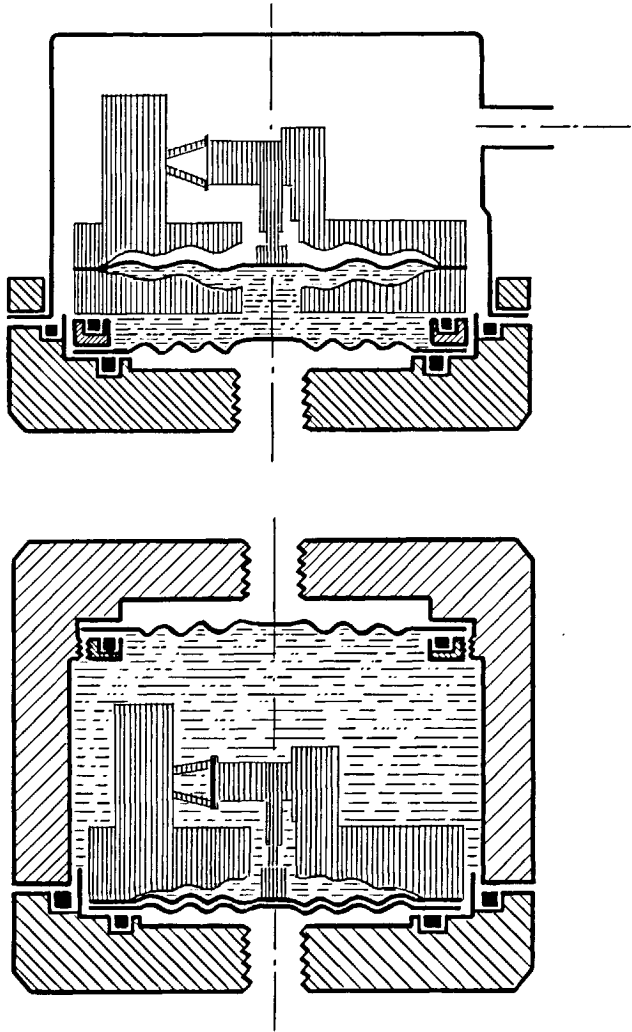


Fig.4.4: Drukmeters, waarvan het membraan tegen corrosie is beschermd.

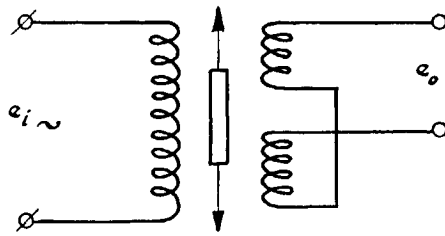


Fig.4.5: Differentiaal transformator.

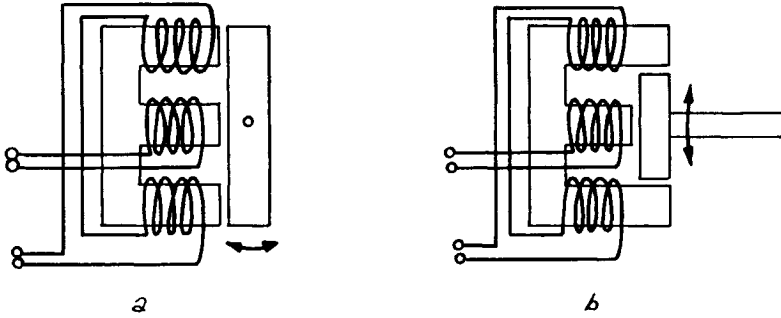


Fig.4.6: Inductieve verplaatsingsopnemers met E-kern en I-vormig yuk.

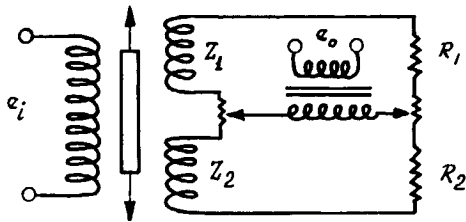


Fig.4.7: Een mogelijke brugschakeling voor een inductieve verplaatsingsmeter.

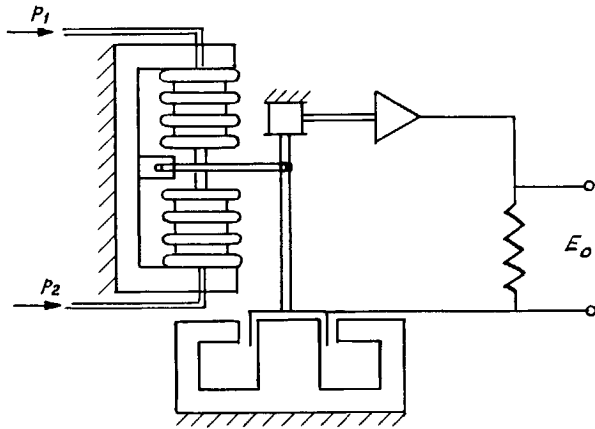


Fig.4.8: De C.E.C. Electromanometer.

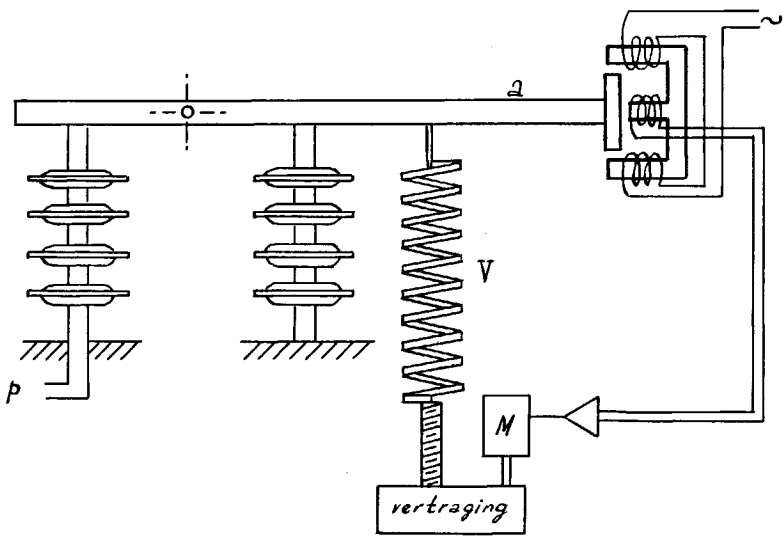
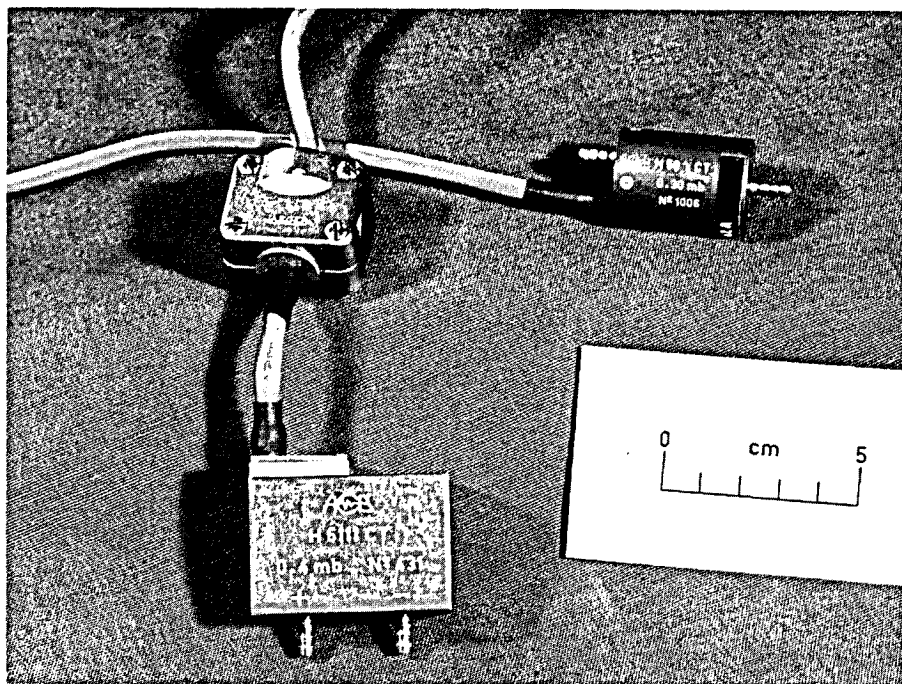
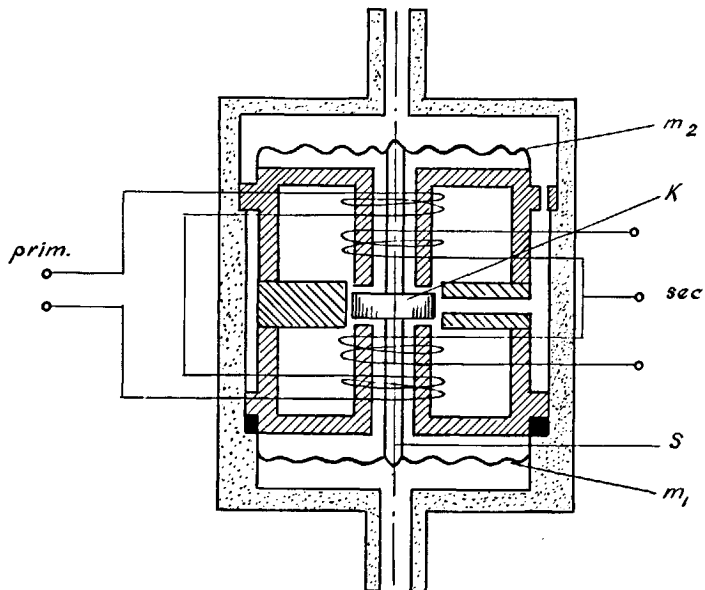


Fig.4.9: De Kelvin Hughes Force-Balance drukmeter.





*Fig. 5.1a: ACB drukmeters*



*Fig. 5.1b: Doorsnede ACB drukmeter, Type H50*

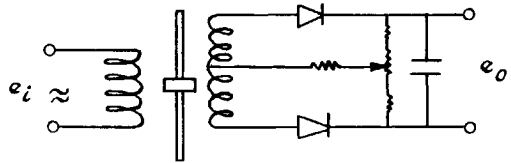


Fig. 5.2: Demodulatorschakeling van de ACB drukmeters.

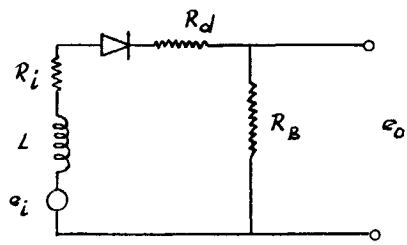


Fig. 5.3:

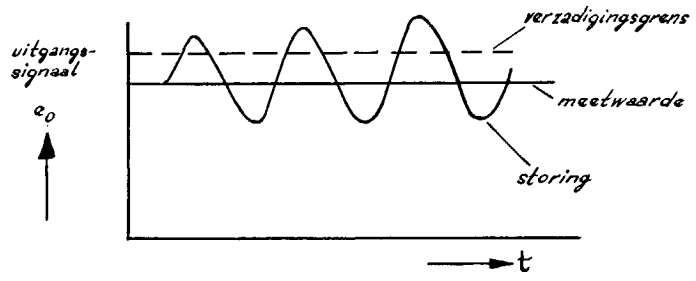


Fig. 6.1:

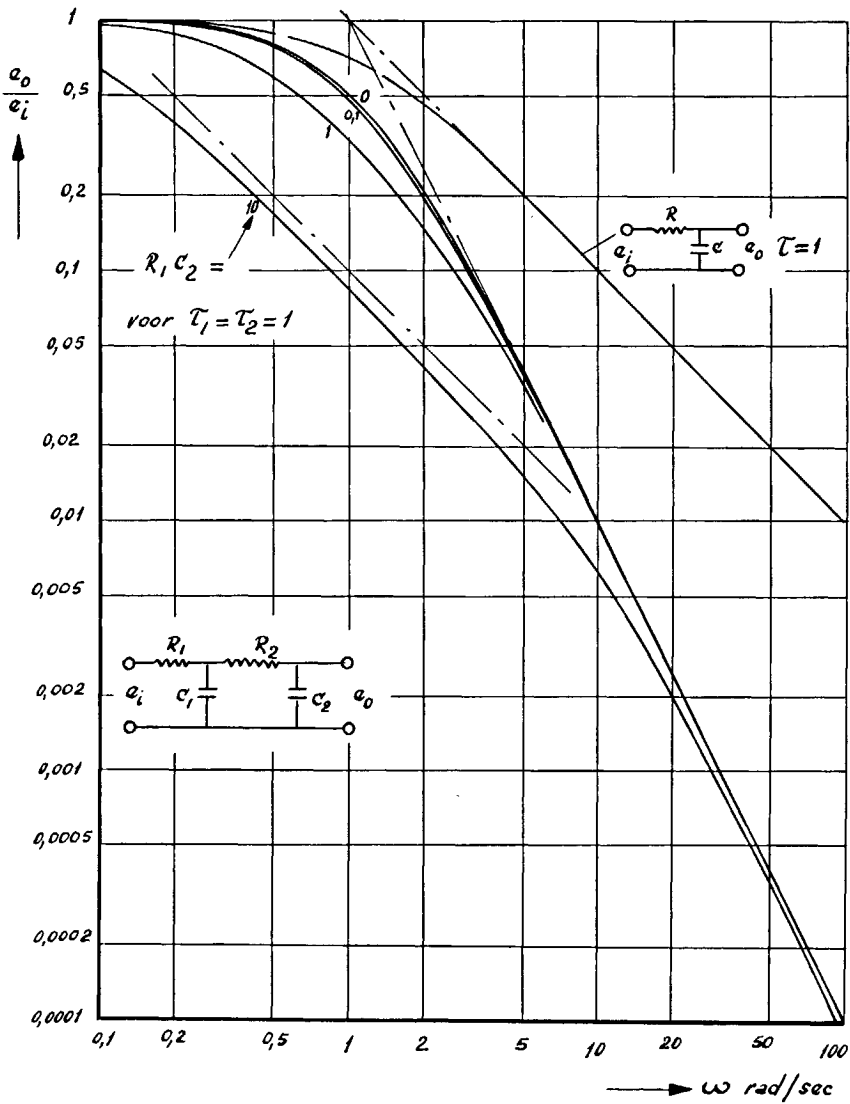


Fig. 6.4: Frequentiekaracteristieken van 1 en 2 eerste orde R.C. netwerken met verschillende waarden voor  $R_1, C_2$ .

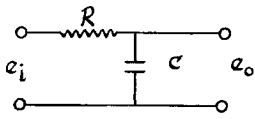


Fig. 6.2: RC filter

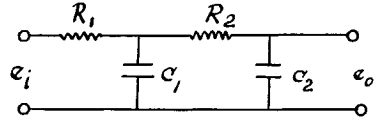


Fig. 6.3: Dubbel RC-filter.

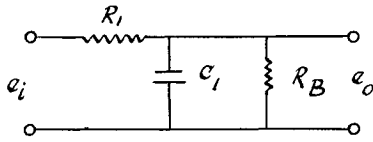


Fig. 6.5: Belast R.C. filter

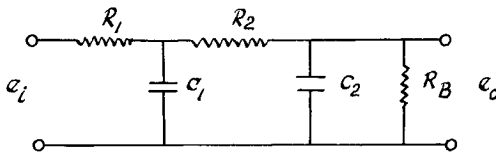


Fig. 6.6: Belast dubbel RC filter.

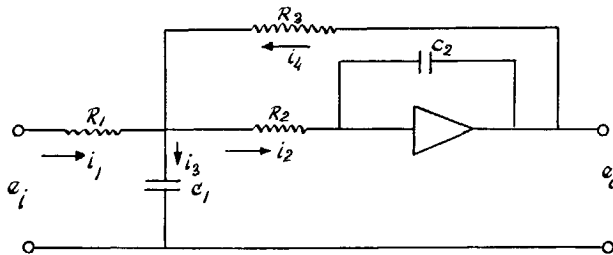


Fig. 6.8: Actief 2<sup>o</sup>orde filter.

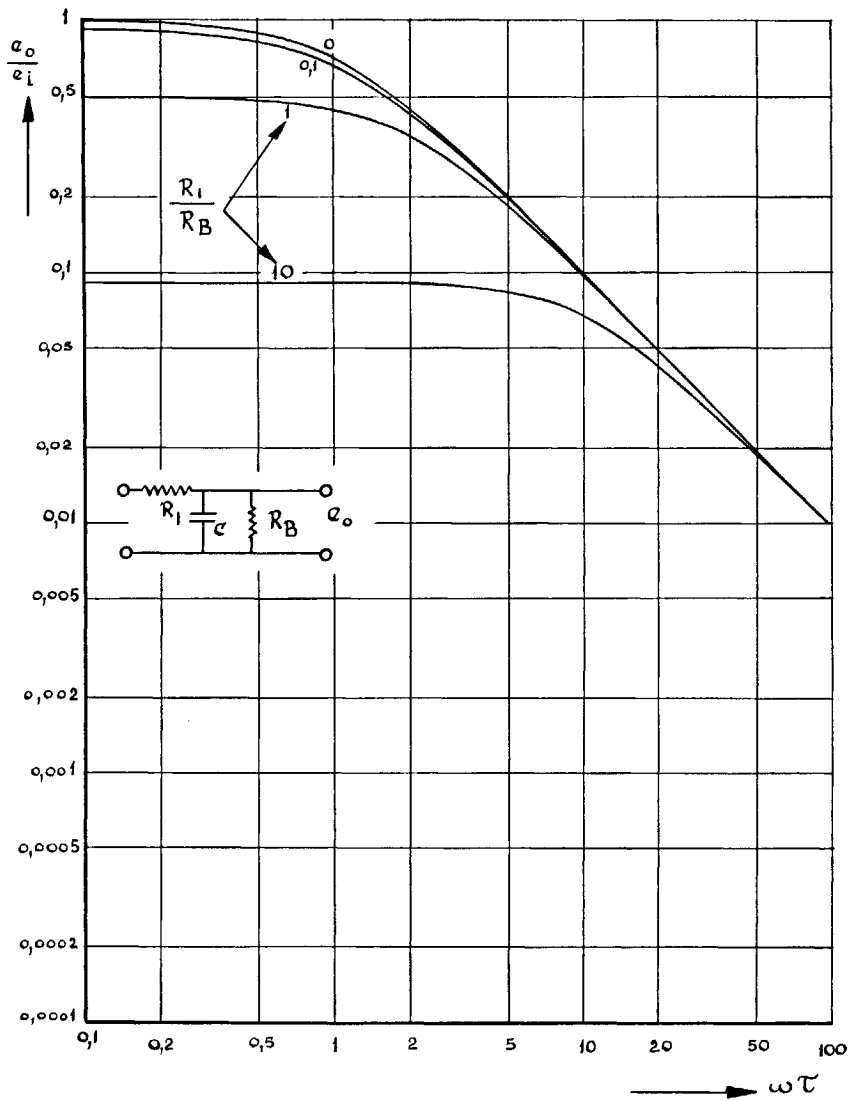


Fig. 6.7: Frequentie karakteristiek voor belast eerste orde RC netwerk voor verschillende belastingen.

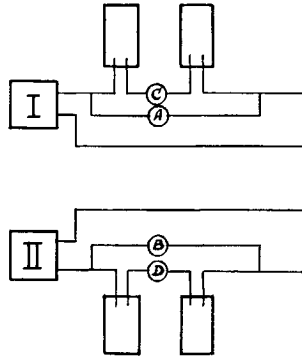


Fig.7.1: Schakeling om met 2 gevoelige drukmeters grote hoogteverschillen te meten

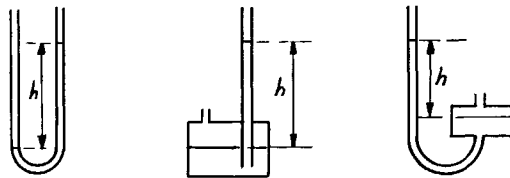
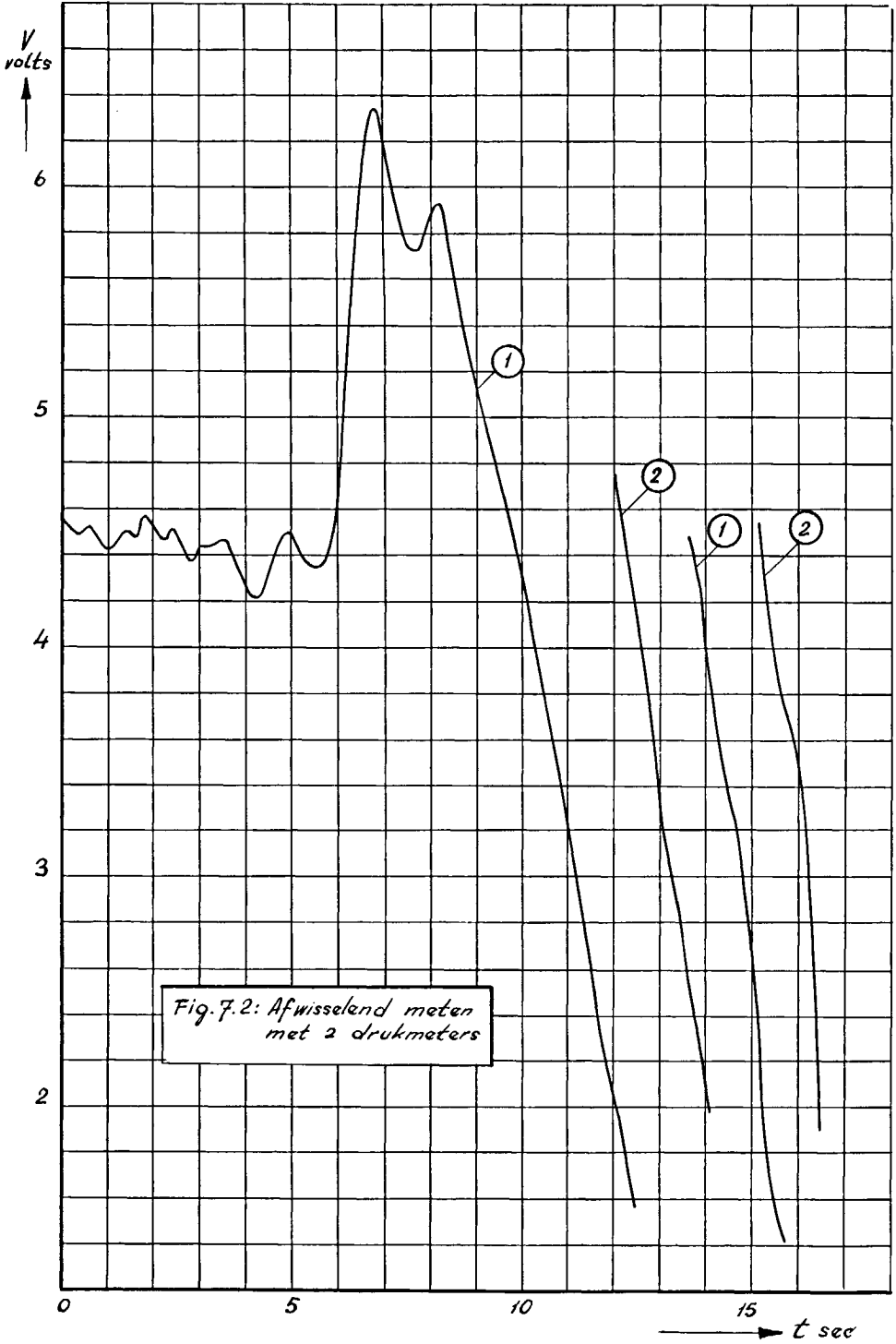


Fig.8.1: Verschillende uitvoeringen van drukmeters.



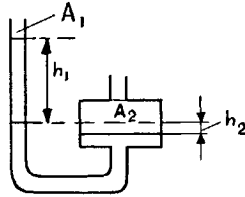


Fig. 8.2: Vloeistofmanometer met reservoir.

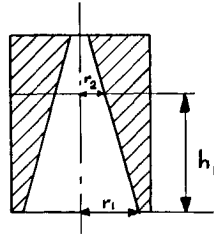


Fig. 8.3: Tapse buis.

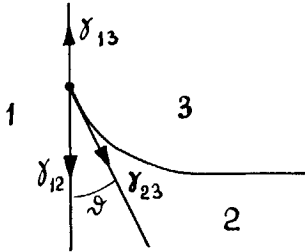


Fig. 8.4: Oppervlakte spanning

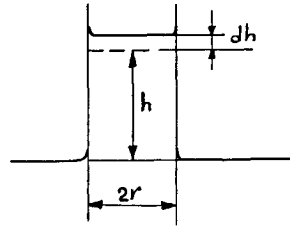


Fig. 8.5: Capillaire opstijging.

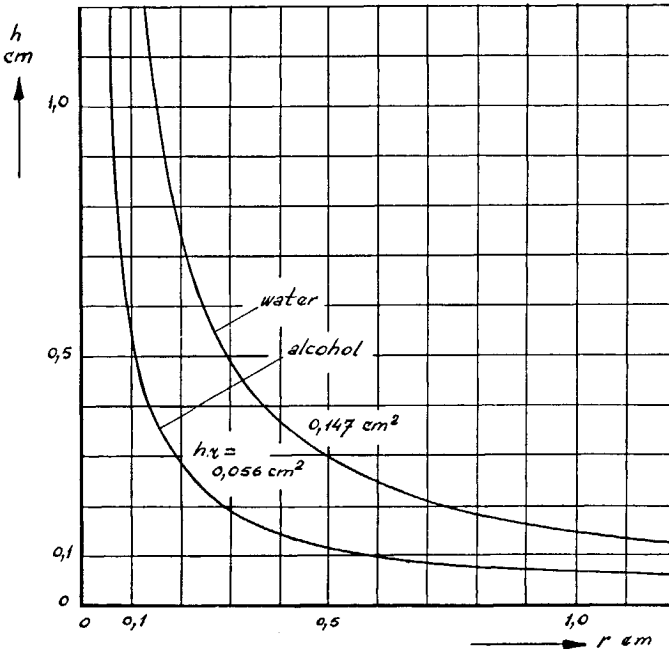
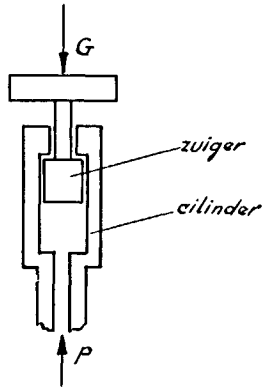
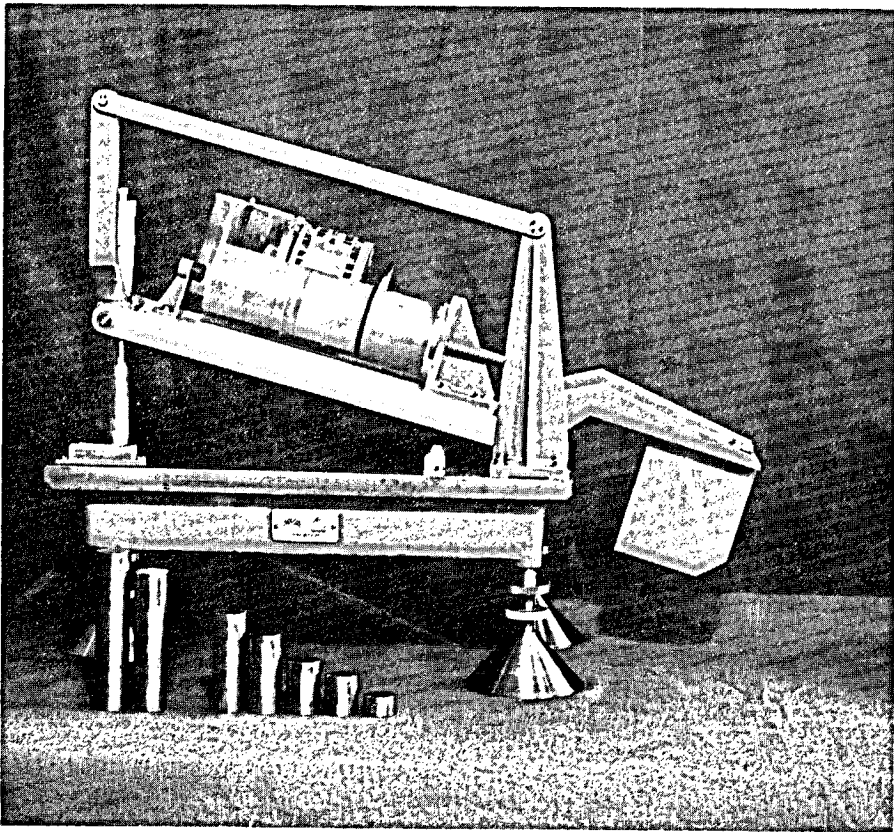


Fig. 8.6: De capillaire opstijging in een buis voor water en alcohol als functie van de straal van de buis.





*Fig.8.7: Drukbalans*



*Fig.8.8: Hellende - buis drukbalans.*

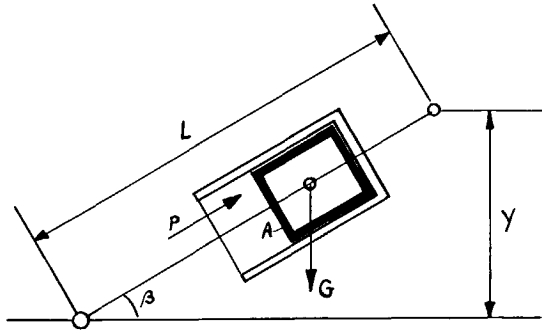


Fig. 8.9:

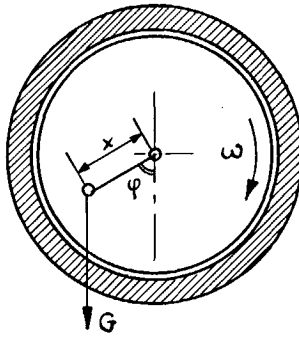


Fig. 8.10:

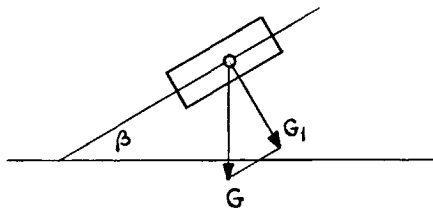


Fig. 8.11:

Memorandum 81



60142070918