DTU Bibliotek

Denne fil er downloadet fra

Danmarks Tekniske Kulturarv

www.tekniskkulturarv.dk

Danmarks Tekniske Kulturarv drives af DTU Bibliotek og indeholder scannede bøger og fotografier fra bibliotekets historiske samling.

Rettigheder

Du kan læse mere om, hvordan du må bruge filen, på *www.tekniskkulturarv.dk/about*

Er du i tvivl om brug af værker, bøger, fotografier og tekster fra siden, er du velkommen til at sende en mail til *tekniskkulturarv@dtu.dk*

INDUSTRI-
FORENINGEN

*5317

INDUSTRIFORENINGEN

300223498

DTU Bibliotek
Danmarks Tekniske Informationscenter

TB Gl.
531.70 Pry

DANMARKS
TEKNISKE BIBLIOTEK

FYSISKE MAALEMETODER

6 108

K. PRYTZ

HOVEDTRÆKKENE

AF DE VIGTIGSTE

FYSISKE MAALEMETODER

KØBENHAVN
JUL. GJELLERUPS FORLAG
I. COHENS BOGTRYKKERIER
- GEORG A. BACH -
1901

INDUSTRI-
FORENINGEN.

Det er nu almindelig erkendt, at et Studium af Fysik kun bliver tilfredsstillende, naar den Studerende faar Lejlighed til selv at udføre fysiske Arbejder. Dette har ført med sig, at der efterhaanden er bleven indrettet fysiske Øvelseslaboratorier de fleste Steder, hvor der gives en noget videregaaende Undervisning i Faget.

Laboratorieundervisningen maa søge sine Forudsætninger i den teoretiske Undervisning og stiller derfor Krav til denne i Retning af udførligere Behandling af enkelte Afsnit. Tages disse op i deres sædvanlige Forbindelse med det øvrige Stof, vil der imidlertid opstaa en Mangel paa Ligevægt i Fremstillingen, som kan gøre det vanskeligt at fastholde Traaden.

Heri ligger der en Opfordring til af den almindelige Fremstilling af Fysikken at udskille de Afsnit, der have størst Betydning for Arbejdet i Laboratoriet, og gøre dem til Genstand for en særlig Behandling; det er dette jeg har forsøgt i nærværende Bog, i hvilken jeg behandler saadanne Maale- og Undersøgelsesmetoder, som finde hyppig Anvendelse indenfor store Omraader af Fysikken, og som derfor have faaet en saa fast Form, at der kan gives en almengyldig Fremstilling af deres Hovedtræk.

Fremstillingen grundes i Hovedsagen paa de Erfaringer, jeg som mangeaarig Leder af Arbejdet i den polytekniske Læreanstalts fysiske Laboratorium har haft Lejlighed til at gøre. Stoffet faar sin naturlige Begrænsning ved at indskrænkes til at omfatte saadanne Arbejder, som

efter mine Erfaringer kunne udføres under nogenlunde almindelige Forhold. Afbildningerne gengive for største Delen Brugsgenstande i Laboratoriet, og de som Forsøgsresultater betegnede Talexempler hidrøre fra virkelig udførte Forsøg. Jeg haaber derfor, at Bogen maa findes anvendelig til Vejledning for Studerende ved deres Arbejde i det fysiske Laboratorium.

K. Prytz.

I. Længdemaaling.

AFLÆSNING PAA EN MAALESTOK, IAGTTAGELSES-FEJL. Skal man maale Afstanden mellem to Punkter, fremstillede f. Ex. ved to Kryds eller ved Endepunkterne af to parallele Streger, og er man henvist til at bruge en almindelig Maalestok, delt f. Ex. i mm, vil det gælde om at faa hvert Punkt anbragt i eller tæt ud for Mellemrummet mellem to Delestreger, saa at man med fornøden Sikkerhed kan skønne den Brøkdel af 1 mm, som Punktet ligger foran den nærmest foregaaende Streg. I den Hensigt danner man Maalestokken som en Lineal, hvis ene Kant er skærpet; Dele-

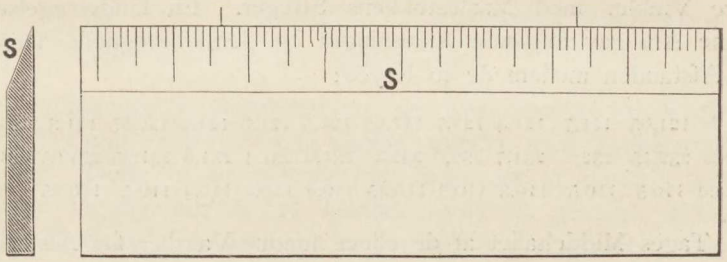


Fig. 1

stregerne afsættes paa den skraa Flade *S* (Fig. 1) og føres helt ud til Æggen. Herved kunne Stregerne og de Punkter, hvis Afstand søges, føres tæt sammen. Det samme opnaaes endnu bedre ved at danne Maalestokken af gennemsigtigt Stof (Glas eller Celluloid). Med en saadan kan man faa Punkterne til at ligge i Plan med Stregerne, naar man lægger Maalestokkens Stregeside ned mod den Flade, hvorpaa Punkterne ere afsatte.

Hvis Forholdene ikke tillader at bringe de to Punkter, hvis Afstand søges, i umiddelbar Nærhed af Maalestokken, maa man stille denne parallelt med Punkternes Forbindelseslinie og føre

parallele Linier fra Punkterne til Maalestokken. Dette kan ske, ved at man lader udgaa to Visere fra Maalestokken, henad hvilken den ene Viser, der er forsynet med en Index, kan forskydes (Maalepasser), eller ved at forbinde Maalestokken med en forskydelig Kikkert (Katetometer). Er Punktets Afstand fra Maalestokken ringe (f. Ex. ved Termometeraflæsning), kan man finde dets Stilling til Maalestokken alene ved Øjemaal, men man er udsat for at begaa Fejl ved skævt Sigte (Parallaxefejl).

Ere Forholdene ikke gunstige for en direkte Udmaaling af Afstanden, kan man tage en Kopi af den f. Ex. mellem Spidserne af to Passerben eller mellem to Mikroskoper (Komparator) og derpaa sammenholde Kopien med Maalestokken.

Med nogen Øvelse kan man temmelig sikkert skønne Tiendedele af mm rigtig, med større Øvelse Tyvendedele. Sit Skøns Paalidelighed kan man faa et Maal for paa følgende Maade: Man afsætter i vilkaarlig Afstand ved fine Streger to ligedannede Kryds og maaler Afstanden mellem dem gentagne Gange, idet man efter hver Maaling forskyder Maalestokken en Brøkdel af 1 mm, saa at man hver Gang kommer til at skønne Brøkdele af forskellig Størrelse. De to Streger i hvert Kryds bør danne ligestore Vinkler med Maalestokkens Streger. En Undersøgelse af denne Art gav følgende Aflæsninger og deraf beregnede Værdier for Afstanden mellem de to Kryds:

I Kryds	121,65	121,7	121,4	121,7	121,95	121,5	121,0	121,2	120,85	121,3	121,1 mm
II Kryds	232,15	232,2	231,7	232,0	232,4	231,9	231,4	231,6	231,35	231,65	231,5 mm
Afstand	110,5	110,5	110,3	110,3	110,45	110,4	110,4	110,4	110,5	110,35	110,4 mm

Tages Middeltallet af de elleve fundne Værdier for Afstanden, faar man en Værdi for denne, som med en vis Sandsynlighed ligger den sande Længde nærmere end den Værdi, man faar ved en enkelt Maaling. Et Taludtryk for de to Værdiers sandsynlige Tilnærmelse til det sande faar man paa følgende Maade: Middeltallet er $L = 110{,}41$. Man trækker hver af de observerede Værdier fra Middeltallet og faar derved Differenserne d maalte i $^1/_{100}$ mm

d	−9	−9	+11	+11	−4	+1	+1	+1	−9	+6	+1
d^2	81	81	121	121	16	1	1	1	81	36	1

Man danner Summen af Kvadraterne paa d; $\Sigma d^2 = 541$, og dividerer denne Sum med $n - 1$, idet n er Antallet af observerede Værdier; $n - 1 = 10$. $\sqrt{\Sigma d_2/(n-1)} = \pm 7{,}4 \cdot 10^{-2}$ er det man

kalder Middelfejlen i den enkelte Maaling. Middelfejlen i Resultatet faaes ved at dividere den ovennævnte Middelfejl med Kvadratroden af Antallet af enkelte Maalinger. Middelfejlen i Resultatet bliver altsaa her $\pm 7{,}4/\sqrt{11} = \pm 2{,}23 \cdot 10^{-2}$ mm.

Hvad Betydning det har at finde Middelfejlen, vil fremgaa af følgende. Naar man foretager en Række Iagttagelser, vil man hver Gang begaa en Iagttagelsesfejl. Antages det, at Fejlene ere tilfældige, er det et Træf, at den i en given Iagttagelse netop har faaet den Værdi, den har. I Tilfælde af at man har gjort et stort Antal Iagttagelser, kan man tale om Sandsynligheden for et Træf. Det har en Sandsynlighed, som er udtrykt ved Brøken s, naar det i N Tilfælde vil indfinde sig sN Gange. $s = 1$ betyder Vished. Sandsynligheden for, at Fejlen i en given Iagttagelse faar en bestemt Talværdi, er naturligvis uendelig lille, da der er uendelig mange Talværdier mulige. Derimod kan man ved et endeligt Tal udtrykke Sandsynligheden for, at Fejlen ikke overskrider en given Talværdi. Naar man under uforandrede Betingelser gentager mange Gange en og samme Maaling, giver Sandsynlighedsregningen, at Sandsynligheden for, at Fejlen i en Maaling ikke vil numerisk overskride henholdsvis

	1/4	1/2	1	2	3	Gange Middelfejlen
er $s =$	0,198	0,383	0,683	0,955	0,997	

Middelfejlen i Resultatet af de ovennævnte 11 Maalinger $\pm$ 0,0223 mm er $\sqrt{11} = 3{,}32$ Gange mindre end i den enkelte Maaling. Dette er et Udtryk for, hvad der er opnaaet ved at gentage Iagttagelsen de 11 Gange. Ved at gentage 4 Gange sættes Middelfejlen ned til det halve; men for at faa den reduceret til 1/10 maa der 100 Enkeltiagttagelser til. Man ser heraf, at man i Reglen vil staa sig ved at lægge Hovedvægten paa at gøre den enkelte Iagttagelse nøjagtig, fremfor at gøre mange grovere Iagttagelser.

Som ovenfor antydet ere Betragtninger som de anførte kun strængt rigtige, naar man har med uendelig mange Træf at gøre. Dette vil vise sig, naar man sammenholder de 11 Værdier for d med det ovenstaaende lille Uddrag af Sandsynlighedstabellen. Vilde man af de 11 Værdier for d finde Sandsynlighederne for, at Fejlene ikke overskride henholdsvis 1/4, 1/2, 1, 2, 3 Gange Middelfejlen, maatte det ske ved Optælling af de d, der ere numerisk mindre end nævnte Grænser, og ved Division af hvert af de

saaledes fundne 5 Tal nemlig 4, 4, 6, 11, 11 med 11. Man vilde da faa Sandsynlighederne 0,36, 0,36, 0,55, 1,00, 1,00, mens Tabellen giver 0,198, 0,383, 0,683, 0,955, 0,997.

Det er kun naar numerisk lige store positive og negative Fejl have lige stor Sandsynlighed, at man kan vente Fejlene udjævnede ved at tage Middeltallet. Fejl, om hvilke dette ikke gælder, kaldes systematiske; de kunne i det omtalte Tilfælde optræde, hvis man f. Ex. bruger en Maalestok afsat paa Papir til Udmaaling af en Afstand paa en Metalplade; saafremt Luftens Fugtighedsgrad forandrer sig kendelig, mens man maaler, vil Papiret nemlig udvide sig eller trække sig sammen under Maalingen. Hvorvidt der har været saadanne systematiske Fejl til Stede, kan ved tilstrækkelig mange Iagttagelser give sig tilkende derved, at Afvigelserne fra Middeltallet ikke følge Fejlloven med tilstrækkelig Nøjagtighed.

Man finder Middeltallet af en Række forskellige Værdier for den samme Størrelse ved at dividere Værdiernes Sum med deres Antal, naar alle Værdier ere lige gode, d. v. s. naar der er samme Sandsynlighed for en given Fejl i alle Værdierne. Hvorledes man bærer sig ad i andre Tilfælde, kan ses af følgende Exempel. Opgaven var at finde Forholdet mellem Længdeenhederne i to Maalestokke: Fod og Meter. Centimeterstokken, der var af Glas, blev lagt over Tommestokken (Staalbaand) og en Række Helcentimeterstregers Steder i Forhold til Tommestokkens Streger blev iagttagne. Der fandtes

Cm.	0	1	2	4	8	16	32	64
Duod. Linier	8,5	13,2	17,7	26,8	45,5	81,9	155,35	302,2

Heraf udledes, at

$$\begin{array}{rrrrrl} 64 & 31 & 14 & 4 & & \text{Cm.} \\ = 293{,}7 & 142{,}15 & 64{,}2 & 18{,}7 & & \text{Duod. Linier.} \end{array}$$

For det søgte Forhold faaes

$$F = \frac{1\text{ m}}{1\text{ Fod}} = \frac{100}{144} \cdot \frac{293{,}7}{64}, \quad \frac{100}{144} \cdot \frac{142{,}15}{31}, \quad \frac{100}{144} \cdot \frac{64{,}2}{14}, \quad \frac{100}{144} \cdot \frac{18{,}7}{4}$$

I hver af disse 4 Værdier er Faktoren $\frac{100}{144}$ fejlfri; derimod er der saavel i Tæller som i Nævner af den anden Faktor Fejl, som hidrøre dels fra Aflæsningsfejl dels fra Fejl i Maalestokkene.

Fejlsandsynligheden er ens ved alle Iagttagelserne; men dette gælder ikke om de af Iagttagelserne fremgaaende Værdier for Forholdet F. Kaldes den rigtige Værdi for dette F_0, bliver

$$F = \frac{100}{144} \cdot \frac{a}{b} \qquad F_0 = \frac{100}{144} \cdot \frac{a + d_1}{b + d_2}$$

Da Fejlene d_1 og d_2 er smaa i Forhold til de maalte Længder a og b, kan man sætte

$$F_0 = \frac{100}{144} \cdot \frac{a}{b} \frac{1 + \frac{d_1}{a}}{1 + \frac{d_2}{a}} = F\left(1 + \frac{d_1}{a} - \frac{d_2}{b}\right)$$

$$F_0 - F = F\left(\frac{d_1}{a} - \frac{d_2}{b}\right) = F\frac{1}{b}\left(\frac{b}{a} d_1 - d_2\right)$$

Differensen $F_0 - F$ er Fejlen i Forholdet; da den er en lille Størrelse, kan man i Udtrykket for den regne F og b/a konstante. Da det endvidere er tilfældigt, hvorledes d_1 og d_2 variere i de forskellige Værdier for F, sees det, at man maa gøre Regning paa en Fejl i Forholdet F, som er omvendt proportional med den Længde b, der indgaar i F. Ved Beregning af Middelværdien af de forskellige Værdier for F tillægger man hver Værdi en vis *Vægt*, som voxer med Længden b. Giver man den sidste Værdi for F Vægten 1, bestemmes Vægten p for en af de andre Værdier saaledes, at p er det Antal Gange, man maatte gentage denne Iagttagelse, for at Middeltallet, som heraf vilde fremgaa, skulde faa samme Middelfejl, som den Enkeltiagttagelse har, hvis Vægt p søges. Dette vil føre til, at Vægten for de forskellige Værdier for F bliver proportional med Kvadratet paa Længden b. Vægtene blive altsaa $(^{64}/_4)^2$, $(^{31}/_4)^2$, $(^{14}/_4)^2$, 1.

Vil man finde Middeltallet F_m af de ovenfor staaende 4 Værdier for F, sker det ved at multiplicere hver Værdi med dens Vægt, addere Produkterne og dividere Summen med Summen af samtlige Vægte. Man faar da

$$F_m = \frac{64 \cdot 293{,}7 + 31 \cdot 142{,}15 + 14 \cdot 64{,}2 + 4 \cdot 18{,}7}{64^2 + 31^2 + 14^2 + 4^2} \cdot \frac{100}{144} = 3{,}1864$$

Det virkelige Forhold mellem Meter og Fod er 3,1862.

Ved Udførelse af Maalinger bør man, saavidt det lader sig gøre, danne sig en Forestilling om den Nøjagtighed, hvormed Resultatet kan ventes at foreligge. Det sikreste er at gentage

Maalingen helst med noget ændrede Betingelser (saaledes Forskydningen af Maalestokken S. 8) saa mange Gange, at der er Sandsynlighed for, at de tilfældige Fejl ville optræde nogenlunde ligelig til modsatte Sider. Afvigelserne fra Middeltallet vil da give Maal for Nøjagtigheden, hvis man har sikret sig mod systematiske Fejl. Man kan ofte undersøge, om saadanne ere tilstede, hvis man varierer i betydelig Grad de Forhold ved Forsøget, som kunne tænkes at hidføre dem. Har man saaledes udført en Række Maalinger, den ene umiddelbart efter den anden, af en Metaltraads elektriske Ledningsmodstand, kan man frygte for, at den Strøm, man har benyttet, efterhaanden har opvarmet Traaden kendelig og derved forøget Modstanden; om dette har været Tilfældet, kan prøves ved at holde Strømmen sluttet i længere Tid og derpaa maale Modstanden, eller man kan gentage Maalingerne med Anvendelse af en stærkere eller svagere Strøm.

Har man ikke Lejlighed til at gentage Maalingen tilstrækkelig hyppig, vil man ofte kunne beregne den mulige Fejl i Resultatet, saafremt man kan nævne Grændser for de Fejl, man kan have begaaet ved de enkelte Iagttagelser, hvoraf Resultatet fremgaar ved mere eller mindre sammensatte Regninger med de iagttagne Talværdier. Hvis man saaledes ved Maaling af en Længde er sikker paa, at Maalestokken ikke har større Fejl end $^1/_{20}$ mm, og at man ved Aflæsningen ikke kan begaa større Fejl end $^1/_{10}$ mm, da vil der ved hver af de to Iagttagelser, der give Længden, højst kunne opstaa Fejl paa 0,15 mm; da disse kunne gaa i modsatte Retninger, vil der i den fundne Længde, som fremgaar ved en Subtraktion af de to iagttagne Tal, kunne indgaa en Fejl paa indtil 0,3 mm.

Det er S. 11 vist, hvorledes man kan finde Fejlen i et *Forhold* mellem to maalte Størrelser som Funktion af disses Fejl. Ligesom der vil man i det hele ved Beregning af Fejlen i et af flere Enkeltmaalinger betinget Resultat være henvist til at simplificere Regningerne ved at bruge Tilnærmelser. Med Hensyn til disses Tilladelighed maa det huskes, at det i Hovedsagen kun drejer sig om at finde Fejlens Størrelsesorden, i hvert Fald vil en Usikkerhed paa 10—20 Procent i de allerfleste Tilfælde være uden Betydning. Af den Grund kan man for det første afrunde de Tal, der indgaar i Udtrykket for Fejlen. S. 11 blev Fejlen funden lig

$$F_0 - F = F\left(\frac{d_1}{a} - \frac{d_2}{b}\right)$$

Her er F det fundne, F_0 det rigtige Forhold, a og b de i Linier og cm fundne Værdier for samme Længde, d_1 og d_2 Fejlene henholdsvis i a og b. Antages $d_1 = \pm\, {}^1/_{10}$ Linie, $d_2 = \pm\, {}^1/_{100}$ cm, $a = 146{,}85$ L., $b = 32$ cm, da vil man, uden at forringe Beregningens Værd, kunne regne med $a = 150$ og med $F = 3{,}2$. Man faar $F_0 - F = 3{,}2 \cdot (\pm\, {}^1/_{1500} \mp {}^1/_{3200})$.

Ved saadanne Regninger faar man hyppig Brug for de af Rækkeudviklingerne for de forskellige Funktioner fremgaaende Tilnærmelsesudtryk, som dannes ved en Bortkasten af Led af højere Orden, der er tilladelig, hvor Fejlen indgaar som Addend til et mange Gange større Tal.

Som jævnlig anvendte Tilnærmelsesudtryk skal hidsættes følgende. d er forudsat lille.

$$(1 \pm d_1)(1 \pm d_2) = 1 \pm d_1 \pm d_2 \qquad \frac{1}{1 \pm d} = 1 \mp d$$

$$\frac{1 + d_1}{1 + d_2} = 1 + d_1 - d_2 \qquad \sqrt{1 \pm d} = 1 \pm {}^1/_2\, d$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 + d}} = 1 - {}^1/_2\, d \qquad (1 + d)^2 = 1 + 2\, d$$

$$e^d = 1 + \frac{d}{1} + \frac{d^2}{1.2} \qquad \textit{lognat}\ (1 + d) = \frac{d}{1} - \frac{d^2}{2}$$

$$\sin(x + d) = \sin x + d \cos x \qquad \cos(x + d) = \cos x - d \sin x$$

Relativ og absolut Fejl. Vil man udføre Regningen i det ovenfor staaende Udtryk for Fejlen $F_0 - F$, har man intet paa Forhaand givet til Valg mellem Fortegnene. Men er det Opgaven at finde, hvor stor Fejlen i Resultatet i det højeste kan blive, maa man vælge den Kombination af Fortegnene, der giver $F_0 - F$ den største numeriske Værdi; der skal altsaa her vælges $+ \div$ eller $\div +$ for d_1 og d_2; man faar med tilstrækkelig Tilnærmelse

$$F_0 - F = \pm\, 0{,}0032$$

som den mulige Fejl i det af den valgte Iagttagelse fundne Forhold mellem Meter og Fod.

Havde man søgt Forholdet F' mellem Meter og *Tomme*, da vilde de samme Iagttagelser give en Fejl i Resultatet 12 Gange saa stor som den i Forholdet Meter til Fod, og dog maatte man sige, at det ene Forhold var lige saa godt bestemt som det andet;

det vil nemlig føre til samme Resultat, hvilket af dem man gaar ud fra, naar man vil reducere Metermaal til Fodmaal. Sagen er den, at det ikke er Fejlens absolute Værdi, der har Betydning, men dens Værdi *i Forhold til den søgte Størrelse*; den absolute Fejls Størrelse vil forandres med de Enheder, man vælger, hvorimod *den relative Fejl* d. v. s. Forholdet mellem Fejlen og den Størrelse, hvortil den hører, er uafhængig af Enhederne. Derfor maa man helst ende Regningen med at beregne den relative Fejl. Dette kommer ofte af sig selv derved, at Udtrykket for den søgte Størrelse, saaledes som i det valgte Exempel, kommer frem som Faktor i Udtrykket for Fejlen, naar dette Udtryk behandles med Tilnærmelsesregning For den absolute Fejl blev funden

$$F_0 - F = F\left(\frac{d_1}{a} - \frac{d_2}{b}\right)$$

Den relative Fejl $f = (F_0 - F)/F$ bliver altsaa

$$f = \frac{d_1}{a} - \frac{d_2}{b}$$

Med de valgte Tal for d_1, d_2, a og b bliver f paa det nærmeste $^1/_{1000}$. Den *procentiske Fejl* er det Antal Procent, som Fejlen er af Størrelsen; den faaes ved at multiplicere den relative Fejl med 100. I det foreliggende Tilfælde er den størst mulige Fejl $^1/_{10}$ Procent eller 1 Promille.

BRØKDELE AF MILLIMETREN. Maalestokken deles sædvanlig ikke i mindre Dele, end at man uden Anstrængelse kan holde

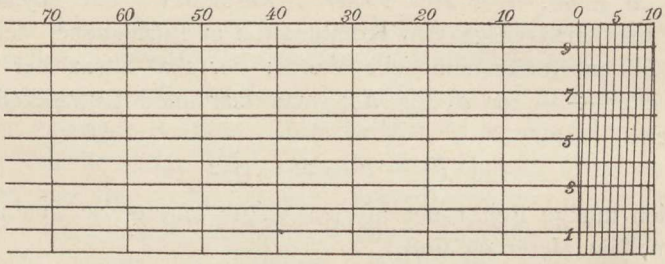


Fig. 2.

Stregerne ude fra hverandre ved det blotte Øje. Man gaar derfor sjælden under mm. Vil man ikke nøjes med at skønne $^1/_{10}$ mm,

kan man have en eller nogle enkelte af mm delt i 5 eller 10 Dele og bruge dem til Afmaaling af Overskuddet over de hele mm. De tæt sammenfaldende Streger maa man i Reglen iagttage i Lup.

Ved et Næt af hinanden skærende Parallelstreger kan man fremstille alle Længder mellem 0 og 10 mm. Man afsætter 11 parallele Længdestreger i lige indbyrdes Afstande og afskærer 1 cm. paa hver af dem ved to lodrette Streger; den øverste og nederste cm. deler man i 10 mm. Fra mm-Stregen 0 i den nederste cm. trækker man en Skraastreg til mm-Stregen 1 i den øverste og fortsætter paa samme Maade med de øvrige mm-Streger; herved faar man 10 parallele Skraastreger, hvis Afstande fra en af de lodrette Streger voxe kontinuert fra 0 til 10 mm.

Vil man kunne finde Underafdelinger af en hvilkensomhelst af en Maalestoks mm, bruger man sædvanlig *Nonius*. Skal man bestemme n'te Dele af 1 mm, dannes Nonien som en Maalestok, som er $n - 1$ mm lang men deles i n lige store Dele (Fig. 3); hver af disse er altsaa $(n - 1)/n$ mm lang, eller $1/n$ mm mindre end

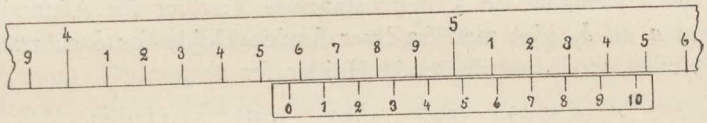


Fig. 3.

Maalestokkens Dele. Nonien anbringes forskydelig henad Maalestokken saaledes, at hver af dens Streger kan bringes til uden kendeligt Mellemrum at fortsætte en af Maalestokkens Streger. Er dette Tilfældet med den p'te Noniestreg (i Fig. 3 den 7de), da vil den $(p - 1)$te være $1/n$ mm foran sin mm-Streg, den $(p - 2)$te vil være $2/n$ mm foran sin o. s. v. Noniens Nulstreg vil følgelig være p/n mm foran den nærmest foregaaende mm-Streg.

Det indrettes nu ved Maalingen saaledes, at Noniens Nulstreg tjener som den Index, hvis Afstand fra Maalestokkens Nulstreg man søger. Man aflæser det hele Antal mm paa Maalestokken, mens Brøkoverskuddet findes paa Nonius, ved at man opsøger den Streg, som er nærmest ved at falde i Forlængelse af en mm-Streg; er det den p'te Noniestreg, sættes Overskuddet lig p/n mm. Skønnes den p'te og $(p + 1)$te Streg at være lige nær ved Sammentræf, sætter man Overskuddet lig $(p + 1/2)/n$. Er Øjet øvet, kan man skønne endnu mindre Dele end $1/2n$ mm, men i hvert Fald bør Aflæsningsfejlen ikke overskride denne Størrelse.

Til Bestemmelse ved Nonius af Brøkoverskuddet x bruges to mm-Streger og en Noniestreg; i x indgaar følgelig de tre Fejl, som disse Streger ere afsatte med. Man maa derfor regne med en mulig Fejl, som er 3 Gange den størst mulige Inddelingsfejl.

Exempel. Afstanden mellem to Kryds a og b, afsatte paa en Messingflade, maaltes ved Katetometer. Der blev maalt 5 Gange saaledes, at Kikkerten først indstilledes paa a, dernæst paa b, hvorefter den igen rettedes mod a. Mellem hver af de 5 Maalinger blev Fladen med de to Kryds flyttet lidt opad, saa at der hver Gang blev aflæst nye Tal. Nonius indeholdt 20 Inddelinger, som spændte over 19 mm paa Maalestokken; den gav altsaa $^1/_{20}$ mm. Aflæsningerne vare

for a	Maalestok	154	154	154	154	155	155	155	155	155	155
	Nonius	13,2	13,2	16,2	16,0	0,0	0,0	3,2	3,7	8,0	8,5
for b	Maalestok	164		164		164		164		164	
	Nonius	2,2		5,5		9,0		13,0		17,0	

Heraf fremgaar de 5 nedenstaaende Værdier for Afstanden r mellem a og b, idet man fra hver funden Højde for b subtraherer Middeltallet af de to tilhørende Højder for a.

$$r = 9{,}45 \quad 9{,}47 \quad 9{,}45 \quad 9{,}48 \quad 9{,}44 \text{ mm.}$$

Middeltallet af de 5 Værdier er 9,458 mm. Største Afvigelse fra Middeltallet er 0,022 mm eller $0{,}44 \cdot {}^1/_{20}$ mm, hvad der er i god Overensstemmelse med Aflæsningsnøjagtigheden. Hver af de ovenfor anførte Iagttagelser har Fejl fra Aflæsningen, fra Indstilling af Kikkert og Libelle samt fra Inddelingerne. Indstillingsfejl fremkomme, naar man som her, og som omtalt S. 8, har det iagttagne Punkt i Afstand fra Maalestokken og derfor maa indstille en med denne forbunden Viser eller Kikkert paa Punktet.

Et sikrere men omstændeligere Middel til Bestemmelse af Brøkdele af mm er Mikrometerskruen, som vil blive omtalt senere.

Ved Kikkertaflæsning kan man til denne Bestemmelse med Fordel bruge en foran Objektivet O (Fig. 4) anbragt planparallel Glasplade pp, der kan drejes om en Axe parallel med Fladen og vinkelret paa Maalestok og Kikkertaxe, og som forsynes med en inddelt Kreds kk og en Viser v til Maaling af Drejningsvinklen. Apparatet er fæstet ved en Spændering, der omfatter Indfatningen om Objektivet O. Hvis man med Glaspladen vinkelret paa Kikkertaxen sigter til et Punkt og derpaa drejer Pladen, vil Punktets

Billede løftes eller sænkes et Stykke, som afhænger af Drejningsvinklen, og hvis Størrelse kan findes, naar man i Forvejen har

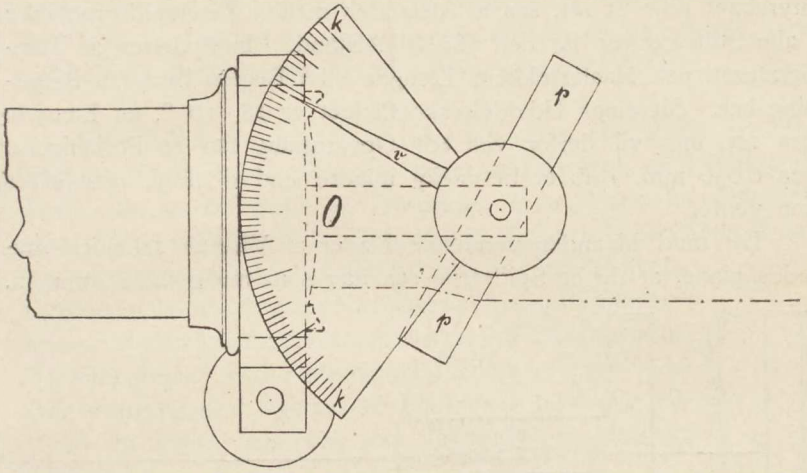


Fig. 4

undersøgt, hvor stor Drejning der skal til for at give en Flytning paa 1 mm. Flytningen er uafhængig af Punktets Afstand. Man kan derved bringe Punktets Billede i Højde med en mm-Streg og ved Aflæsning paa Kredsen finde dets virkelige Højde. En Glasplade med Brydningsforhold 1,5, der er 7 mm tyk, vil ved en Drejning $i = 23^0$ give en Forskydning $f = 1$ mm. f er ikke proportional med i; men df/di varierer saa lidt med i, at man højst begaar en Fejl paa $^1/_{60}$ mm ved at regne Forskydningen proportional med Drejningen.

Maalepasseren (Skydelæren) bestaar af en med Inddelinger forsynet Messinglineal, fra hvis ene Ende der udgaar en fast Viser A (Fig. 5). En anden Viser B kan forskydes, idet den udgaar fra et Hylster, der omslutter Linealen. En Fjeder f, der ligger mellem Linealens Overkant og Hylsteret, trykker dette op imod Linealens Underkant; er denne nøjagtig ret, vil Viseren faa en Parallelflytning, naar Hylsteret skydes frem. Hylsteret har en Udskæring, gennem hvilken man kan se Inddelingerne paa Linealen; paa en af Udskæringens Rande er der anbragt en Index eller en Nonius.

Afstanden mellem to Punkter aflæses paa Maalestokken, efter at man ved at forskyde den bevægelige Viser har opnaaet, at de

to Viserspidser samtidig kunne dække hver sit Punkt; foruden Aflæsningsfejl kan der her komme Fejl hidrørende fra, at Linealens Styrekant ikke er ret, saa at Afstanden mellem Viserspidserne ikke i alle Stillinger er lig den aflæste Afstand. Indflydelsen af Temperaturen paa Maalestokkens Længde vil i Reglen ikke faa Betydning her. Messings Udvidelseskoefficient er $18 \cdot 10^{-6}$; en Længde paa 200 mm vil derfor ved 10^0 Opvarmning faa en Forlængelse paa 0,036 mm, som er betydelig mindre end de Fejl, man ellers kan vente.

De mod hinanden vendende Flader af Viserne arbejdes saaledes plane, at de og Spidserne saa nær som mulig falde sammen,

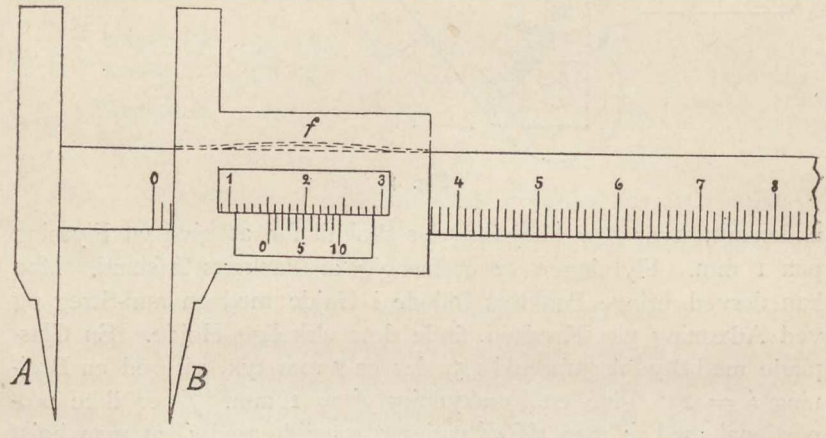


Fig. 5

naar Index viser paa Maalestokkens Nulstreg. Derved kan Maalepasseren bruges til at maale Tykkelsen af et Legeme, idet dette anbringes mellem Viserne, der stilles saaledes, at de netop røre Legemet paa modsatte Sider dog uden at øve noget kendeligt Tryk; et saadant vil bøje Viserne og derved indføre Fejl.

Medens man ikke kan paaregne stor Nøjagtighed, naar man vil finde den absolute Værdi af en Længde ved Maalepasseren, især fordi der ved Visernes Bøjning og Slid let opstaar en Nulpunktsfejl, som gør den aflæste Afstand for lille svarende til det Mellemrum, der vil findes mellem Viserne, naar Index viser paa Nul, kan man naa temmelig vidt i saa Henseende, naar man søger Forskellen mellem to nær ved hinanden liggende Dimensioner, f. Ex. naar man i Værkstedet vil tilvejebringe to Cylindre af samme Tykkelse; i saadanne Tilfælde ville de Fejl, som optræde ens

i begge Maalinger, nemlig elimineres. De værste Fejl ville ogsaa elimineres, naar man bruger Maalepasseren som Komparator, idet man afmaaler Afstanden mellem Viserne og derpaa fører disse hen paa en Maalestok; de hele mm aflæses da paa denne, mens man finder Brøkoverskuddet ved Maalepasserens Nonius.

SIGTEMAAL. Et Rør, der ved den ene Ende er lukket med en Plade, i hvis Midte er boret et lille Hul, og i hvis anden Ende der er udspændt et Traadkors, er en Form for *Diopteret;* man sigter til et Punkt ved gennem Hullet i Dækpladen at iagttage Punktet saaledes, at det dækkes af Traadpunktet. Retningen til Punktet skulde da falde sammen med Diopteraxen ɔ: Retningen fra Hullets Midtpunkt til Traadpunktet. Vanskeligheden ved Sigtning med Diopter ligger i, at man samtidig skal iagttage to Punkter i forskellig Afstand fra Øjet, som kun kan akkomoderes efter et ad Gangen.

Naar *Kikkerten* indretttes til Sigtning, dannes den af tre Rør, der skydes det ene ind i det andet. Det yderste Rør bærer Objektivet *A*, det mellemste et Traadkors *K* og det inderste Okularet *B*. Naar man vil sigte til et Punkt, stiller man først Okularet ind, saa at man ser Traadkorset skarpt; Kikkerten rettes mod Punktet, og man trækker Traadkorsrøret, hvormed Okularet følger, ud eller ind, til man gennem Okularet ser Punktets Billede skarpt. For at prøve om Indstillingen er skarp, bringer man Punktets Billede tæt op ad en af Traadene i Nærheden af Traadpunktet. Naar man da flytter Øjet ud til Siden vinkelret paa Traadens Retning, skal Billedet beholde sin Afstand fra Traaden uforandret; er det Tilfældet, ligger Billedet, som det skal, i Traadkorsets Plan; i modsat Fald maa Traadkorsrøret skydes lidt ud eller ind, til Billede og Traad sees i indbyrdes uforanderlig Stilling.

Herefter er Kikkerten færdig til Sigtning, og man flytter den, til Punktets Billede falder i Traadpunktet. Retningen til Punktet vil være bestemt ved Kikkertens optiske Axe, som er Linien fra Traadpunktet gennem Objektivets optiske Midtpunkt; thi af de Straaler, der fra Punktet træffer Objektivet og derfra gaa til Traad-

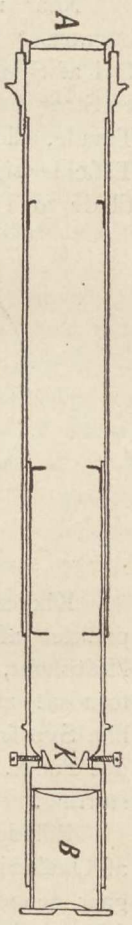


Fig. 6

punktet, vil den gennem det optiske Midtpunkt ikke forandre Retning.

Sigtningen beror her paa Sammenfald af to Punkter: Billedpunkt og Traadpunkt, og disse sees samtidig skarpt, fordi de ligge lige langt fra Øjet; det er væsentlig herpaa Kikkertens Fortrin som Sigteapparat beror; men tillige er man istand til at forøge Nøjagtigheden ved Forøgelse af Forstørringen; herved voxer nemlig Synsvinklen for den Afvigelse, der maatte være i Billedpunktets rette Plads. Jo stærkere Okularet er, des tyndere Traade kan man bruge, og des skarpere bliver den optiske Axe defineret.

Naar man sigter ved at lade Objektet dækkes af Traaden, begrænses Nøjagtigheden, ved at Traadens Tykkelse skjuler en Del af Synsfeltet. Man bruger derfor ofte, især naar Objektet er en Streg paa en Maalestok, to nær ved hinanden anbragte parallele Traade, eller to, der danne en spids Vinkel med hinanden; i begge Tilfælde sigter man ved at bringe Objektet i symmetrisk Stilling til de to Traade (Fig. 7).

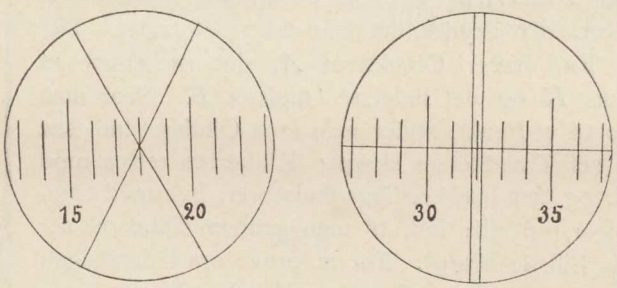


Fig. 7

Kikkertens *Synsfelt* bestemmes ved Forlængelsen udover Toppunktet af den Kegle, hvis Toppunkt er i Objektivets optiske Midtpunkt, og som er omskreven om det forreste Glas i Okularet, forudsat at dette kommer til Nytte i sin fulde Udstrækning. Et lille Synsfelt er en Ulæmpe, da det vanskeliggør Opsøgningen af det Punkt, man vil sigte til. Synsfeltet aftager med voxende Forstørring.

Billedets *Lysstyrke* afhænger, foruden af Objektets Belysning, af Okularringens Størrelse. I den samles nemlig alt det Lys, der gaar gennem Kikkerten; naar Øjet holdes saaledes, at Okularringen falder i Pupillen, vil dette Lys altsammen tjene til Belysning af Billedet i Øjet, og denne Belysning vil derfor være proportional med

Okularringens Areal. Okularringen er det virkelige Billede, som Okularet danner af Objektivet (se Fig. 8); dens Diameter er derfor

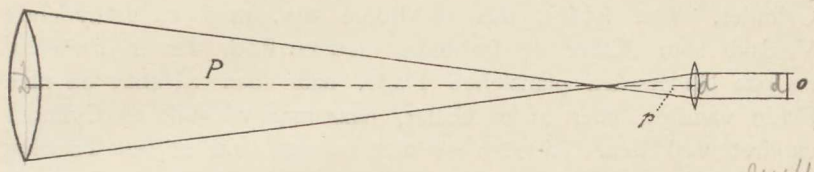


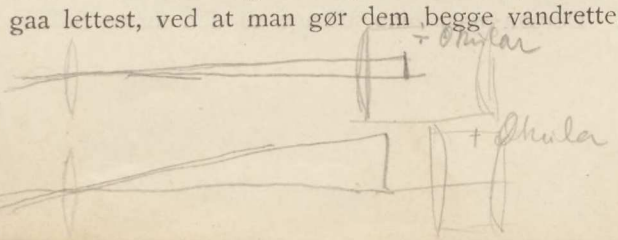
Fig. 8. Okularringen o som Billede af Objektivet. P er Objektivets, p Okularets Brændvidde.

proportional med Objektivets Diameter; endvidere er den omvendt proportional med Objektivets og ligefrem proportional med Okularets Brændvidde altsaa omvendt proportional med Forstørringen. Især ved stærk Forstørring kan det ofte skorte paa Lys, naar man ikke har Lejlighed til at belyse Objektet stærkt; derfor maa Objektivet gøres saa stort, som Hensynet til god Billeddannelse tillader.

Naar Kikkertrøret er cylindrisk afdrejet og kan drejes om Cylinderaxen, altsaa om sin egen geometriske Axe, kan man prøve, om denne Axes Forlængelse træffer det Punkt, hvortil der sigtes. Kendetegnet herpaa er nemlig, at Kikkertens Drejning om den geometriske Axe ikke flytter Punktets Billede ud af Traadpunktet. Derfor behøver dog ikke den optiske Axe at falde sammen med den geometriske; men ved Drejningen vil den optiske Axe beskrive en Kegleflade om den geometriske, og Keglen har sit Toppunkt i det Punkt, hvortil der sigtes. Traadkorset sidder i en Ramme, som man ved Stilleskruer (se Fig. 6) forskyder i sit eget Plan, indtil Kikkerten bestaar den ovennævnte Prøve.

Da man af Hensyn til den skarpe Indstilling paa Traadkorset maa have Okuláret forskydeligt i Forhold til dette, maa man ved en Kikkert indrettet til Sigtning bruge positivt Okular. Fordelen ved det negative Okular er et større Synsfelt.

Libellen. Ved Retningsbestemmelser faar man meget hyppig med de ved Tyngden bestemte Retninger, lodret og vandret, at gøre, dels direkte som ved Arbejde med Vædsker, dels indirekte, idet man bruger den naturbestemte Retning som Mellemled. Skal man saaledes gøre to plane Flader parallele, vil det i Reglen gaa lettest, ved at man gør dem begge vandrette.



De sædvanlige Midler, man bruger ved Orientering i Forhold til Tyngdekraften, er Lodsnoren og Libellen. Libellerøret (Fig. 9) er slebet indvendig, saa det faar Form som en svagt opad bøjet Cylinder. Det fyldes, paa en Boble nær, med en letflydende Vædske som Æther og forbindes med en Fod, der er dannet af en paa Undersiden plansleben Plade, naar man vil stille en plan Flade vandret, eller af to Gafler, naar man vil stille en Cylinder vandret ved den. Libellen er ofte anbragt som et fast Tilbehør til et Instrument.

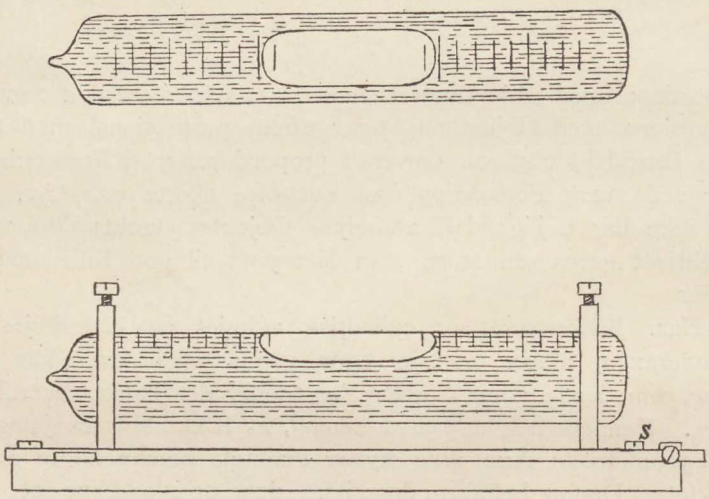


Fig. 9

Paa Libellerørets Overside findes Inddelinger, der begynder i nogen Afstand fra Midten og udgaa til begge Sider derfra. Libellens Nulstilling er den, hvor Boblen ligger symmetrisk til de to Sæt Inddelinger; den kan ikke betegnes ved en Delestreg, hvorpaa Boblen indstilles, da Boblens Størrelse vexler med Temperaturen.

Libellerøret er forbundet med sit Underlag ved Stilleskruer *s*, hvorved man kan opnaa, at Boblen er i Nulstillingen, naar Underlaget er vandret. Skal f. Ex. en af tre Stilleskruer støttet plan Glasplade stilles vandret, anbringer man Libellen vinkelret paa Forbindelseslinien mellem de to Skruer og drejer paa den tredie, til Libellen viser Nul; derefter drejes Libellen 90^0, og man drejer de to andre Skruer omtrent ligemeget til modsatte Sider, indtil Libellen paany viser Nul. Derpaa gaar man tilbage til den første Stilling

og retter ved den første Skrue den Fejl, der maatte være kommen ind ved Drejningen af de to andre.

Man kan prøve, om Libellen er retstillet til sit Underlag, naar man har den paa den ovennævnte Glasplade. Har man stillet Libellen paa Nul ved Hjælp af Pladens Stilleskruer, vender man den, saa at den danner en Vinkel paa 180^0 med sin forrige Stilling; det kaldes at omlægge Libellen. Afviger herefter Boblen fra sin Nulstilling, forandrer man saa meget paa Libellens Stilleskruer, at den halve Afvigelse ophæves, hvorefter man gentager Prøven. Er Libellen ikke helt retstillet, kan den dog vise, om en plan Flade er vandret, thi Kendetegnet derpaa er, at Boblen har samme Stilling til Inddelingerne, hvordan man end retter den paa Fladen; man maa dog sikre sig, at Manglen paa Retstilling ikke er saa stor, at Boblen er bleven ufri ved at støde mod Rørets Endeflader.

Libellen bruges meget hyppig til Lodretstilling af en Omdrejningsaxe. Føres Libellen med under Omdrejningen, vil Axen være lodret, hvis Boblen staar ens til Inddelingerne efter enhver Drejning. Axens og Libellens Indstilling sker ganske som ovenfor omtalt for Pladens Vedkommende.

Libellens Følsomhed maales ved Krumningsradius for det lodrette Længdesnit gennem Rørets øverste Punkt. Boblen vil ligge symmetrisk til den lodrette Radius til dette Snit; ved en Forandring i Hældning vil Boblen derfor flytte sig et Stykke lig den Bue, som Radiens Endepunkt beskriver. Man kan finde Krumningsradius ved at give Libellen en Hældning af bekendt Størrelse og iagttage Boblens deraf følgende Flytning.

En Katetometerkikkert blev rettet mod et Punkt, der laa 1,70 m fra Kikkertens vandrette Omdrejningsaxe. Derpaa blev Kikkerten drejet saa meget om sin vandrette Axe, at Libelleboblen flyttede sig 7 Inddelinger. Herved bragtes Kikkerten til at sigte $^2/_3$ mm over Punktet. Af det givne følger, at Libellen er bleven drejet en Vinkel

$$\varphi = {}^2/_3 : 1700 = {}^2/_{5100}$$

Kaldes Libellens Krumningsradius R, bliver endvidere, idet hver Libelleinddeling fandtes lig 2 mm,

$$\varphi \cdot R = 14 \text{ mm}, \quad R = 35700 \text{ mm}$$

Krumningsradien er altsaa 35,7 m.

Det er ofte saa, at et Instrument ved Brugen skal have en bestemt Stilling til det vandrette Plan; denne Stilling kan man

gøre kendelig ved at anbringe to paa hinanden vinkelrette Libeller i fast Forbindelse med Instrumentet, og den kan tilvejebringes, naar dette bæres af 3 lodrette Skruer (Stilleskruer), som man forstiller, indtil begge Libeller vise Nul. Ved grovere Indstillinger kan de to Rørlibeller erstattes af en enkelt *Daaselibelle,* som bestaar af en flad Metaldaase, der er tæt lukket med et svagt buet rundt Glas (Fig. 10), og som paa en lille Boble nær er udfyldt med en Vædske. I Glasfladen er der om Midten ætset en Cirkel, efter hvilken Boblen indstilles.

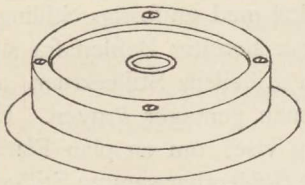


Fig. 10

Katetometret. Naar man ved Sigtning vil maale Afstanden mellem to Punkter, maa man som før nævnt have disses Forbindelseslinie parallel med Maalestokken. Dette opnaaes, naar der sigtes paa nogenlunde Afstand, lettest og sikrest ved at gøre begge Retninger lodrette. Heri ligger en af Grundene til, at Katetometret er et saa anvendeligt Maaleapparat. En anden Grund er, at man kan bruge Katetometret til Maaling af to Punkters Højdeforskel, selv om Punkterne ikke ligge i samme lodrette Linie, en Maaling, der hyppig falder for ved fysiske Arbejder.

Katetometret bestaar af en lodret Støtte, som bæres af en svær Trefod paa tre Stilleskruer, i hvilken den kan drejes om en Axe, som er godt bestemt ved en omhyggelig Afdrejning af de Flader, der bevæges mod hinanden. Paa Støtten er afsat en Maalestok, og udenom den er lagt et Hylster, som kan forskydes op og ned men er hindret i at drejes om Støtten. Hylsteret bærer en Kikkert, som er bevægelig om en lodret Axe; den holdes i Stilling ved en Skrue *s*, ved hvilken man kan forandre dens Hældning. Ved en paa Kikkerten anbragt Libelle ser man, om Kikkertens geometriske Axe er vandret. En Nonie *n* er fæstet til Hylstret, den viser paa Maalestokken Kikkertaxens Højde.

For at kunne indstilles fint i den rette Højde og for at kunne fastholdes, naar Højden er funden, er Kikkertens Hylster forbunden ved en lodret Finskrue med et andet lavere siddende Hylster, som spændes fast til Støtten ved en Spændeskrue *t*. Vil man sigte til et Punkt, bringer man Kikkerten i Højde dermed, idet man løsner Spændeskruen og løfter eller sænker begge Hylstere; har man omtrent den rette Højde, spændes det nederste Hylster

fast, hvorefter man ved Skruen *s* stiller Kikkerten vandret og ved Drejning paa Finskruen indstiller den i den rette Højde.

Naar man skal bruge Katetometret, stiller man paa den S. 23 omtalte Maade Støttens Omdrejningsaxe lodret ved Kikkertlibellens Hjælp. Kikkertaxen maa forud for ethvert Sigte stilles vandret. Da man kommer til at sigte til Punkter i forskellige Afstande, som ikke ere mange Gange større end Objektivets Brændvidde, og da Traadkorset i ethvert Tilfælde skal ligge i Billedplanet, maa man hyppig forandre Traadkorsrørets Udtræk; herved er der en Mulighed for, at den optiske Axe forrykkes. Hvis den deraf følgende Fejl kan faa Betydning (den søges forringet ved at give Røret en omhyggelig Styring), maa man paa den S. 21 omtalte Maade bringe Sigteaxen til at falde sammen med Kikkertens geometriske Axe; det er nemlig den sidste, der bliver vandret ved Libellevisningen.

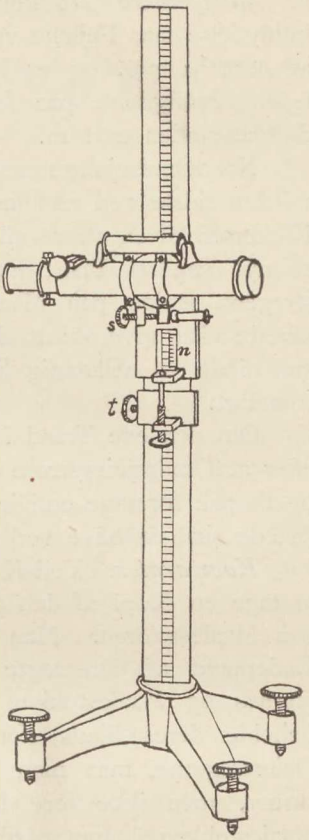


Fig. 11

Naar de to Punkter, hvis Højdeforskel maales, ligge i samme lodrette Linie, bliver Afvigelsen mellem Kikkertens Sigteaxe og geometriske Axe samt mellem den sidste og Libelleaxen (den Retning i Libellen, der er vandret, naar Boblen staar paa Nul) uden Betydning. En lille Afvigelse i Katetometeraxens Stilling fra den lodrette faar i dette Tilfælde kun forsaavidt Betydning, som Maalestokken derved bliver skraa; den virkelige Længde l' er da lig Projektionen paa Lodlinien af den aflæste Længde l. Er Afvigelsen φ, bliver, idet φ er en lille Vinkel

$$l' = l\cos\varphi = l(1 - {}^1/_2\,\varphi^2),\quad l' - l = -\frac{\varphi^2}{2}l$$

Er f. Ex. $\varphi = 0{,}0003$ (omtr. 1 Bueminut) og $l = 1\ m$, bliver $l - l'$ kun omtrent 0,00005 mm. Da en Hældning paa 1′ vil give sig tilkende selv ved en grov Libelle, indkommer der vanskelig Fejl af Betydning af den Grund.

Jo fjærnere det Punkt ligger, hvis Højde søges, des større Indflydelse faar Fejlene ved Libelleboblens Indstilling; antages den at være $^1/_4$ mm, og er Krumningsradius 30 m, bliver Indstillingsfejlens Indflydelse paa Højdens Bestemmelse lig $^1/_{120}$ mm, naar Sigteafstanden er 1 m.

Naar Omdrejningsaxen er lodret og Kikkertens Sigteaxe vandret, vil den sidste ved en Omdrejning beskrive et vandret Plan. Flyttes Kikkerten til en større eller mindre Højde, vil dens Axe beskrive et nyt vandret Plan; har man i begge Tilfælde aflæst Nonienulstregens Højde paa Maalestokken, vil Differensen mellem de to aflæste Tal give de to Planers Højdeforskel; det er herved man kan finde to vilkaarlig liggende Punkters Højdeforskel ved Katetometret.

Om den ene Traad i Traadkorset er nøjagtig vandret prøves, efter at Omdrejningsaxen er gjort lodret, ved at sigte til et Punkt og derpaa foretage en lille Drejning om den lodrette Axe. Punktets Billede skal da blive ved at ligge i Traaden.

Komparator. Ved Komparatoren maaler man en Længde ved at tage en Kopi af den og sammenligne Kopien med en Længde paa Maalestokken. Man stiller to Mikroskoper ind hver paa sit Endepunkt af den søgte Længde *ab* (Fig. 12), hvorefter denne fjærnes og Maalestokken føres ind under Mikroskoperne, som beholde deres Plads uforandret. For at faa skarpt indstillet paa Delestregerne, maa man løfte eller sænke Maalestokken ved Finskruer, men ikke røre Mikroskoperne; herved opnaar man, at Maalestokken kommer til at ligge i samme Plan AB som det,

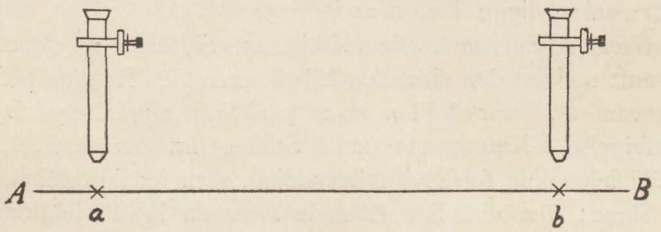


Fig. 12

hvori den søgte Længdes to Endepunkter før laa; disse Punkter ere blevne erstattede af Mikroskopaxernes Skæringspunkter med nævnte Plan, som er godt defineret, da en Forøgelse paa en lille Brøkdel af en mm af Afstanden mellem Objektet og Mikroskopet er nok til at gøre Billedet uskarpt eller rykke det synligt ud

af Traadkorsets Plan. Mikroskoperne forsynes med Mikrometer til Maaling af Brøkdele af mm.

Maaling ved Komparator kan blive meget nøjagtigere end ved Katetometer, dels fordi Sigteapparaterne sidde uforanderligt ved begge Aflæsninger, dels paa Grund af Forstørringen ved Mikroskopet. Endvidere kan Maalestokkens Temperatur bestemmes sikrere ved Komparatoren, fordi man ikke behøver at røre den under Maalingen, mens man ved Katetometret i alt Fald maa tage paa Metaldele, som ere i godt varmeledende Forbindelse med Maalestokken.

Mikrometerskruen indrettes sædvanlig saaledes, at Skruen kan drejes rundt men er hindret i at forskydes frem eller tilbage, mens Møtriken er hindret i at drejes men kan forskydes i Skrueaxens Retning. Møtriken vil derfor flytte sig frem ved Skruens Omdrejning et Stykke, der er proportionalt med Omdrejningens Størrelse. Til Aflæsning af denne forsynes Skruen med et stort Hoved, Tromlen, paa hvis Rand der er anbragt Inddelinger, mod hvilke der er lagt en med Index eller Nonius forsynet fast Viser. Da man uden særlige Midler let kan iagttage $^1/_{500}$ af en hel Omdrejning, og da man uden Ulæmpe kan bruge Skruegangshøjder mindre end $^1/_2$ mm, sees det, at Skruen er vel egnet til Udmaaling af smaa Dimensioner med den fornødne procentiske Nøjagtighed.

I Komparatoren, undertiden ogsaa i Katetometret, bruges Mikrometret til Bestemmelse af Brøkdele af mm. Det kan i Forbindelse med et Mikroskop indrettes som Objektivmikrometer eller Okularmikrometer. I første Tilfælde forskydes ved Hjælp af Skruen Mikroskopet parallelt med sig selv hen over Objektet, eller Objektbordet forskydes i sit eget Plan hen under Mikroskopet.

Et med Objektivmikrometer forsynet Mikroskop er fremstillet ved M^1 i Fig. 16. Det bæres af en Slæde, der føres ved en Skrue, hvis Hoved og Tromle sees tilhøjre for Stativet. Mikroskopet er forsynet med Traadkors (vist i Fig. 13); Traaden ab ligger i Slædens Bevægelsesretning. Skal man maale Afstanden mellem to Punkter, faar man deres Billeder α og β til at falde i Traaden ab, hvorefter man flytter Mikroskopet saaledes, at først α og dernæst β falder i Traadpunktet, idet man hver af de to Gange aflæser Mikrometerskruens Stilling. Den deraf fremgaaende Flytning af Mikroskopet er lig Punkternes Afstand.

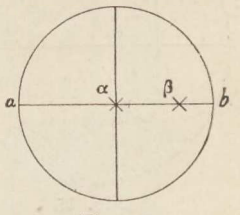


Fig. 13

Ved Okularmikrometret maaler man ikke selve Længden men det forstørrede Objektivbillede af denne. I den Hensigt er der i Mikroskopet anbragt en Traad i en Ramme, der kan forskydes ved en paa Siden af Mikroskoprøret anbragt Mikrometerskrue (ved M_2 i Fig. 16). Billederne af de to Punkter, hvis Afstand søges, bringes til begge at falde i den paa Mikrometertraaden vinkelrette Traad (Fig. 14), hvorefter Mikrometertraaden føres ved Skruen fra det ene Billede til det andet. Divideres den maalte Afstand med Objektivets Forstørring, faaes den virkelige Længde. Forstørringen findes ved at anbringe en lille Maalestok under Mikroskopet og maale Billedet af 1 mm eller en bekendt Brøkdel deraf.

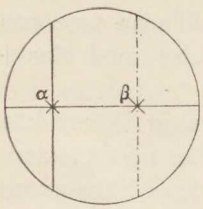


Fig. 14

Da man ved Okularmikrometret maaler et forstørret Billede, kan man opnaa større Nøjagtighed end ved Objektivmikrometret; men man kan ikke maale større Længder end dem, der paa én Gang kan oversees i Mikroskopets Synsfelt. Det er et Fortrin ved Okularmikrometret, at hverken Mikroskopet eller Objektet flyttes under Maalingen.

Naar man, som før omtalt ved Komparatoren, har afmaalt den søgte Længde mellem Mikroskoperne og derpaa har anbragt Maalestokken under disse, forskyder man Maalestokken, til en Delestreg sees sammenfaldende med det ene Mikroskops Traad; den bevægelige Dobbelttraad *cd*, Fig. 15 i det andet, med Okularmikrometer forsynede, Mikroskop vil da falde mellem to Delestreger, hvis Billeder sees i p og q. Man finder nu det ubekendte Brøkoverskud over de hele mm, som svarer til Afstanden mellem *cd* og p, ved at maale den Drejning n af Skruen, der maa til for at føre *cd* til p, og derefter den Drejning N, der maa til for at føre *cd* fra q til p. Den søgte Brøk er da n/N. Fig. 16 viser Synsfeltet i Mikroskopet. Takkerne i den fastsiddende Plade for neden tjener til at lette Tælningen af Antallet af hele Omdrejninger, idet Afstanden mellem dem er lig Skruegangshøjden.

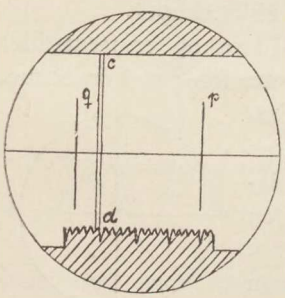


Fig. 15

Ved Maaling med Mikrometerskrue maa man sikre sig mod Dødgangen i Skruen; den viser sig, naar man skifter Omdrejningsretning, ved at Skruen kan drejes en større eller mindre Vinkel,

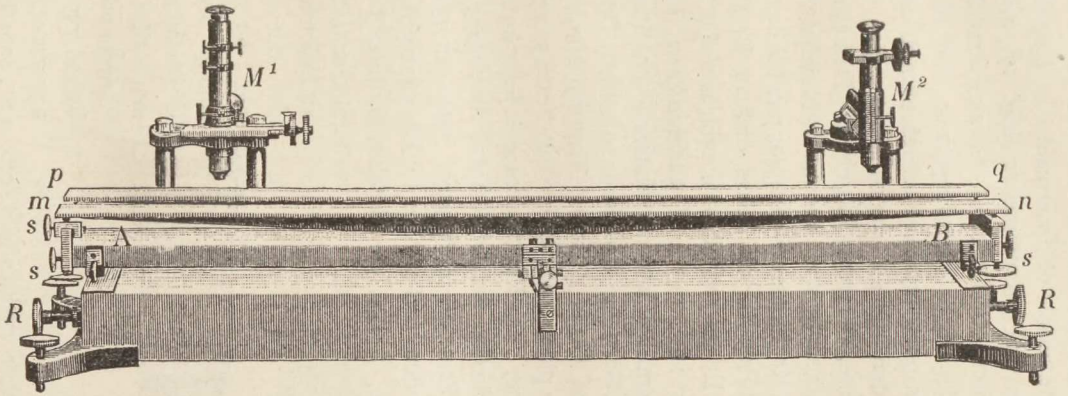


Fig. 16. *Komparator* (omtr. $^1/_{10}$ virkelig Størrelse). Paa Oversiden af et svært Støbejærnsunderlag, som bæres af 4 Stilleskruer er der ved Enderne fremstillet to plane Flader; paa disse gaa 4 Ruller, som bære Bjælken AB, Vognen. Denne kan føres frem eller tilbage, ved at man drejer paa et af Haandtagene R; Vognen er styret i sin Bevægelse ved en midtvejs paa Underlaget anbragt Styreskinne og to Styrehjul paa Vognen. De to Borde mn og pq bæres, støttede ved Enderne, af Vognen; de kunne ved Stilleskruernerne s dels løftes eller sænkes dels forskydes i deres Længderetning. Paa disse Borde anbringes de to Længder, der skulle sammenlignes. Paa Bagsiden af Underlaget er der anbragt en svær Styreskinne, hvorpaa Fodstykkerne for de to Mikroskoper M^1 og M^2 kunne glide. Mikroskoperne naa saa langt frem over Underlaget, at man ved at flytte Vognen kan faa enten det ene eller det andet Bord bragt hen under deres Objektiver. Ved Stilleskruerne s kan man faa det paa Bordet anbragte Objekt retstillet til Mikroskoperne. Instrumentet er udført af Société Génevoise p. la constr. des instrum. de physique.

uden at der følger nogen Flytning af Møtriken med. Man maa derfor afslutte Indstillingerne paa de to Punkter, hvis Afstand søges, ved Omdrejninger i samme Retning.

FØLEMAAL. Vil man maale et Tværmaal i et Legeme, kan man benytte en Stangpasser eller Krumpasser (Fig. 17), idet man fører de to Passerben sammen om Legemet, til man kan føle ved Gnidningsmodstanden, at de begge røre Legemet; ved Krumpasseren maa man ved en Maalestok søge Afstanden mellem de to Flader paa Passerbenene, der rørte Legemet. Det har nogen Vanskelighed at skønne Brøkdelen af mm, naar Krumpasseren lægges paa Maalestokken, fordi Passerbenet delvis dækker Restbrøken.

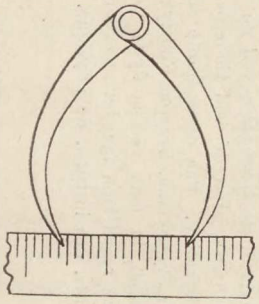


Fig. 17

Et finere Følemaal opnaaes ved Skruen. Den anvendes i *Traadmaaleren* (Fig. 18). Skruen har her sin Møtrik i en Staalbøjles ene Gren og kan føres mod en Tap i den anden Gren. Saavel Tappen som Skruen have plane Endeflader vinkelrette paa Skruens Axe. Skruehovedet danner et Rør udenom den forlængede Møtrik. Paa den sidste aflæses det hele Antal Skruegangshøjder og paa Rørets Rand den Brøkdel af Højden, som sammen med det hele Antal giver Afstanden mellem de to Endeflader; mellem disse anbringes det Legeme, f. Ex. en Metaltraad, hvis Tykkelse skal maales. Ved alt Følemaal gælder det om at øve det mindst mulige Tryk mod Objektet af Hensyn til dettes Sammentrykkelighed og Maaleapparatets Bøjelighed. Ved Sammenligninger gælder det ofte om, at Trykket hver Gang er éns; derfor er Skruens Hoved forsynet med en Hætte, som man fatter om under Drejningen; den spænder svagt om Skruehovedet, som derfor følger med, naar Skruen er fri, men standser, naar den møder Objektet, selv om man vedbliver at dreje.

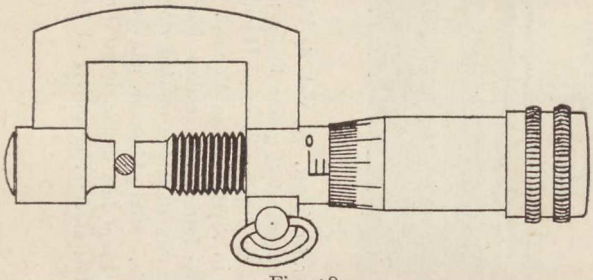


Fig. 18

Sfærometret er en Trefod, der stilles paa en plan Glasplade. I Midten har den en lodret Skrue med et stort skiveformigt Hoved med Delekreds. Man aflæser Skruens Stilling, naar den møder det Legeme, hvis Tykkelse maales, og som er anbragt paa Glaspladen under Skruen. Derpaa fjærnes Legemet, og man fører Skruen ned, til den møder Pladen, og aflæser paa ny dens Stilling. Man føler sig til Skruens Møde med Fladen, derved at Skruen kommer til at bære en Del af Apparatets Vægt og saaledes formindsker Gnidningsmodstanden mellem Trefoden og Glaspladen.

En Skrue, der bruges til Maaling, maa undersøges, naar man vil have fuld Nytte af den, og naar der ved de benyttede Iagttagelsesmidler kan paavises Forskel i de forskellige Skruegangshøjder. Undersøgelsen kan ske ved at udmaale samme Objekt flere Gange under saadanne Forhold, at man hver Gang har forskellige Dele af Skruen i Møtriken.

MAALESTOKKEN. For at tilvejebringe en Maalestok f. Ex. en Meter med sine 1000 mm, maa man først afmaale den hele Meter og derpaa dele denne i 1000 lige store Stykker. Det at dele en given Længde i et vist Antal lige Dele kan ske paa forskellig Maade. En Fremgangsmaade er den i Fig. 19 viste, hvor man hen ad CD har afsat de vilkaarlig valgte lige store Længder 1, 2, 3 . . . ., og hvor $AB \neq CD$ er den Længde, der skal deles.

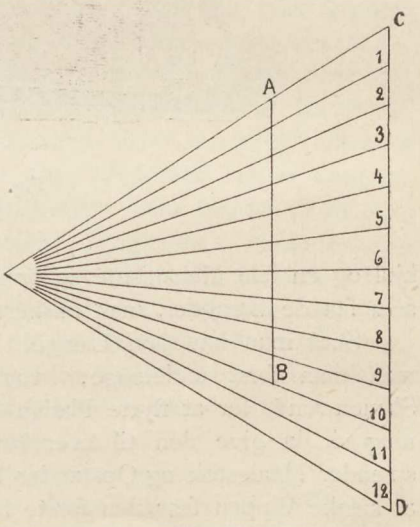


Fig. 19

Ønsker man større Nøjagtighed bruges *Delemaskinen* (Fig. 20). Den bestaar af en svær Støbejærnskasse, der ved Enderne har Lejer for en fint forarbejdet Staalskrue med Haandtaget H og den inddelte Tromle V. Fra Møtrikken M gaar en Arm ned i en Rille i Kassens Bund til Styring. Møtriken er i Indgriben med Støbejærnspladen P, paa hvilken Maalestokken fastspændes. Pladen glider paa og styres af de afhøvlede Rande af Kassens Sidevægge.

En Opstander SS, der kan fastspændes paa passende Sted paa en Længdeskinne paa Kassens Bagvæg, bærer en med Haandtaget R forbunden Vippe, der gaar frem over Pladen P. I Vippen sidder en Stift g til Indridsning af Delestregerne. Ved et Spær-

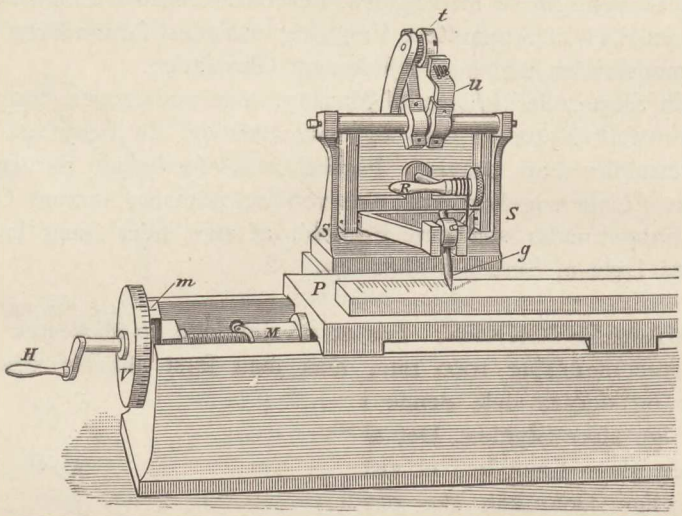


Fig. 20

hjul og en lille Mekanisme *ut* opnaaes det, at Delestregerne af sig selv faa de Længder, man ønsker.

Skal man have en Længde L afsat og delt i N lige Dele, maa man først undersøge, hvor mange Gange man skal dreje Skruen rundt for at flytte Pladen Længden L. $1/N$ af denne Drejning vil da give den til hver Inddeling svarende Drejning. Man spænder Maalestok og Opstander fast i saadan Stilling, at man ved at sænke Vippen faar den første Delestreg afsat, hvor man ønsker. Derpaa løftes Vippen, og man giver Skruen den afmaalte Drejning, hvorefter den anden Delestreg afsættes og saaledes videre, til hele Længden er afsat.

Man kan kopiere en Maalestok, naar den er afsat paa Glas, paa følgende af *Bunsen* angivne Maade. Man fastspænder Maale-

stokken og Stangen, der skal modtage Kopien, i Forlængelse af hinanden og anbringer det ene Ben af en lang Stangpasser i Maalestokkens første Delestreg, mens man med det andet Ben ridser den første Streg i Kopien. Paa samme Maade faar man de øvrige Delestreger i denne, idet man hver Gang flytter Stangpasserens første Ben en Inddeling frem paa Maalestokken. Fremgangsmaaden er betydelig hurtigere end ved Delemaskinen, og der kan opnaaes en ikke ringe Nøjagtighed. Originalmaalestokken maa være af Glas for ikke at ridses. Fine Delestreger i Glas faaes ved at ridse med Diamant, grovere ved at overtrække Glasset med et tyndt Lag Vox og ridse i dette, hvorefter Stregerne ætses ind i Glasset ved Flussyre, som ikke angriber Voxet.

Maalestokken afsættes efter Omstændighederne paa en, hyppigst flad, Stang af Staal, Messing eller Træ eller paa et tyndt Baand af Staal. Det sidste fylder kun lidt, naar det rulles op, og kan bruges til at maale henad en krum Flade. En Mellemting mellem Stang og Baand ere de flade Skinnemaal af Metal, Ben eller Træ, der ere delte i Led, saa de kunne slaaes sammen.

Ved Præcisionsmaalestokke, hvor man vil kunne gøre Regning paa $^1/_{1000}$ mm, hvilken Længde kaldes en *Mikron* og betegnes med μ, maa man tage Hensyn til, at en Stang som bøjes, bliver forlænget paa den udbuede og forkortet paa den indbuede Side. En Stang, der er 1 m lang og 2 cm tyk, og som bøjes saa meget efter en Cirkelbue, at Buens Pil bliver $^1/_{10}$ mm, vil derved faa en Længdeforandring paa $^8/_{1000}$ mm. De Bøjninger, man faar med at gøre ville i Reglen hidrøre fra Stangens egen Vægt; man vil derfor give Tværsnittet en saadan Form, at Stangen faar stor Stivhed i Forhold til Vægten. Man vælger sædvanlig H-Formen (Fig. 21), hvor Inddelingerne afsættes i Bunden af den Rende, som dette Tværsnit giver; herved kan man opnaa, at Inddelingerne falde i det neutrale Længdesnit i Stangen, det som hverken forkortes eller forlænges ved Bøjning.

Den Flade, hvorpaa Stregerne afsættes, poleres for at kunne modtage fine Streger. Naar Stangen ikke er af ædelt Metal, lægger man et Baand, sædvanlig af Sølv, ned i den til Modtagelse af Stregerne; det sees i Gennemsnit i Fig. 21.

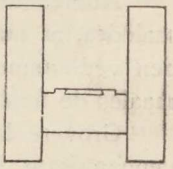


Fig. 21

Maalestokkens Længde er en Funktion af Temperaturen; for organiske Materialiers Vedkommende kan den tillige afhænge af Fugtigheden; adskillige Stoffer kunne i Tidens Løb lide varige

Længdeforandringer. Glas, Staal og Platin udmærke sig ved smaa Udvidelseskoefficienter, omtrent $^1/_{100\,000}$; Messings og Sølvs Koefficient er henved det dobbelte. En Meter afsat paa Messing med Udvidelseskoefficient $18 \cdot 10^{-6}$, som er rigtig ved 0^0, vil ved 20^0 C. være 0,36 mm for lang. I de senere Aar har man funden en Legering af Nikkel og Jærn, som næsten ikke udvider sig ved Varmen; Udvidelseskoefficienten kan gaa ned til $0{,}9 \cdot 10^{-6}$.

Undersøgelse af en Maalestok. Indeholder en Maalestok N Inddelinger, skulde Delestregen med Tallet n have en Afstand fra Nulstregen, der er n/N af den hele Længde. Er dens virkelige Afstand $n/N + \delta$, er δ vedkommende Delestregs Fejl. For at finde Fejlene kan man begynde med de Streger, der skulde dele Længden i f. Ex. 5 lige Dele, ved en Meterstok altsaa Stregerne 20, 40, 60, 80. Nulstregen og 1000 Stregen ere efter Fejlens Definition rigtige. Ved et Maaleapparat udmaaler man hver af de 5 Dele i en vilkaarlig Enhed, men saaledes, at man er sikker paa at maale alle Delene med samme Enhed. Ere de fundne Længder l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, og kaldes deres Sum L, blive de virkelige Afstande fra Nulstregen, udtrykte i Meteren som Enhed

$$\frac{l_1}{L}, \quad \frac{l_1 + l_2}{L}, \quad \frac{l_1 + l_2 + l_3}{L}, \quad \frac{l_1 + l_2 + l_3 + l_4}{L},$$

mens Tallene paa Maalestokken angive dem at være henholdsvis $^1/_5$, $^2/_5$, $^3/_5$, $^4/_5$. Forskellene ere Fejlene eller Korrektionerne d. v. s. de Tal, man skal lægge til Delestregernes Tal for at faa de virkelige Afstande fra Nulstregen til Delestregerne.

Ved den videre Undersøgelse betragter man nu enhver af de 5 Afdelinger som en selvstændig Maalestok og behandler den paa samme Maade som før den hele Meter, og saaledes fortsætter man, til man har funden Fejlen ved enhver af Delestregerne.

Komparatoren kan anvendes til Undersøgelse af en Maalestok saaledes, at man stiller Mikroskoperne i en Afstand, der omtrent er den vedkommende Underafdeling af Maalestokken; ved Mikrometret maales de forskellige Underafdelingers Afvigelse fra denne Afstand.

Grovere Maalestokke kan man ret bekvemt undersøge ved en gennemsigtig Maalestok, hvor Underafdelingerne af mm er fremstillede ved et Næt af hverandre skærende Parallellinier (S. 14).

Længdeenheden. Naar man har funden Korrektionerne paa Delestregerne, kan man indenfor Iagttagelsesfejlenes Grænser maale rigtig med Maalestokken, hvis man tillige kender dennes Længde

ved en given Temperatur i Forhold til Længdeenheden samt dens Udvidelseskoefficient. Den bedst definerede Enhed er Meteren; den er bestemt som Afstanden ved 0^0 C. mellem to fine Streger (6—8 μ brede) afsatte paa en Stang, for hvilken Valget af Materiale og Form er fremgaaet som Resultat af en yderst omhyggelig Forundersøgelse.

Ifølge en Overenskomst af 1875 mellem 18 forskellige Stater blev der oprettet en Institution: »Bureau international des Poids et Mesures« i Sèvres; den bestyres af en »international Komité for Maal og Vægt«, der samles hvert andet Aar i Paris. Bureauets første Opgave var at tilvejebringe Mønstertyper (Prototyper) for Meteren og Kilogrammet, dels en international Type for hver af de to Størrelser, hvorved disse defineres, dels nationale Typer, Kopier af de internationale, til Uddeling til de i Overenskomsten deltagende Stater. Efter at dette Arbejde var sluttet, Danmark fik sine Mønstertyper i 1889, har Bureauet arbejdet paa forskellige Opgaver af Betydning for Længde- og Vægtbestemmelser, bl. a. Undersøgelse af Maalestokke og Vægtlodder, som i den Hensigt indsendes til Bureauet.

Da Meteren for omtrent 100 Aar siden, under den franske Revolution, blev indført, tilstræbte man at faa den bestemt ved et uforanderligt Naturmaal; man valgte den lig med Timilliontedelen af Jordkvadranten gennem Paris' Observatorium. Ved Gradmaalinger fik man denne Længde udmaalt i de gamle Enheder og dannede derefter en Stang af Platin, hvis Endefladers Afstand var den fundne Længde.

Da man imidlertid ved Nutidens Maalemidler kan paavise Forskel mellem denne Meter og Timilliontedelen af Jordkvadranten, har man opgivet den oprindelige Definition, og definerer nu, som ovenfor omtalt, Meteren ved den internationale Mønstertype, der er bragt i saa nær Overensstemmelse som mulig med den første Meter; denne kaldes Arkivmeteren efter dens Opbevaringssted. I en Legering af Platin og Iridium har man funden et Stof, der paa Grund af sin Haardhed er bedre skikket til Materiale for en uforanderlig Maalestok end det ublandede Platin. Endvidere foretrækker man nu at have Meteren som Afstanden mellem to Streger, Stregemeter, istedenfor mellem Endefladerne af en Stang, Endemeter. Endelig vælger man nu for Normalmaalestokke en Tværsnitsform, der giver den størst mulige Modstand mod Stangens Bøjning ved

dennes egen Vægt (Fig. 22, virkelig Størrelse). Af saadanne Grunde opgav man at beholde Arkivmeteren som Længdeenhed.

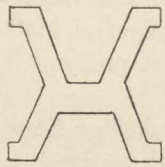


Fig. 22

Den internationale Mønstermeter er dannet af en Legering af 9 Dele Platin og 1 Del Iridium; den er 1020 mm lang fra den ene Endeflade til den anden og vejer 3,3 kg. Ved hver Ende har den 3 Streger i $^1/_2$ mm's indbyrdes Afstand. Det er Afstanden ved 0^0 C. mellem de to Midterstreger, der er Meteren; de 4 andre bruges ved Sammenligningen mellem Mønstermeteren og andre Metre. Mønstermeterens Længde ved en given Temperatur t er

$$M = 1\,m + 8{,}651\,t\,\mu + 0{,}00100\,t^2\,\mu,$$

hvor μ er en Mikron $= {}^1/_{1000}$ mm. De til forskellige Stater udleverede »nationale« Mønstermetre ere udførte i Lighed med den internationale og sammenlignede med denne i Bureauet. Den til Metrenes Undersøgelse byggede Komparator har to fastsiddende Mikroskoper, anbragte hvert paa sin murede Pille i 1 m indbyrdes Afstand. Mellem dem findes en tredie Pille med sit eget Fundament; den bærer Skinner til en lav Vogn, hvorpaa de to Metre, der skulle sammenlignes, anbringes i Vandbad saaledes, at den ene efter den anden kan føres ind under Mikroskoperne, der begge ere forsynede med Okularmikrometre til Iagttagelse af Længdeforskellen.

Ved Sammenligningen ligge begge Metre i samme Bad. Skal man bestemme en Meters Udvidelse ved Varmen, lægges den og en anden Meter, hvormed den første er sammenlignet, hver i sit Bad. Temperaturen varieres i det ene af disse, mens den holdes konstant i det andet, saa at man ved Mikroskoperne kan sammenligne den undersøgte Meters Længde ved forskellige Temperaturer med en uforanderlig Længde. Den Meter, Danmark har modtaget fra Bureauet, har ved Temperaturen t en Længde

$$M_d = 1\,m + 2{,}7\,\mu + 8{,}624\,t\,\mu + 0{,}00100\,t^2\,\mu$$

LÆNGDEMAALING VED LYSINTERFERENS. A og B (Fig. 23) ere to plane Glasplader, som kunne stilles meget nær parallele; den ene er fast, medens den anden kan forskydes parallelt med sig selv fra eller mod den første, f. Ex. ved Hjælp af en Mikrometerskrue. Foran A er der stillet en tredie Planglasplade D under 45^0 med A; den modtager Lys fra en Lyskilde L, der giver Lys af kun een Bølgebredde (monokromatisk Lys). Fra D

kastes Lyset vinkelret ind mod A; endel af det kastes tilbage fra A's Bagside og gaar gennem D til en Kikkert, hvor der dannes et Billede af den tilbagekastende Flade. En anden Del af Lyset gaar gennem A til B, fra hvis Forside noget kastes tilbage; det følges med det fra A tilbagekastede til Kikkerten, hvor det giver sit Bidrag til Billeddannelsen af A; Kikkerten er indstillet skarpt paa A. Ethvert Punkt af A's Billede faar altsaa dels direkte fra A tilbagekastet Lys, dels Lys som har været om ad B og som derfor, naar det kommer til Kikkerten, har tilbagelagt en Vejlængde, der er 2 Gange Afstanden mellem Pladerne længere end det førstnævnte Lys's Vej.

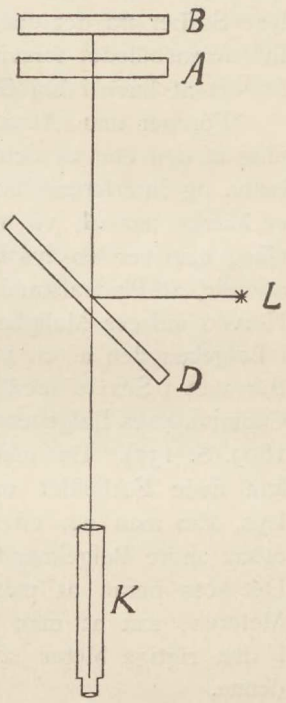


Fig. 23

Danne de to Plader A og B en lille Vinkel med hinanden, vil det Lys, som udgaar fra forskellige Steder af A, have ulige store Vejforskelle for de to Straaler. Det er bekendt fra Lyslæren, at to Straaler, der udgaa fra samme Punkt, og som ad forskellige Veje atter samles i et Punkt, interferere saaledes, at de kunne enten svække eller forstærke hinanden. Er Vejforskellen (den optiske) et ulige Antal halve Bølgelængder, bliver Lysstyrken Differensen, og er den et lige Antal, bliver Lysstyrken Summen af de to Straalers Lysstyrker. Heraf følger, at Pladen A's Billede maa være ulige lyst i forskellige Punkter, idet Vejforskellen voxer i Retning bort fra Skæringslinien mellem de to Glasfladers Planer. Ved tilstrækkelig stor Afstand fra Kikkerten til Pladen A vil det Interferensbillede, som frembringes, bestaa af ækvidistante lyse Striber adskilte ved mørke Mellemrum og parallele med den nævnte Skæringslinie. Afstanden mellem Striberne er bestemt ved, at Vejforskellen er $^1/_2$ Bølgelængde større i den mørke end i den nærmest foregaaende lyse Stribe.

Er der Lys med forskellige Bølgelængder blandet sammen, vil der dannes lige saa mange Stribesystemer, som der er Bølgelængder; hvert System har sin af Bølgelængden afhængige Stribeafstand. Natriumlyset indeholder to Bølgelængder: 0,5896 μ og 0,5890 μ;

de to heraf fremgaaende Systemer af Interferensstriber ville ved ringe Afstand mellem Pladerne *A* og *B* falde saa nær sammen, at man ikke ser der er to. Men med voxende Afstand gør den lille Forskel i Bølgelængde sig gældende i Retning af at forskyde det ene System i Forhold til det andet. Er Afstanden mellem Pladerne 250 Bølgelængder (omkring $^1/_6$ mm) vil det ene System være forskudt omtrent saa meget som Afstanden mellem en mørk og en lys Stribe, og Følgen heraf er, at det hele bliver lige lyst, idet de lyse Striber fra det ene System falder i de mørke fra det andet. Interferensbilledet forsvinder. Ved stor Vejforskel gælder det derfor om at have i høj Grad monokromatisk Lys.

Forøger man Afstanden mellem *A* og *B* ved Parallelforskydning af den ene af dem, forøges Lysets Vejforskel med det dobbelte, og Interferensbilledet vil derfor forskyde sig. Har man sat et Mærke paa *A*, vil man se Striberne passere henover det; hver Gang man ser en lys Stribe passere hen over Mærket, faar man at vide, at Pladeafstanden er bleven forøget med $^1/_2$ Bølgelængde. Herved indsees Muligheden af at udmaale en foreliggende Længde i Bølgelængden af en bestemt Slags Lys som Enhed. Man har i Bureauet i Sèvres med stor Sikkerhed talt det Antal af det grønne Cadmiumlyses Bølgelængder, der gaar paa 1 Meter (se »Ingeniøren« 1899, S. 137). Da man ved Gitterspektret med stor Nøjagtighed kan finde Forholdet mellem Bølgelængderne for forskellige Slags Lys, kan man nu, efter at Cadmiumlyset er maalt absolut, finde ogsaa andre Bølgelængder udtrykt i den rigtige Meter som Enhed. Det sees heraf, at man i Lysbølgelængden har et Naturmaal for Meteren, saa at man nu har Betingelserne for at kunne maale i den rigtige Meter som Enhed uden at have nogen Kopi af denne.

Ved det ovenfor omtalte ved Fig. 23 illustrerede Interferensforsøg faar man kun en ringe Brøkdel af det paa Pladen *D* faldende Lys ind i Kikkerten; det allermeste gaar igennem de tre Plader. Herved nødes man til at lægge en Hovedvægt paa Lysets Styrke istedetfor paa dets Renhed. Man forsølver derfor de tre Flader, hvis Tilbagekastning tjener til Interferensen; men da Lyset baade skal tilbagekastes fra og gaa igennem Pladerne *A* og *D*, lægger man paa dem et saa tyndt Lag Sølv, at det lader Halvdelen af Lyset slippe igennem og kaster Halvdelen tilbage; dette kan opnaaes ved at afpasse den Tid, som Pladen tilbringer i Badet, der udfælder Sølvet paa den. Paa denne Maade faar man henved

$^1/_5$ af Lyset ind i Kikkerten. Brugen af forsølvede Plader medfører tillige den store Fordel, at de lyse Striber blive betydelig smallere end de mørke Mellemrum.

Exempel paa en Mikrometermaaling. Den lille Axe a i det elliptiske Snit af Kanalen i et Termometerrør blev maalt under Mikroskoperne i den i Fig. 16 afbildede Komparator. Objektivmikrometret M_1 gav, at Axen maaltes ved 56,4 Tromledele. En $^1/_2$ mm, anbragt under samme Mikroskop, maaltes ved 100,0 Tromledele. Altsaa findes Axen

$$a = \frac{56{,}4}{100} \cdot 0{,}5 \text{ mm} = 0{,}282 \text{ mm}$$

Okularmikrometret gav, at Lilleaxens Billede maaltes ved 556 Tromledele. Billedet af samme $^1/_2$ mm som før maaltes ved 993 Tromledele. Heraf følger

$$a = \frac{556}{993} \cdot 0{,}5 \text{ mm} = 0{,}280 \text{ mm}$$

Ved Okularmikrometret udmaaltes ogsaa den store Axe; den fandtes lig 0,554 mm.

II. Vinkelmaaling.

Forudsætningen for Maaling af en Axedrejning ved en inddelt Kreds er, at Axen gaar igennem Kredsens Centrum; er det ikke Tilfældet, vil man maale Vinkelen for stor paa den ene Side af Kredsen og for lille paa den modsatte. Fejlen elimineres, naar man bruger to modsat rettede Visere og tager Middeltallet af de ved de to Visere aflæste Drejninger. Middeltallet giver tillige den sædvanlige Udsigt til Udjævning af tilfældige Fejl.

Fejl i Delestregernes Beliggenhed kan findes paa lignende Maade som den der blev omtalt for Maalestokkens Vedkommende, idet man til Udmaaling af en og samme Vinkel efterhaanden benytter forskellige Delestreger.

SPEKTROMETRET er indrettet til Iagttagelse af Lysets Retningsforandringer og til deraf afhængige Bestemmelser f. Ex. Maaling af Vinklen mellem to spejlende Flader. Det bestaar af en Trefod, som bærer et om en lodret Axe drejeligt Bord *B* (Fig. 24), hvis Drejning kan maales ved en Delekreds; endvidere er der anbragt en Kollimator *C* og en Kikkert *K*. Den første skal levere Lys rettet ind mod Axen, den anden skal vise den Retning Lyset følger ud fra Axen. Kollimatoren er et mod Axen rettet Rør, der indad er lukket med en Linse, udad med en Plade, hvori der findes en Spalte parallel med Axen. Spalten, hvorigennem Lyset sendes ind, er anbragt for Enden af et Udtræksrør, saa at man ved Forskydning af dette kan bringe Spalten ind i Kollimatorlinsens Brændplan. Herved opnaar man, at Lyset fra Spaltens Midte, der kan være mærket ved en Tværtraad, gaar ud fra Linsen parallelt med Kollimatoraxen; Linsen danner et uendelig fjærnt Billede af Spalten.

Det parallele Lys har det Fortrin for det divergerende eller konvergerende, at der kun er een Lysretning i det. Dog maa det erindres, at hvert Punkt i Spalten giver sit Bundt af parallelt Lys, altsaa sin Lysretning. I Reglen kan man ved en Finskrue, s_1 i

Fig., variere Spaltens Bredde; denne kan vælges forskellig efter Lysstyrken, Forstørringen, Traadens Tykkelse og andet.

Naar Kikkerten opfanger Kollimatorens parallele Lys, skal den vise et skarpt Billede af Spalten; det vil være Tilfældet, hvis den er indstillet paa uendelig fjærnt Syn, altsaa hvis Traadkorset er i Objektivets Brændplan. For Vinkelmaalingens Skyld skulle endvidere begge optiske Axer være vinkelrette paa Omdrejningsaxen. Disse forskellige Indstillinger kunne opnaaes paa en simpel Maade,

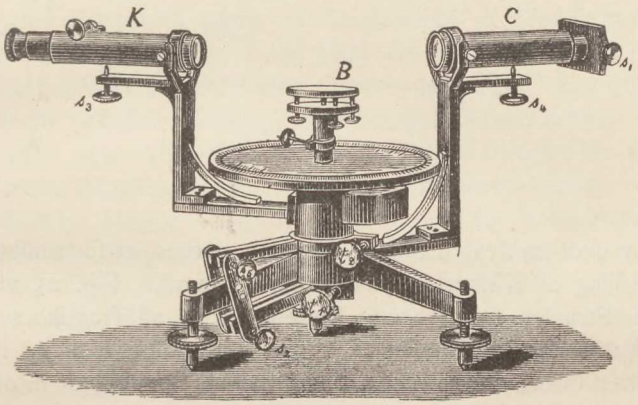


Fig. 24. *Spektrometret.* Kikkerten K støttes af en vandret Axe tæt bagved Objektivet og af Stilleskruen s_3, ved hvilken dens Hældning kan forandres. Støtten, som bærer Kikkerten, udgaar fra den lodrette Omdrejningsaxe. Kollimatoren bæres paa samme Maade, men dens Støtte er i fast Forbindelse med Trefoden. Naar Spændeskruerne t_1 og t_2 trækkes til, hindres henholdsvis Bordets og Kikkertens frie Omdrejning, ved at Arme, der udgaa fra Axerne, møde Stilleskruerne s_2 og s_5. Ved at dreje paa disse, kan man give Bord eller Kikkert den ringe Omdrejning, hvorved man opnaar den nøjagtige Indstilling ved Maalingen.

naar man har gjort Kikkertens Traadkors lysende, i Reglen ved at belyse det bagfra gennem et Hul i Siden af Okularrøret, indenfor hvilket man anbringer en Glasplade under 45° med Kikkertaxen. Paa Bordet, der kan stilles ind i Forhold til Axen ved Stilleskruer, anbringes lodret en planparallel Glasplade S (Fig. 25). Man drejer Bordet, til Pladen skønnes vinkelret paa Kikkertaxen. Ligger nu Traadkorset i Objektivets Brændplan, ville Straalerne fra ethvert af dets Punkter blive parallele efter Udtrædelsen og fra Glaspladen kastes parallele tilbage mod Objektivet; idet de her paany brydes, ville de danne et Billedpunkt i Brændplanet. Man vil derfor ved Siden af Traadkorset se et Spejlbillede af dette.

Hvis Traadkorset ikke ligger, som det skal, i Objektivets Brænd-

plan, vil Spejlbilledet falde enten foran eller bagved Traadkorset; og da dette vil give sig tilkende, ved at Billedet er uskarpt eller flytter

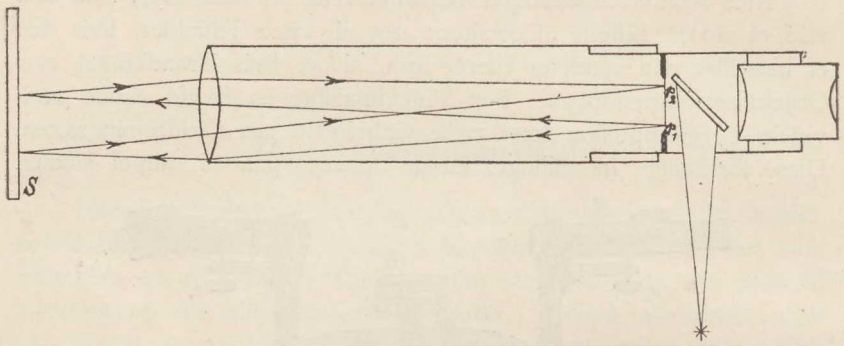


Fig. 25

sig, naar Øjet flyttes til Siden, har man herved et fortrinligt Middel til Indstilling af Kikkerten paa uendelig fjærnt. Fig. 25 viser den Vej, to Straaler fra det ene Endepunkt p_1 af Traadkorset følger ud af Kikkerten til Spejlet S og fra dette tilbage til p_2 i Objektivets Brændplan; det sees heraf, at Traadens Spejlbillede er omvendt.

De to Traadkors, man ser i Kikkerten, kan man faa til at dække hinanden ved at dreje Kikkerten dels til Siden, dels op eller ned; herved bliver Kikkertaxen vinkelret paa Glaspladen. Dette benyttes til at stille Kikkertaxen vinkelret paa Instrumentets Omdrejningsaxe. Drejer man nemlig Bordet og dermed Glaspladen 180^0 om den sidstnævnte Axe, faar man atter et Spejlbillede af Traadkorset at se; er Glaspladen parallel med Omdrejningsaxen, vil de to Kors atter dække hinanden; gør de det ikke, fører man dem sammen halvvejs ved at forandre Bordets og halvvejs ved at forandre Kikkertens Hældning. Ved at gentage dette nogle faa Gange opnaar man, at de to Kors dække hinanden ved begge Stillinger af Glaspladen, og er det Tilfældet, maa Kikkertaxen være vinkelret paa Instrumentets Omdrejningsaxe, da Glaspladen er vinkelret paa den første og parallel med den sidste.

Naar man nu efter at denne Indstilling er foretagen retter Kikkerten mod Kollimatoren og forandrer den sidstes Udtræk, til Spalten sees skarp, da giver Kollimatoren parallelt Lys. Forandrer man dernæst dens Stilling, til Midten af Spalten sees i Kikkertens Traadpunkt, da er Kollimatoraxen parallel med Kikkertaxen og følgelig ligesom denne vinkelret paa Omdrejningsaxen.

Sædvanlig er Kollimatorens Stilling uforanderlig under Maalingen, mens Kikkerten kan drejes om samme Axe som Bordet. Ved Nonier kunne de to sidstnævntes Stilling aflæses paa Delekredsen. Skal Vinklen mellem to spejlende Flader, f. Ex. de to brydende Flader i et Prisme, findes, maa Skæringslinien mellem Planerne stilles parallel med Axen. Det kan ske ved det lysende Traadkors, idet man stiller Prismet paa Spektrometrets Bord og forandrer paa dettes Hældning, indtil enhver af Fladerne ved at vendes mod Kikkerten giver et Spejlbillede af Traadkorset, der falder sammen med dette. I saa Fald ere begge Flader og dermed deres Skæringslinie parallele med Omdrejningsaxen. Har man den ene af de to Flader i Stilling vinkelret paa Kikkertaxen, vil den Vinkel, man maa dreje Bordet for derefter at bringe den anden i Stilling, være Supplementvinkel til Prismefladernes Vinkel.

Sædvanlig bruger man Kollimatorlyset til Vinkelmaalingen. Man spænder Kikkerten fast under en passende Vinkel med Kollimatoren og drejer Bordet, indtil man ser Spejlbilledet af Spalten i den ene Prismeflade i Kikkerten, saaledes at Spaltens Midte halveres af den lodrette Kikkerttraad. Bordets Nonies Stilling α paa Delekredsen aflæses. Derpaa bringer man den anden Prismeflade i samme Stilling ved at dreje Bordet og aflæser den nye Noniestilling α_2; $180^0 - (\alpha_2 - \alpha_1)$ vil da være Prismevinklen.

Er Delekredsens Diameter 15 cm, bliver dens Omkreds omtr. 47 cm, og hver Grad vil blive $^{47}/_{360}$ cm eller omtr. 1,3 mm lang. Man kan altsaa uden Vanskelighed aflæse halve Grader, eller med Lup $^1/_3{}^0$. Giver Nonius $^1/_{20}$ heraf, vil man kunne aflæse Vinklen med en Nøjagtighed af 1 Minut. Ved større Delekreds og Aflæsning ved Mikroskop kan man naa en hel Del videre med Aflæsningsnøjagtigheden, men hvor det gælder om at bestemme smaa Vinkler med Nøjagtighed, vil man foretrække særlige Fremgangsmaader. Hvis man saaledes vil indrette et Spektrometer til Maaling af Vinkelen mellem Lysstraaler, der høre til to tæt ved hinanden liggende Spektrallinier, anbringer man et Mikrometer i Kikkerten til Udmaaling af de to Liniers Afstand i Kikkertens Brændplan; er den funden lig a, og er Kikkertobjektivets Brændvidde P, da er den søgte Vinkel lig $\frac{a}{P} \cdot \frac{360}{2\pi} = \frac{a}{P}\, 57{,}30$ Grader. Sætte vi, at Objektivets Brændvidde er 30 cm, og at Afstanden mellem Spektrallinierne ved Mikrometret er funden lig 0,2 mm, da er Vinklen mellem Straalerne altsaa $57{,}30 \cdot {}^1/_{1500}{}^0 = 0{,}0382^0 = 2' 17{,}5''$.

Billedafstanden vil kunne maales med en Nøjagtighed af $^1/_{1000}$ mm, altsaa Vinklen med en Nøjagtighed af 0,7". Istedenfor at udmaale Brændvidde og Skruegangshøjde kan man finde Mikrometrets Konstant for Vinkelmaal ved at indstille det paa to fjærne Punkter, hvis Synsvinkel man finder ved at maale saavel Afstanden ud til dem som deres indbyrdes Afstand.

SPEJLAFLÆSNING. Ved Galvanometre, hvor en Magnet eller Traadrulle hænger bevægelig om en lodret Axe i et magnetisk Felt, bestemmer man Strømstyrken ved det Moment, der virker paa det ophængte Legeme, og Momentet findes ved den Drejning, Legemet faar under dets Paavirkning. Men Momentet afhænger foruden af Strømmen ogsaa af Legemets Stilling til Kraftlinierne, og da den forandres ved Drejningen, vil der ikke være Proportionalitet mellem Drejning og Strøm. Kun hvis Drejningerne ere meget smaa, kan man regne, at Proportionaliteten er tilstede. Af den Grund og tillige for at opnaa stor Følsomhed er det ønskeligt under disse og andre lignende Forhold at kunne maale meget smaa Vinkler med stor procentisk Nøjagtighed. Dette sker simplest ved Spejlaflæsning.

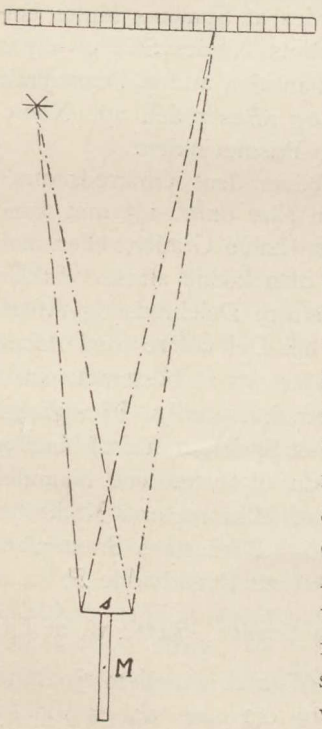


Fig. 26

Paa det ophængte Legeme *M* anbringer man et lille lodret stillet Spejl *s* og retter en vandret Lysstraale derimod. Man iagttager den Retning, i hvilken Spejlet kaster Lyset tilbage. Faar Legemet og dermed Spejlet en lille Drejning, vil den tilbagekastede Lysstraale faa en dobbelt saa stor Drejning, der iagttages, ved at Lyset kastes mod en vandret Maalestok (objektiv Spejlaflæsning). Jo længere Maalestokken er fra Spejlet, des større bliver den Længde, der tjener som Maal for Vinklen. Er Afstanden fra Spejl til Maalestok 1 m, vil en Drejning af Lysstraalen paa 1° flytte Lyset 17,45 mm. Da hertil kun svarer den halve Drejning af Spejlet, vil 1 Grads Drejning af dette svare til omtr. 35 mm Flytning af Lyset paa

Maalestokken; kan man iagttage en Flytning paa $^1/_5$ mm, sees det, at man kan iagttage en Drejning paa $^1/_{175}{}^0$ eller omtr. 20″.

For at faa et skarpt begrænset Lys paa Maalestokken, bruger man som Lyskilde en snæver, bagfra belyst, lodret Spalte i en Skærm eller den glødende Kultraad i en Glødelampe, og som Spejl et svagt krummet Hulspejl. Lyskilden stilles i en saadan Afstand fra Spejlet, at dette danner et skarpt Billede af den smalle Lysgiver paa Maalestokken (Fig. 26).

Man faar en finere om end i Reglen mindre bekvem Iagttagelse ved at bruge Kikkerten til Vinkelmaaling ved Spejlaflæsning. Overfor det lodrette Spejl stiller man en Kikkert (Fig. 27), som rettes mod Spejlet. Under eller over Kikkerten anbringer man en Maalestok, der stilles vinkelret paa Kikkertaxen og paa

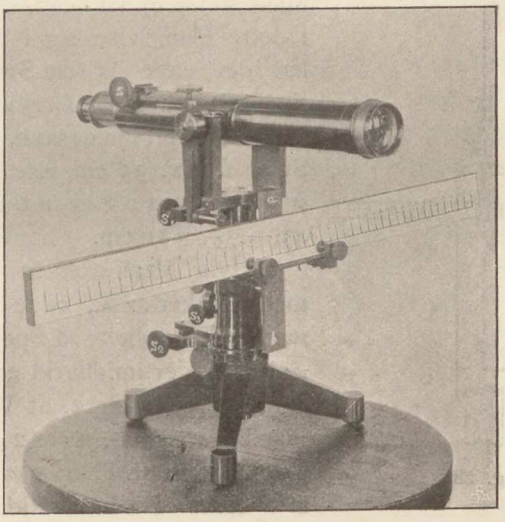


Fig. 27. *Spejlaflæsningskikkert.* Maalestokken fastspændes paa en Slæde, der kan forskydes op eller ned ad Skinnen *ab*. Ved *S* forandres Kikkertudtrækket. Ved Finskruerne S_1 og S_2 indstilles Kikkerten m. H. t. sin vandrette og lodrette Omdrejningsaxe. Skinnen *ab* er bevægelig om en vandret Axe og paavirkes ved Skruen S_3, saa at Maalestokken kan stilles vandret ved Hjælp af S_3.

Spejlets Omdrejningsaxe; da denne forudsættes lodret, bliver Maalestokken vandret. Hvis det hele er opstillet saaledes, at Spejlets Normal falder midt imellem Maalestok og Kikkertaxe, vil man i Kikkerten se et Stykke af Maalestokkens Spejlbillede (se Fig. 29).

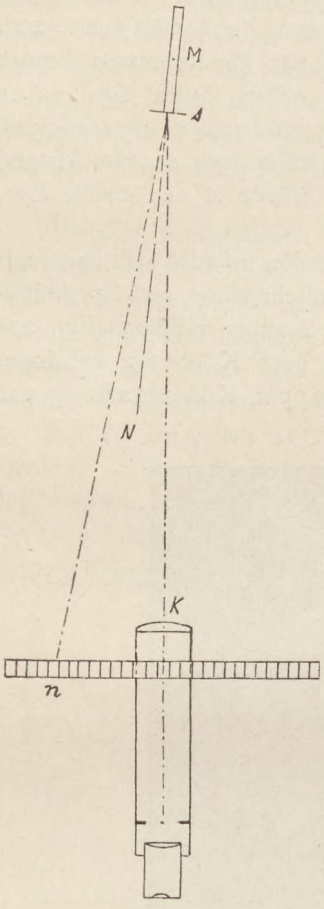


Fig. 28

I Fig. 28 er M en ophængt Magnet, s et derpaa fæstet Planspejl. Er sN Spejlets Normal, sK Kikkertaxen, vil Vinklen KsN ligge i Indfaldsplanet for det Lys, der kastes mod Kikkerten. Hvis Linien sn i dette Plan, under samme Vinkel med Normalen som SK, træffer en Delestreg, vil man i Kikkerten se den Del af Maalestokken, som ligger nærmest omkring Stregen, og denne vil sees at gaa gennem Traadpunktet (Fig. 29).

Falder Spejlnormalen i samme lodrette Plan som Kikkertaxen (Spejlet $\neq$ Maalestokken), vil den Streg, som ligger i dette Plan, vise sig i Traadpunktet; lad det være 45 cm-Stregen. Faar Spejlet derpaa en Drejning φ om sin lodrette Omdrejningsaxe, vil en anden Streg f. Ex. 35 cm vise sig. Vinklen φ vil da være bestemt ved Længden $45 - 35 = 10$ cm.

Hvis Maalestokken laa i Højde med Kikkertaxen, vilde Vinklen Ksn være det dobbelte af Spejlets Drejning φ; den ligger imidlertid enten over eller under, hvoraf følger, at Vinklen Ksn's Plan ligger skraat, mens 2φ er en Vinkel i det vandrette Plan; 2φ er Projektion af $\angle Ksn$. Da imidlertid Maalestokken er vandret, er det netop Projektionen af Ksn altsaa 2φ man faar bestemt. I det valgte Exempel vil, hvis Afstanden fra Spejlet til det lodrette Plan gennem Maalestokken er 2 m,

$$tg\, 2\varphi = \frac{10}{200},\ \varphi = 1^0\, 25'\, 52''$$

Ved den objektive Spejlaflæsning spredes Lyset i alle Retninger fra Maalestokken, hvorfor flere Iagttagere paa en Gang kan følge Spejlets Bevægelse; men deraf følger, at man maa bruge et kraftigt Lys. Jo mindre man tager Spejlet af Hensyn til at gøre Op-

hængningen let, og jo større man vælger Maalestokkens Afstand, des svagere bliver Lyset paa Maalestokken; derved sættes der en Grænse for Aflæsningens Nøjagtighed. I saa Henseende kan man gaa meget videre ved Kikkertaflæsningen, hvor Iagttageren faar alt det Lys, som Objektivet modtager fra Spejlet, ind i sit Øje.

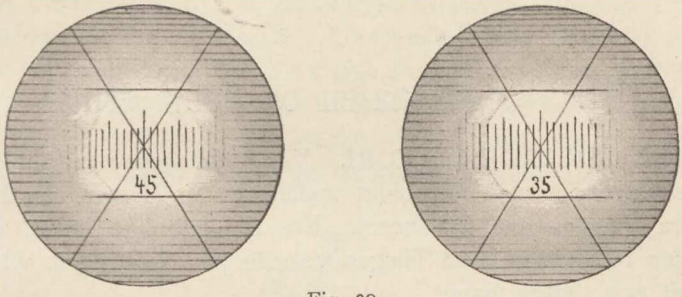


Fig. 29

Hvis man ved Kikkertaflæsningen forøger Afstanden mellem Spejl og Maalestok til det dobbelte, opnaar man ikke derfor den dobbelte Nøjagtighed, medmindre man samtidig fordobler Kikkertens Forstørring, thi i den dobbelte Afstand formindskes den tilsyneladende Afstand mellem Delestregerne til det halve. Hvis Millimeterinddelingerne ved 2 m Afstand mellem Spejl og Maalestok vise sig saa store, at man kan aflæse dem med en Nøjagtighed af $^1/_{10}$ mm, kan man iagttage en Vinkelforskel paa 5".

III. Vægtskaalen og dens Brug.

VÆGTSKAALENS TEORI. Ved Vejning paa en almindelig Vægtskaal finder man Forholdet mellem de to Masser, der hænge ned fra Vægtstangen (Balancen). Ere Armene lige lange, og er Balancen i Ligevægt med Tungen visende paa Nulstregen, vil man, hvis alt er i Orden, have

$$m_1 g_1 = m_2 g_2,$$

hvor m_1 og m_2 ere de to Masser, g_1 og g_2 disses Faldakcelerationer. Er Akcelerationen i det tomme Rum g_0, har man $m_1 g_1 = m_1 g_0 - \mu_1 g_0$, hvor μ_1 er den af Legemet fortrængte Lufts Masse. Da $\mu_1 = v_1 \rho$, hvor v_1 er Legemets Rumfang, ρ Luftens Vægtfylde, og da $v_1 = m_1 / d_1$, hvor d_1 er Legemets Vægtfylde, bliver

$$m_1 g_1 = m_1 \left(1 - \frac{\rho}{d_1}\right) g_0$$

Kender man ρ, d_1 og d_2, faar man at Forholdet mellem Masserne er

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{1 - \frac{\rho}{d_2}}{1 - \frac{\rho}{d_1}},$$

saafremt man kan gaa ud fra, at Akcelerationen i det tomme Rum er ens for begge Masser; den afhænger af Breddegraden og af Højden over Havet. Er Vægtstangen 1 m lang, og staar den i Nord—Syd, under 45° Bredde, med 1 kg paa hver Vægtskaal, vil det nordligste Lod synes $^1/_{1000}$ mg for tungt. Det fremgaar heraf, at Breddegradens Indflydelse bliver uden Betydning selv ved de fineste Vejninger.

Hvis de to Masser ikke ligge i samme Højde, vil Akcelerationen være størst for den laveste af dem. Bærer Vægten 1 kg

ved hver Ende og ligger det ene Lod 1 m lavere end det andet, vil det første synes omtr. $^1/_5$ mg for tungt af den Grund. Dette er en saa stor Indflydelse, at den kan mærkes ved de fineste Vejninger selv ved en Højdeforskel paa kun $^1/_{10}$ m. Af Hensyn hertil fandt man det fornødent i det internationale Bureau for Maal og Vægt i Sèvres (S. 35) at undersøge, hvorledes Tyngden i Laboratoriet varierede med Højden. Under almindelige Forhold vil imidlertid det ovenstaaende Udtryk give Forholdet mellem de to Masser.

Vægtskaalens Balance er en Stang af Metal, hvis Form er valgt saaledes, at den giver stor Styrke mod Bøjning sammen med forholdsvis ringe Vægt. Den drejer sig om en vandret Axe O (Fig. 30),

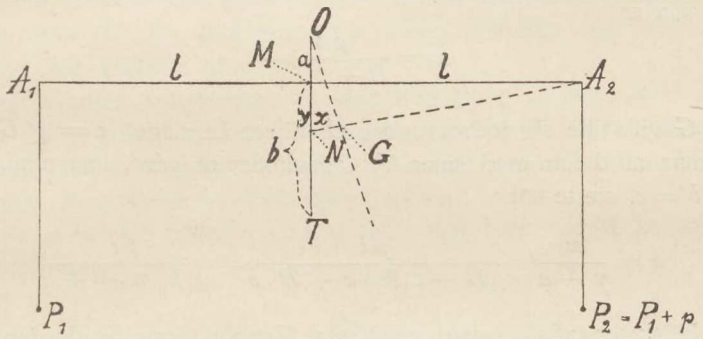


Fig. 30

dens Tyngdepunkt er i T. Vægtskaalene hænge bevægelige om vandrette Axer gennem A_1 og A_2, saaledes at $A_1O = OA_2$ og $OT \perp A_1A_2$. Naar de to Vægte P_1 og P_2, der hænge i A_1 og A_2, ere ligestore, er der aabenbart Ligevægt i vandret Stilling. Ligevægten skal være stadig; i saa Fald vil Vægten, naar den sættes i Bevægelse, udføre Svingninger om Ligevægtsstillingen. Hvis P_2 er $> P_1$, vil Balancen komme i Ligevægt i en skraa Stilling, den vil gøre et Udslag. Dettes Størrelse ved en given Overvægt, f. Ex. 1 mg, bestemmer Vægtens Følsomhed.

Ligevægtstillingen er bestemt derved, at hele Systemets Tyngdepunkt G maa stille sig lodret under Axen O. Forat finde G maa man huske, at P_1 og P_2 altid hænge lodret under Axerne A_1 og A_2; Tyngdens Virkning er derfor den samme, som om de to Vægte vare samlede i henholdsvis A_1 og A_2. Sættes $P_2 = P_1 + p$, er p Overvægten; de to Vægte P_1, der hænge i A_1 og A_2, kunne

INDUSTRIFORENINGENS BIBLIOTEK

betragtes som samlede i Midtpunktet M mellem A_1 og A_2. Man har altsaa at bestemme det fælles Tyngdepunkt for $2P_1$ i M, Balancens Vægt B i T og Overvægten p i A_2. Tyngdepunktet N for $2P_1$ og B ligger i en Afstand y fra M bestemt ved at $2P_1 y = B(b-y)$, idet $MT = b$;

$$y = \frac{Bb}{B + 2P_1}.$$

Det søgte Tyngdepunkt G findes som fælles Tyngdepunkt for p i A_2 og $B + 2P_1$ i N. Man har følgelig, idet $NG = x$, at $p.GA_2 = (B + 2P_1)x$. Da p er mange Gange mindre end $B + 2P_1$ og MN mange Gange mindre end $MA_2 = l$, kan man her sætte $GA_2 = l$, saa at

$$x = \frac{pl}{B + 2P_1}.$$

Idet G vil stille sig lodret under O, bliver Udslaget $\varphi = \angle GON$. Da man altid har med smaa Udslagsvinkler at gøre, kan man, idet $a + b = c$, sætte

$$\varphi = \frac{x}{y + a} = \frac{pl}{(B + 2P_1)a + B.b} = \frac{pl}{2P_1 a + B.c}$$

Udslaget aflæses ved en Viser, Tungen, hvis Spids bevæger sig over en lille Maalestok, som i Reglen har sit Nulpunkt paa Midten. Naar Vægten er ubelastet, peger Viseren paa Nul. Er Tungen t mm lang, vil en Udslagsvinkel φ aflæses ved $\alpha = t\varphi$ mm paa Maalestokken.

$$\alpha = \frac{plt}{2P_1 a + Bc} = f.p, \qquad f = \frac{lt}{2P_1 a + Bc}$$

α er proportional med p, man kan følgelig bestemme Størrelsen af en lille Overvægt ved Iagttagelsen af Udslaget.

Vægtens Følsomhed er det Udslag f, der fremkaldes ved 1 mg Overvægt. Ved Bestemmelse af f maa man altsaa udtrykke B og P_1 i mg. Da en følsom Vægt vejer langsomt og skal behandles med Omhu, vil man langt fra altid ønske stor Følsomhed. Derimod vil man altid ønske saa nær som mulig samme Følsomhed hos Vægten ved store og smaa Belastninger. Det er nemlig ofte saa, især ved Vejning af luftformige Legemer, at man nødes til at veje et Legeme i en Beholder, der vejer mange Gange mere end

Legemet; og dette maa ikke i kendelig Grad forringe Nøjagtigheden. Indflydelsen af Belastningen $2P_1$ paa Følsomheden, sees saavel af Udtrykket for f som af Fig. 30. Tyngdepunktet for de to Vægte P_1 falder jo nemlig i M og ved et Udslag skal altsaa $2P_1$ løftes til en Højde proportional med $OM = a$. Gør man $a = o$, bliver Belastningen uden Indflydelse, og man faar i det Tilfælde

$$f = \frac{lt}{Bc}$$

Var a negativ, saa at $A_1 A_2$ laa højere end O, vilde Følsomheden voxe med Belastningen. Dette har man ikke Brug for, og store Belastninger kan, naar a er negativ, bringe det fælles Tyngdepunkt N op over O, saa at Ligevægten bliver ustadig; Nævneren i f bliver i det Tilfælde negativ.

Er Vægten konstrueret til uden Belastning at have $a = o$, vil a faa en positiv Værdi ved Brugen paa Grund af, at Balancen bøjer sig under Vægten af $2P_1$. Man kan imødegaa den dermed følgende Forringelse af Følsomheden ved i den ubøjede Balance at give a en lille negativ Værdi, men dog især ved at konstruere Balancen meget stiv.

MILLIGRAMSVÆGTSKAALEN. Herved skal forstaaes en Vægt, som giver et tydeligt Udslag ved en Overvægt af 1 mg eller mindre (analytisk Vægt, Guldvægt). Den store *Følsomhed* opnaaes fortrinsvis ved at lægge Balancens Tyngdepunkt meget nær op under O (b lille); de tre Axer A_1, O og A_2 antages at ligge i samme Plan ($a = o$). Man gør Balancens Vægt B saa lille, som Hensynet til Stivheden tillader. Forøgelse af Armlængden l forøger ikke Følsomheden, fordi B af Hensyn til Stivheden samtidig maa forøges i stærkere Forhold. Derimod ville de lange Arme være heldige overfor Gnidningsmodstanden. Man foretrækker at bruge saa korte Arme, som Udstrækningen af de Ting, man vil veje, tillader; de kortere Arme give Vægten mindre Inertiemoment og dermed hurtigere Svingninger, hvad der fremskynder Afslutningen af Vejningen, som af flere Grunde tager en rum Tid. Følsomheden voxer med Tungens Længde; Tungen føres i Reglen lodret nedad foran Støtten og ned til dennes Fod, hvor Maalestokken er anbragt; den og Tungens Spids iagttages ofte i

en Lup eller i et svagt Mikroskop for ogsaa derved at forøge Nøjagtigheden.

Det er dog, som før nævnt, først og fremmest Beliggenheden af Balancens *Tyngdepunkt*, det kommer an paa. For at faa dette Punkt til at ligge, hvor det skal: meget tæt under Axen uden dog at falde i den og saaledes, at $OT \perp A_1 A_2$, maa man kunne give Tyngdepunktet meget smaa Flytninger saavel op og ned som til

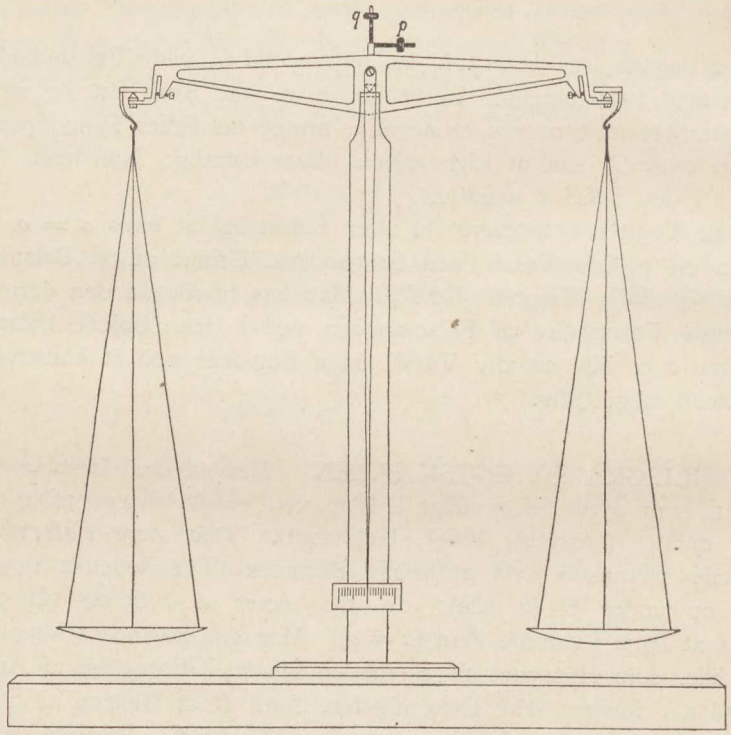


Fig. 31

Siderne; det opnaaes ved Hjælp af to smaa Vægte, p og q i Fig. 31, som ere forskydelige ved at sidde som Møtriker paa to Skruer, der udgaa fra Balancen, den ene lodret, den anden vandret.

Ved enhver Vægtskaal vil man gøre Gnidningsmodstanden mod Drejningen om Balancens Axe O saa ringe som mulig; den maa ved en Milligramsvægt være lille selv mod Momentet af et mg anbragt paa Enden af Armen. Dette opnaaes ved at danne Axen som en Kile, *Kniven* kaldet, af Staal eller Agat med nedadvendt,

skarp Æg; den sidder fast i Balancen og hviler paa et plant, poleret, haardt Underlag.

Skaalene skulle hænge saaledes, at de vugge om vandrette Axer A_1 og A_2 parallele med Omdrejningsaxen O og i uforanderlig Afstand fra denne. Ogsaa der maa Gnidningsmodstanden være forsvindende, da man ellers ikke kan gøre Regning paa, at Tyngdepunktet for hver af de ophængte Vægte ligger lodret under den tilhørende Axe; er dette ikke Tilfældet, vil Vægten være falsk. Man danner derfor disse Axer af Knive med opadvendte Ægge, som fæstes i Balancen i Forbindelse med Stilleskruer, saa at man kan indstille dem dels i rette Højde dels parallelt med Midterkniven og saa nær som mulig i lige store Afstande fra denne. Skaalene hænge ned fra *Panderne,* der ere Plader af haardt Stof, som med deres plane og polerede Underside vugge paa Knivsæggene.

Forat skaane Æggene og forat hindre, at Balancen eller Panderne forrykkes, naar man skifter Belastning, forsynes Vægten med en *Arreteremekanisme*, der udvendig paa Vægtskabet har et Haandtag, ved hvilket man kan løfte saavel Balancen som begge Pander ud af Berøring med Knivene; Arreteremekanismen er fjærnet i Fig. 31. Vægten anbringes i et *Glasskab* for at være beskyttet mod Støv, naar den staar hen, og mod Luftstrømninger og Temperaturforandringer, naar den bruges. Skabsdørene aabnes kun, naar man skifter Belastning. Bunden af Skabet, hvortil Støtten er fæstet, dannes ofte af tykt Glas eller Marmor. Den bæres af tre Stilleskruer, som stilles saaledes, at Balancen er vandret, naar Tungen viser paa Nul.

Man bruger i Reglen *Rytter vejning* for at blive fri for Brugen af de meget smaa Lodder, f. Ex. fra 10 mg og nedefter, og for at undgaa at aabne Skabsdørene mod Slutningen af Vejningen, saa at der bliver den størst mulige Ro, naar den endelige Ligevægtsstilling skal bestemmes. Rytteren er et Lod formet af en tynd Metaltraad som et ∧ med et Øje foroven. Den anbringes ridende paa Overkanten af Balancen eller en dermed forbunden Lineal; ved Inddelinger paa denne kan man aflæse Rytterens Afstand fra Midterkilen. Er Afstanden $^1/_n$ af Vægtarmens Længde, og vejer Rytteren 10 mg, betyder dens Vægt det samme som $^{10}/_n$ mg lagt paa Vægtskaalen. Rytteren kan flyttes ud og ind ved en med en lille Krog forsynet Skydestang, der fører ud gennem Siden af Vægtskabet.

Man kan kun benytte Rytteren til Erstatning for de smaa Lodder, fordi dens Afstand fra Midterkniven kun kan bestemmes

grovt. Faar man f. Ex. $^1/_2$ mm Fejl i Afstanden, og er Vægtarmen 100 mm lang, bliver Vægtfejlen $^1/_{20}$ mg med en Rytter paa 10 mg, men med en Rytter paa 100 mg vilde Fejlen blive $^1/_2$ mg.

VÆGTSKAALENS UNDERSØGELSE OG BRUG. Hvis man kunde gøre Regning paa, at Tyngdepunktet for den fra Panden nedhængende Vægt altid faldt lodret under et og samme Punkt af den Knivsæg, som bærer Vægten, da vilde en lille Afvigelse fra Parallelismen mellem Knivene ingen Skade gøre, fordi Vægtstangsarmen i saa Fald var uforanderlig, lig Afstanden fra det nævnte Punkt til Midterknivens Æg. Man tilstræber at faa denne Betingelse opfyldt ved at forbinde Pande og Skaal ved et eller flere Led. Mangelen paa Bevægelighed i disse gør det dog nødvendigt at lægge Hovedvægten paa at gøre *Knivene parallele*. Erstatter man en af Panderne med en Krog af Staaltraad og hænger en let Vægt op i den, kan man prøve, om vedkommende Kniv er parallel med Midterkniven ved at tilvejebringe Ligevægt, idet Krogen hænges op ved den ene Ende af Kniven; det undersøges derpaa, om der vedblivende er Ligevægt, naar Krogen flyttes hen til den anden Ende af Kniven.

Armenes ulige Længde. Ved at stille paa Regulervægten *p* Fig. 31 kan det opnaaes, at Tungen viser paa Nul, naar Balancen alene, uden paahængte Skaale, er i Ro. Hænges Skaalene op, skal Ligevægtsstillingen være den samme. Er det ikke Tilfældet, forandrer man den ene Skaals Vægt. Lægger man saadanne Vægte paa Skaalen, at Tungen fremdeles viser Nul, skulde de to Vægte være lige store; det kan prøves ved at bytte dem om, hvilket ikke skulde forandre Ligevægtsstillingen. Man vil dog saa godt som altid finde en lille Forandring efter Ombytningen, og man kan ikke gøre Regning paa at faa den derved paaviste Forskel i Vægtarmenes Længde ophævet. Er Vægten ved en Belastning af 200 gr paa hver Skaal følsom for $^1/_{10}$ mg, viser det, at man kan mærke en Vægtforandring, som er en Tomilliontedel af den anbragte Vægt. Da det er Vægtens Moment, Produktet af Vægt og Vægtarm, man har med at gøre, vil man ogsaa med samme Sikkerhed kunne paavise en Forskel paa en Tomilliontedel af Vægtarmens Længde; er Længden 100 mm, kan man altsaa mærke en Længdeforskel paa $^1/_{20000}$ mm, og saa nøje kan man ikke afpasse Afstanden mellem Knivene. Derimod kan man med fornøden Nøjagtighed

ved Vejningsforsøg finde Forholdet mellem Armlængderne og derved faa Middel til at korrigere Resultatet af en Vejning.

Har man iagttaget den ubelastede Vægtskaals Ligevægtsstilling og dernæst paalagt saadanne Vægte P_1 og P_2, at der er samme Ligevægtsstilling, da har man

$$P_1 l_1 = P_2 l_2$$

hvor l_1 og l_2 ere de to Vægtarme. Ombytter man nu P_1 og P_2, maa man, antage vi, lægge en lille Vægt p til P_1 for igen at opnaa samme Ligevægtsstilling. Herved faaes

$$P_2 l_1 = (P_1 + p) l_2$$

Hvis man kendte P_1 og P_2 tilstrækkelig nøjagtig, kunde man alene af den første Ligning finde Forholdet mellem Armene; men det kan man i Reglen ikke gaa ud fra. Man maa derfor, ved Hjælp af Vejningen efter Ombytningen, gøre sig uafhængig af det nøjagtige Kendskab til Forholdet mellem Belastningerne. Man faar nu med Brug af Tilnærmelse ved Roduddragningen.

$$\frac{l_1^2}{l_2^2} = 1 + \frac{p}{P_1}, \qquad \frac{l_1}{l_2} = 1 + {}^1/_2 \frac{p}{P_1}$$

Man kunde indvende, at den Værdi for l_1/l_2, der faaes ved de to Vejninger, ogsaa er afhængig af Kendskabet til Forholdet mellem to Vægtlodder, nemlig p og P_1; men hertil er at mærke, at p/P_1 er en meget lille Størrelse, for hvilken den mulige Fejl i P_1 er ganske uden Betydning, og den mulige Fejl i p bliver reduceret til sin halve Værdi ved Faktoren $^1/_2$.

Ved de to Vejninger faar man tillige Forskellen mellem P_1 og P_2 bestemt, idet

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{l_1}{l_2} = 1 + {}^1/_2 \frac{p}{P_1}, \quad P_2 = P_1 + {}^1/_2 p$$

Naar man foretager Byttevejning, er det i Reglen dette sidste Resultat og ikke l_1/l_2 man tilsigter. Ved Ombytningen gør man sig uafhængig af en ringe Forskel i Vægtarmens Længde.

Exempel. Forholdet mellem Vægtarmene i den i Fig. 31 afbildede Vægt fandtes saaledes. Der brugtes to 10gr's Lodder P'_{10} og P''_{10}. Der blev Ligevægt ved $P_1 = P'_{10}$ til højre og ved $P_2 = P''_{10} + 0{,}0085$ gr til venstre. Efter Ombytningen

krævede Ligevægten P_2 til højre og $P_1 + 0{,}0194$ gr til venstre. Herved faaes

$$\frac{l_1}{l_2} = 1{,}00097, \quad P_2 = P_1 + 0{,}0097 \text{ gr}, \quad P''_{10} = P'_{10} + 0{,}0012 \text{ gr}.$$

Temperaturens Indflydelse. Af Vægtskaalens store Følsomhed overfor Forskelle i Armenes Længde kan man slutte sig til Nødvendigheden af, at de to Arme have samme Temperatur ved Vejningens Afslutning. Er Balancen af Messing med Udvidelseskoefficient $18 \cdot 10^{-6}$, vil det at den ene Arm bliver $^1/_{10}{}^0$ varmere end den anden, give 200 gr, som hænger i den, en tilsyneladende Vægtforøgelse af næsten $^4/_{10}$ mg. Da man under Afvejningen adskillige Gange fører Haanden ind fra den ene Side i Vægtskabet, bliver den der værende Arm opvarmet fra Haanden. Vil man stole paa $^1/_{10}$ mg, maa man derfor vente en rum Tid efter den sidste Aabning af Skabsdøren, før man bestemmer Ligevægtsstillingen. Herved faar ogsaa Luften i Vægtskabet Tid til at komme i Ro, forsaavidt den ikke holdes i stadig Bevægelse, ved at den ydre Luft er ulige varm paa modsatte Sider af Vægtskabet.

Vægtskaalens Følsomhed ved en given Belastning findes, efter at der er tilvejebragt og iagttaget en Ligevægtsstilling nær ved Nul; man tilføjer da en Vægt paa et eller nogle faa mg (eller flytter Rytteren) og iagttager Forandringen i Ligevægtsstillingen. Det Antal Graddele, Tungen har bevæget sig over, divideret med det tilføjede Antal af mg er Følsomheden. I Reglen vil man for en Sikkerheds Skyld bestemme Følsomheden ved hver enkelt Vejning; det medfører kun den Møje ved Vejningens Afslutning at bestemme to Ligevægtsstillinger, idet man efter Bestemmelsen af den første tilføjer 1 mg eller en anden passende lille Vægt og iagttager den derved ændrede Stilling.

Det er nødvendigt at kende Følsomheden for at kunne finde Brøkdele af mg. I Henhold til ovenstaaende afsluttes Vejningen, ved at man ved N mg finder Udslaget a_1 (se Fig. 32) og ved $N + 1$ mg Udslaget a_2; man søger den Vægt $N + x$ mg, som vilde give Udslaget Nul. Idet der kan forudsættes Proportionalitet mellem Udslag og Overvægt, vil man have

$$\frac{x}{1} = \frac{a_1}{a_1 - a_2}$$

Sædvanlig vil man sørge for, at de to Udslag falde hvert paa sin

Side af Nul; men regner man α med Fortegn, beholder ovenstaaende Udtryk sin Gyldighed.

Vægtens Svingninger. Man venter ikke med at bestemme Ligevægtsstillingen, til Vægten er kommen i Ro, men bestemmer Stillingen ved at iagttage Svingningerne. Det sker ikke saa meget for at spare Tid, thi ved Dæmpningsmidler kunde man altid afkorte Svingningernes Varighed, som for at imødegaa Gnidningsmodstandens Indflydelse. Er Balancen i Hvile, vil Gnidningsmodstanden kunne fastholde den i en Stilling, der afviger fra den af Tyngden alene betingede Stilling, og man vil ikke have noget Middel til at finde Afvigelsen. Svinger den derimod, vil Gnidningsmodstanden sammen med Luftmodstanden bevirke, at Svingningerne foregaa med aftagende Udsving. Man kan derfor ikke finde Ligevægtsstillingen som Midtstillingen mellem to paa hinanden følgende Udsving; men iagttager man tre eller flere saadanne, faar man Middel til at finde Dæmpningens Størrelse og kan da regne sig til Ligevægtsstillingen. Ved ikke for store Svingninger kan man gaa ud fra, at Udsvingene fra Ligevægtsstillingen danne en Differensrække; har man iagttaget 3 Udsving u_1, u_2, u_3, findes Ligevægtsstillingen α som Midtstillingen mellem de to Stillinger, der ere bestemte henholdsvis ved u_2 og ved Middeltallet $^1/_2\ (u_1 + u_3)$.

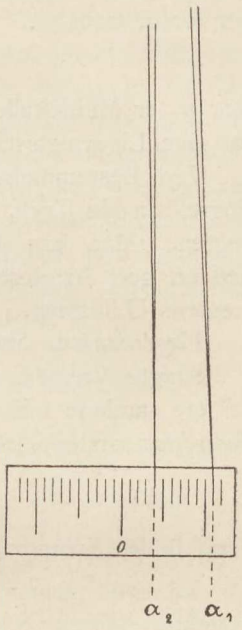


Fig. 32

$$\alpha = {}^1/_2 \left(u_2 + \frac{u_1 + u_3}{2} \right)$$

Hvis man iagttager flere end tre Udsving, faar man Ligevægtsstillingen α nøjagtigere bestemt. En Vejning med en Vægt, hvor Udsvingene iagttoges ved Mikroskop, gav følgende 7 Udsving:

til venstre $u_1 = -0{,}75$ $u_3 = -0{,}73$ $u_5 = -0{,}72$ $u_7 = -0{,}71$
til højre $u_2 = +0{,}22$ $u_4 = +0{,}21$ $u_6 = +0{,}19$

Forudsætter man, at Udsvingene danne en Differensrække, finder man en korrigeret Værdi for det mellemste Udsving til højre ved

at søge Middeltallet u_h af de tre Udsving u_2, u_4, u_6. Efter det ovenstaaende Udtryk kan nu α beregnes dels af u_h, u_3 og u_5, dels af u_h, u_1 og u_7. Tages Middeltallet af de to heraf fremgaaende Værdier for α, faaes

$$\alpha = {}^1/_2 (u_h + u_v)$$

hvor u_v er Middeltallet af de 4 Udsving til venstre. De iagttagne Tal give Ligevægtsstillingen $\alpha = -0{,}260$.

Ved Bestemmelse af Ligevægtsstillingen maa Skaalene ikke slingre, da de Tryk, som derved opstaa, ville indvirke paa Ligevægten. Man kan dæmpe Bevægelsen ved en blød Pensel, men med en god Arreteremekanisme skulde den ikke fremkomme ved Vægtens Udløsning.

Vægtskaalens Svingningstid kan tilnærmelsesvis beregnes ved at betragte Vægten som et Pendul, hvor Belastningernes Masser $2P$ ere samlede i Endeknivene. Er Balancens Inertiemoment I_1, bliver det samlede Inertiemoment om Omdrejningsaxen

$$I = I_1 + 2Pl^2$$

Heraf findes Svingningstiden ved

$$T = \pi \sqrt{\frac{I_1 + 2Pl^2}{(B+2P)c_1 g}}$$

hvor c_1 er Afstanden fra Omdrejningsaxen til Tyngdepunktet for hele Systemet (ON i Fig. 30). Da c_1 sædvanlig er mindre end Afstanden $c = OT$ til Balancens Tyngdepunkt, og da c gøres lille af Hensyn til Følsomheden, maa Svingningstiden blive stor. Den lange Svingningstid er en Ulæmpe, baade fordi den, som før nævnt, spilder Tid, og fordi Gnidningsmodstanden voxer, naar den relative Hastighed bliver meget ringe.

Svingningstiden sættes ned ved at gøre Vægtarmen kort. Begge Addender i Inertiemomentet blive nemlig mindre herved; men tillige gør den kortere Arm Balancens Vægt mindre; derved faar dens Tyngdepunkt, naar en given Følsomhed skal naaes, større Afstand fra Axen; c_1 bliver følgelig større og derved Svingningstiden mindre.

Exempel. En lille Milligramsvægtskaal af ældre Konstruktion, bestemt til Vejning af højst 30—40 gr, blev undersøgt saaledes, at dens Konstanter kunde beregnes. Balancens Vægt var $B = 9{,}00$ gr, Afstanden mellem de to yderste Knivsægge var $2l = 138{,}2$ mm.

De to Skaale vejede tilsammen 10,37 gr, Tungens Længde $t = 66{,}7$ mm.

Følsomheden blev funden først for Balancen alene, idet Skaalene vare fjærnede; et Stykke bøjet Metalraad af Vægt $p = 0{,}00077$ gr blev lagt over den ene Kniv, hvorved der fremkom et Udslag paa 4,3 mm. Efter at Skaalene vare paahængte, og 10 gr var lagt paa hver Skaal, gav samme Overvægt et Udslag 1,0 mm; ved denne Belastning $2P_1 = 30{,}37$ gr var Følsomheden altsaa betydelig mindre end ved Belastning Nul, hvoraf det sluttes, at Planet gennem de to Yderknives Ægge laa i kendelig Afstand under Midterknivens Æg. Vi kunne nu finde saavel denne Afstand a som Afstanden c fra Omdrejningsaxen til Balancens Tyngdepunkt. Følsomheden f_0 for den ubelastede Balance er ifølge Udtrykket S. 50

$$f_0 = \frac{4{,}3}{0{,}77} = \frac{lt}{Bc} = \frac{69{,}1 \cdot 66{,}7}{9000 \cdot c}, \text{ hvoraf } c = 0{,}092 \text{ mm.}$$

For den med $2P_1 = 30{,}37$ belastede Vægtskaal er Følsomheden

$$f = \frac{1{,}0}{0{,}77} = \frac{69{,}1 \cdot 66{,}7}{30370 \cdot a + 9000 \cdot c}, \text{ hvoraf } a = 0{,}090 \text{ mm.}$$

Man kan faa en Kontrol for Rigtigheden af disse Tal ved at iagttage Svingningstiden saavel for den belastede som for den ubelastede Balance. Ved den længere fremme omtalte Kronograf blev det fundet, at den ubelastede Balance udførte 10 Svingninger i 42,7 sek, den belastede 4 Svingninger i 25,2 sek. Heraf faaes Svingningstiderne

$$T_0 = 4{,}27 \text{ sek}, \quad T_1 = 6{,}30 \text{ sek.}$$

Af det ovenfor staaende Udtryk for Svingningstiden kan man ved Værdien for T_0 finde selve Balancens Inertiemoment I_1, idet $P = 0$ og $B = 9{,}00$ gr, $a = 0{,}0092$ cm, $g = 981$. Man finder $I_1 = 150$. For den belastede Vægt haves Svingningstiden $T_1 = 6{,}30$, Inertiemomentet $I_1 + 30{,}37 \cdot 6{,}91^2 = 1600$, $B + 2P = 39{,}37$; heraf kan Afstanden c_1 fra Omdrejningsaxen til den hele Masses Tyngdepunkt udregnes; man finder

$$c_1 = 0{,}010 \text{ cm} = 0{,}10 \text{ mm,}$$

som kun afviger $^1/_{100}$ mm fra den Værdi, der findes ved de ovenfor bestemte Værdier for a og c.

Forskellige Vejemaader. Naar man kan gaa ud fra, at Forholdet mellem de to Armlængder er uforanderligt, faar deres Forskel ingen Betydning, saafremt man, som Tilfældet i Reglen er,

kun har med *relative Vejninger* at gøre, og saafremt man altid lægger Lodderne paa samme Skaal. Det falder sjældent for, at man med stor Sikkerhed skal kende Legemets absolute Vægt. En lille Forskel i Vægtarmene har kun den Indflydelse, at man vejer med en lidt afvigende Vægtenhed.

Vil man imidlertid gøre sig uafhængig af Forskellen, kan det ske ved *Tarervejning*, idet man opvejer Legemet paa den ene Skaal med passende Genstande paa den anden, man tarerer, hvorefter man fjærner Legemet og paany bringer Ligevægt ved Lodder. Som før omtalt kan man ogsaa ved Ombytning af de to Ting, der ligge paa Skaalene, finde det rigtige Forhold mellem deres Vægte uafhængigt af Armlængderne.

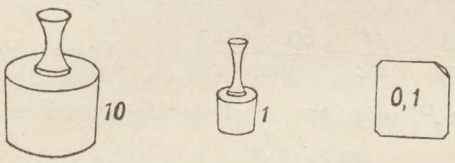


Fig. 33. Vægtlodder paa 10 gr, 1 gr og 0,1 gr (virkelig Størrelse).

Imidlertid bliver der ved disse forskellige Fremgangsmaader endnu nogen Usikkerhed tilbage, fordi Forholdet mellem Armlængderne kan have forandret sig paa Grund af Temperaturforskelle hidrørende fra Opvarmningen fra Haanden, naar Skabsdørene aabnes. For ved Normalvejninger at undgaa Følgen heraf har man indrettet det saaledes, at man kan foretage Ombytningen ved en særlig Mekanisme uden at lukke Skabet op og, om ønskes, i stor Frastand fra Vægten.

VÆGTLODDER. De Lodder, hvormed der vejes, vil man danne af et Materiale af stor Vægtfylde for at gøre Opdriften i Luften forholdsvis lille. Iøvrigt maa Hovedvægten lægges paa at sikre Lodderne mod ydre Paavirkninger af kemisk og mekanisk Natur, der kunne forandre deres Vægt. Lodder til Laboratoriebrug fra 1 gr og opefter dannes af Messing i Cylinderform. Overfladen poleres for at modvirke kemisk Paavirkning og Vedhængen af Støv og Smuds. Lodder til Milligramsvægten forgyldes eller platineres, det sidste især, hvor der arbejdes med Kvægsølv. Lodder mindre end 1 gr vilde blive uhandlelige i Cylinderform; de dannes i Reglen

som Skiver af Blik; de faa derfor i Modsætning til de cylinderformede større Lodder, en forholdsvis stor Overflade, hvorfor man med særlig Omhu maa sikre dem mod Paavirkning; de dannes af den Grund af Platinblik og ligge i Vægtkassen dækkede af et Glas; man bruger sjælden Lodder mindre end 1 mg, idet Vægtforskelle derunder, som omtalt S. 56, kunne bestemmes ved Vægtens Udslag.

Det Tal, hvormed hvert Lod er stemplet, skal betyde Loddets Vægt i tomt Rum. Man maa dog være forberedt paa, at Lodderne have saa store Afvigelser fra den rigtige Værdi, at det kan paavises ved Vejningen. Et Sæt Vægtlodder, der skal kunne give Vægte f. Ex. fra 1 mg til 1 kg danner man saaledes i Overensstemmelse med Titalsystemet, at man ved det færrest mulige Antal Enkeltlodder kan fremstille ethvert helt Antal mg mellem 1 og en Million. Man skal altsaa kunne fremstille Cifrene i ethvert 6-cifret Tal; det kan ske ved 4 Lodder for hvert Ciffer, i alt altsaa 24, naar Lodderne have Værdierne 1, 2, 2, 5 eller 1, 2, 3, 4 eller 1, 1, 3, 5 udtrykte i den til Cifret svarende Enhed; man vælger sædvanlig Værdierne 1, 2, 2, 5. Det er ikke nødvendigt at Summen af de 4 Lodder er større end 9; man bruger derfor ogsaa Værdierne 1, 1, 2, 5.

Undersøgelsen af Lodderne maa først og fremmest gaa ud paa en indbyrdes Sammenligning. Man vælger et af dem til Enhed og søger ved Vejning Værdierne af de øvrige udtrykte i denne Enhed. Kaldes de 4 Lodder fra 1 til 5 mg a_1, a_2, a'_2, a_5 kan man sammenligne a_2 med a'_2, $a_1 + a_2 + a'_2$ med a_5, men for at faa a_1's Værdi med maa man have (eller til Sammenligning danne) et Hjælpelod a'_1; man sammenligner da yderligere a_1 med a'_1 og $a_1 + a'_1$ med a_2. Herved faaes nu $a'_1 = a_1 + \delta_1$, $a_2 = a_1 + a'_1 + \delta_2 = 2\,a_1 + \delta_1 + \delta_2$, $a'_2 = a_2 + \delta_3 = 2\,a_1 + \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$, $a_5 = a_1 + a_2 + a'_2 + \delta_4 = 5\,a_1 + 2\,\delta_1 + 2\,\delta_2 + \delta_3 + \delta_4$. Her er Værdierne δ fundne ved Udslagene i de forskellige Vejninger; da disses Betydning er given ved det Udslag, som Loddet a_1 fremkalder, ere saaledes alle Vægtene fundne med a_1 som Enhed. Nu kan man paa samme Maade sammenligne Centigrammene b_1, b_2, b'_2 og b_5, idet man begynder med at sammenligne b_1 med Summen af de 4 mg-Lodder og saaledes videre.

Ved de fortsatte Sammenligninger ville Fejlene i de iagttagne Værdier δ kunne ophobe sig. Man udfører derfor flere Sammenligninger end de her omtalte. Derved faar man flere Ligninger,

end der er ubekendte, og saaledes for hvert Lods Vægt flere Værdier, der ere forskellige paa Grund af Iagttagelsesfejlene, men som ved en særlig Regnemetode tjene til Bestemmelse af et Middeltal for Loddets Værdi.

Hvis man efter den indbyrdes Sammenligning af Lodderne, fremstiller 1 kg af dem og derpaa sammenligner det med et Mønsterkilogram (se nedenfor), kan man finde ethvert af Loddernes Værdi i den internationalt vedtagne Enhed.

Vægttab i Luften. 1 cm^3 Luft vejer omtrent $^1/_{800}$ gr, altsaa over 1 mg. Vejer man med mg-Nøjagtighed, er man følgelig ofte nødt til at tage Hensyn til Vægttabet i Luften. Man kan undlade det, naar de to Ting, der veje op mod hinanden, have samme Rumfang; dette er saaledes Tilfældet, naar man sammenligner Lodder af samme Metal. Hvor Legemets Rumfang og Vejningens Nøjagtighed er saa begrænsede, at man ikke behøver at tage Hensyn til de *Forandringer* i Opdriften, der skyldes mindre Tryk- og Temperaturforandringer i Atmosfæren, kan man i mange Tilfælde undlade at regne med Vægttabet; dette gælder hvor man skal tage Forholdet mellem afvejede Mængder af Stoffer med omtrent samme Vægtfylde; her er Opdriften proportional med Vægten og er derfor uden Indflydelse paa Forholdet (Vægtfylde af svage Opløsninger).

Det gælder ligeledes, naar man, som ved Vejning af Luft i en Kolbe, søger en Vægtforskel under saadanne Forhold, at man har med samme ydre Rumfang at gøre ved begge Vejninger. Falder Barometret 30 mm, og stiger Temperaturen 10^0 C, vil Vægten af 1 cm^3 Luft, som før var $^1/_{800}$ gr = 1,25 mg, formindskes med omtrent $^1/_{10}$ mg for hver cm^3 Legemet er stort.

Det er vanskeligt at faa Opdriften paa et Legeme bestemt med tilstrækkelig Sikkerhed, naar den er mange Gange større end den Vægt, der tjener som Maal for Vejningens Nøjagtighed. Man skal maale Luftens Fugtighedsgrad og Varmegrad forat finde dens Vægtfylde; men Luftstrømninger og Varmestraaling gør denne Maaling og dermed ogsaa Opdriftens Bestemmelse usikker. Man søger derfor, hvor Forholdene tillade det, at gøre sig uafhængig af Opdriften ved at veje det meste af Legemet op ved et andet Legeme, som man har givet samme ydre Rumfang, som det, der skal vejes.

For at kunne tage Hensyn til Opdriften maa man, som omtalt S. 48, kende Rumfangene v_1 og v_2 for de to Masser og Luftens

Vægtfylde ρ. Er m_1 det Legeme, der skal vejes, m_2 Lodderne, faar man

$$m_1 - v_1\rho = m_2 - v_2\rho, \quad m_1 = m_2 + (v_1 - v_2)\rho$$

$v_1 - v_2$ findes, naar man kender Vægtfylderne d_1 og d_2 for de to Masser. Naar d_1 ikke er meget lille, kan man sætte $v_1 = m_2/d_1$, og man faar

$$m_1 = m_2 + m_2\left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}\right)\rho = m_2 + km_2$$

Er m_2 Messinglodder, kan man sætte $d_2 = 8{,}4$, og sætter man Luftens Vægtfylde til 0,0012 (svarende til 760 mm Tryk og 20° C), kan man beregne Værdierne for Faktoren $k = \left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}\right)\rho$ svarende til forskellige forekommende Værdier af Vægtfylden d_1 for den Ting, man faar at veje. Værdierne for k findes (efter Kohlrausch, Leitfaden der prakt. Physik) opførte i nedenstaaende Tabel:

Korrektionstabel for Vægttab i Luften.

d_1	k	d_1	k	d_1	k
0,7	+ 0,00157	2,0	+ 0,000457	9	— 0,000010
0,8	136	2,5	337	10	23
0,9	119	3,0	257	11	34
1,0	106	3,5	200	12	43
1,1	095	4,0	157	13	51
1,2	086	4,5	124	14	57
1,3	078	5,0	097	15	63
1,4	071	5,5	075	16	68
1,5	066	6,0	057	17	72
1,6	061	6,5	042	18	76
1,7	056	7,0	029	19	80
1,8	052	7,5	017	20	83
1,9	+ 0,00049	8,0	+ 0,000007	21	— 0,000086

I de allerfleste Tilfælde kan man efter en Vejning, der har givet m_2 som Legemets tilsyneladende Vægt, med tilstrækkelig Nøjagtighed finde det, man skal lægge til m_2 (Korrektionen til m_2) forat faa den sande Vægt, ved at multiplicere m_2 med den Værdi af k, der i Tabellen svarer til Legemets Vægtfylde d_1. Har man vejet et sammensat Legeme f. Ex. en Glasbeholder med en Vædske,

og maa kende det hele Vægttab, gør man Regningen for hver af Bestanddelene, hvis særskilte Vægte man altsaa maa kende nogenlunde nær, og adderer begge Korrektioner til m_2.

Exempler. Har man ved 20° afvejet saa meget Vand, at det tilsyneladende vejer 10 gr, og afmaaler man derpaa et lige saa stort Rumfang Kvægsølv ogsaa ved 20°, vil man finde, at det vejes op ved 135,849 gr. Disse raa Tal vilde give Vægtfylden for Kvægsølv ved 20° i Forhold til Vand af samme Temperatur lig 13,5849. Korrigeres derimod de to Vægte efter omstaaende Tabel, vil man finde, at Vandets sande Vægt er 10,0106 gr og Kvægsølvets 135,842 gr. Dette giver Vægtfylden 13,5698. Ved en saadan Bestemmelse er det aabenbart ganske nødvendigt at tage Hensyn til Vægttabet.

Havde man istedenfor med Kvægsølv haft med en Saltopløsning at gøre, der gav en Vægt 11 gr i samme Rum som Vandet ved 20°, vilde man uden Vægtkorrektion finde Vægtfylden 1,1000. De sande Vægte for Vandet og Opløsningen vilde efter Tabellen blive 10,0106 og 11,0104 gr; deraf faaes Vægtfylden 1,0999. Her har Vægttabet i Luften kun haft en meget ringe Indflydelse, fordi Korrektionerne paa de kun lidt forskellige Vægtmængder ere næsten ligestore og have samme Fortegn.

Ved Sammenligning af Platinvægtlodderne 0,5 + 0,2 + 0,2 + 0,1 gr med Messinggramloddet i en Vægtkasse blev der funden uden Korrektion, at Platinet P vejede 1,0000 gr. Efter Tabellen er Platinets sande Vægt 0,000086 gr mindre, man vilde da sætte P = 1,0001 gr; der blev vejet med $^1/_{10}$ mg Nøjagtighed.

Vilde man efter et rigtigt Kilogramslod af Platin danne et Messingkilogram, maatte man forudberegne begges Vægttab:

$$p_1 = \frac{1000}{21} \cdot 0{,}0012 = 0{,}0571 \text{ gr og } p_2 = \frac{1000}{8{,}4} \cdot 0{,}0012 = 0{,}1429 \text{ gr.}$$

De to Lodder ville faa samme Vægt i tomt Rum, hvis man afpasser Messingloddet saaledes, at det sammen med en Tillægsvægt af Størrelse $p_2 - p_1 = 0{,}0858$ gr holder Ligevægt mod Platinloddet. Man ser heraf, at hvis man vilde have de to Lodders Vægt overensstemmende i $^1/_{10}$ mg, maatte Fejlen i $p_2 - p_1$ ikke være 1 Promille; man maatte altsaa kende Loddernes Rumfang og Luftens Vægtfylde med en større Nøjagtighed end 1 Promille, hvilket vilde kræve en Nøjagtighed paa $^1/_{10}$ til $^1/_{100}$° i Bestemmelsen af Luftens Temperatur.

Vægtenhed og Rumenhed. Samtidig med at man i Frankrig fastsatte Meteren som Længdeenhed, valgte man Kilogrammet som Vægtenhed saaledes afhængig af Meteren, at det blev Vægten af $^1/_{1000}$ m^3 eller 1 Kubikdecimeter rent Vand af 4° C i lufttomt Rum. Man dannede et Platinlod, Arkivkilogrammet, saa nær som mulig af denne Vægt. Da man efter Oprettelsen af det S. 35 omtalte internationale Bureau for Maal og Vægt ogsaa skulde tilvejebringe Mønstertyper for Kilogrammet, opgav man ligesom for Meteren den oprindelige Definition, idet man ved Definitionen af Kilogrammet gik ud fra Arkivkilogrammets Vægt, skønt der er en paaviselig Forskel mellem den og Vægten af 1 dm^3 Vand. Grunden hertil er, at Definitionen ved et afmaalt Rumfang Vands Vægt ikke kan benyttes til Genfremstilling af Kilogrammet, fordi Rummaalingen er langt unøjagtigere end Vejningen; forskellige Kilogram fremstillede ad denne Vej ville ikke ved Prøve paa Vægtskaalen vise samme Vægt. Af den Grund var ogsaa de før Bureauets Oprettelse fremstillede Kilogramlodder grundede paa Arkivkilogrammet.

Selve dette Lod er dog lige saa lidt som Arkivmeteren bleven den praktiske Mønstertype; begge ere nu henlagte som historiske Aktstykker; af den samme Platiniridiumlegering, der afgav Materiale til Meteren, er der dannet et internationalt Mønsterkilogram, der definerer Vægtenheden; dets og Arkivkilogrammets Vægte i tomt Rum blev fundne ens, saavidt som Sammenligninger paa Vægtskaalen kunde afgøre det. Endvidere er der bleven fremstillet nationale Mønsterkilogrammer, som ere tilstillede de interesserede Stater. Det Lod, Danmark har modtaget, vejer

$$1 \text{ kg} + 0{,}145 \text{ mg}.$$

Dets Rumfang ved 0° er 0,046443 Liter; Rumudvidelseskoefficienten mellem 0° og 20° er 0,0000253.

Naar Meteren er fastsat som Længdeenhed, er *Rumenheden* dermed ogsaa fastsat, forsaavidt man finder Rumfanget paa Grundlag af Længdemaalinger. De fleste Rummaalinger grundes imidlertid paa Vejning, hvorved Vægtenheden kommer til at bestemme Rumenheden. Var Kilogrammet nøjagtig Vægten af en Kubikdecimeter Vand, vilde de to Enheder falde sammen; men da dette ikke er Tilfældet, faar man i Virkeligheden to Rumenheder: Kubikdecimetren og Rummet af et kg Vand af 4° C. Den sidste Enhed kaldes en Liter *l*. Tusindedelen deraf, som er kun lidt forskellig fra 1 cm^3, kaldes en Milliliter, ml. I Praxis faar Forskellen paa de to Slags

Rumenheder ingen Betydning, da Rummaaling, som grundes paa Maaling af Længder, kun under ganske særlige Forhold naar en Nøjagtighed, der svarer til Forskellen mellem Enhederne. Man har dog gjort sig stor Ulejlighed med at finde denne Forskel med størst mulig Nøjagtighed. Det er sket ved at tildanne Tærninger af Kvarts eller Glas, hvis Sidefladers Afstand blev udmaalt ved Interferensmetoden (S. 37), eller Cylindre, hvis Diameter og Højde blev udmaalte ved Komparator. Herved blev vedkommende Legemes Rumfang fundet i dm^3; ved Bestemmelse af Vægttabet i Vand blev samme Rumfang funden i l. Interferensmaalingen gav i Gennemsnit, at 1 dm^3 = 0,99997 l; Komparatormaalingen gav 1 dm^3 = 0,99994 l. Man kan altsaa sætte

$$1\ dm^3 = 0{,}999955\ l$$

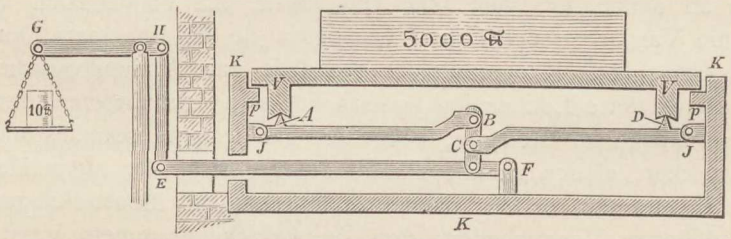


Fig. 34

TEKNISKE VÆGTE afvige ofte meget i deres Konstruktion fra den almindelige Vægtskaal, naar de ere bestemte til Vejning af saa store Ting, at Transporten af Lodder af samme Vægt vilde volde for megen Besvær, eller naar man vil undgaa Ulæmpen ved de slingrende Skaale. Vægtstangsforbindelserne i en Vægt af den Art er vist i Fig. 34. Den ene Vægtskaal er erstattet af en Plade, Broen, der hviler saaledes paa et System af Vægtstænger, at den ved disses Bevægelse løftes eller sænkes uden at faa nogen Hældning. Lodderne lægges paa en almindelig Vægtskaal. Vægtarmenes Længder ere valgte saaledes, at den Ting, der anbringes paa Broen, vejes op ved Lodder af en mange Gange mindre Vægt. Andre Exempler paa Brovægte ere Decimalvægten og Robervals Vægt (se iøvrigt »Hverdagsfysik« S. 259—282).

IV. Tidsmaaling.

TIDSENHEDEN. Det frembyder sig af sig selv at grunde Tidsenheden paa Himmellegemernes periodiske Bevægelser, saa meget mere som man kan bruge disse Bevægelser umiddelbart til Udmaaling af Tidsrum. Den simplest definerede Tidsenhed er Stjærnedøgnet eller Stjærnesekundet = $^1/_{86400}$ × Stjærnedøgnet. Dette er nemlig bestemt som den Tid, der forløber fra det Øjeblik, da en given Fixstjærne passerer Meridianen i den øvre Kulmination, til det samme næste Gang sker. Stjærnedøgnet er dog ikke bleven den vedtagne Tidsenhed, fordi Fixstjærnernes Bevægelse ikke staar i nogen simpel Forbindelse med Dagstidernes eller Aarstidernes Skiften. Forat opnaa denne Forbindelse har man grundet Tidsenheden paa Solens tilsyneladende Bevægelser. Aarstiderne bestemmes ved Solens Stilling til Ækvator; det tropiske Aar er det Tidsrum, der forløber fra det Øjeblik, da Solens Centrum gaar gennem Ækvator fra den sydlige til den nordlige Himmelkugle, til det samme næste Gang finder Sted. Dagstiderne bestemmes af Solens Stilling til Meridianen. Da Solens Bevægelse i Forhold til Meridianen ikke foregaar med jævn Hastighed, blive Soldøgnene ikke nøjagtig lige lange. Middelværdien er saa stor, at der gaar 365,2422 Middelsoldøgn paa et Aar. Man kender Forholdet mellem de to Tidsrum, Døgnet og Aaret, med en overordentlig Nøjagtighed paa Grund af de mangfoldige Optællinger, der er foretagne gennem Tiderne. Det Sekund, der bruges som Tidsenhed er $^1/_{86400}$ × 1 Middelsoldøgn.

PENDULURET. Tidsmaaleren i Uret er Pendulet; dettes Svingningstid afhænger foruden af Længden og Akcelerationen tillige af Udsvingets Størrelse og Luftmodstanden samt af de Kræfter, der komme frem ved Forbindelsen mellem Pendul og Urværk og

ved Bøjningen af det Staalbaand, hvori Pendulet ophænges. Længden afhænger af *Temperaturen*; forat imødegaa dennes Indflydelse paa Svingningstiden danner man Pendulet af Metaller med forskellig Udvidelseskoefficient, saaledes sammensat, at det ene Metals Udvidelse ophæver Virkningen af det andets (kompenseret Pendul). Desuden vil man om mulig anbringe Uret i et Rum med kun lidt varierende Temperatur.

Faldakcelerationen afhænger, naar der bortsees fra Luftmodstanden, af Stedet paa Jorden samt af Opdriften fra Luften (jvnfr. S. 48). Den afhænger altsaa af Luftens Vægtfylde (Temperatur, Tryk og Fugtighedsgrad); Forandringer heri faa des mindre Indflydelse, jo større Vægtfylde Pendullegemet har; Opdriften bliver konstant, hvis man indeslutter Uret i et lufttæt lukket Rum, som ikke behøver at aabnes, naar Optrækningen skal finde Sted.

Luftmodstanden vil ligeledes afhænge af Luftens Tilstand; den har dels, som ovenfor nævnt, en indirekte Indflydelse paa Svingningstiden ved at bestemme Udsvingets Størrelse, dels en direkte ved at virke som en Kraft sammen med Tyngden paa Pendulet. Samme Bemærkning kan gøres om Virkningerne fra Hæmværket i Uret paa Pendulet.

Udsvingets Indflydelse. Pendulet holdes i stadig Gang trods Luftmodstand og Gnidningsmodstand ved de Impulser, det faar fra Urværket. Naar Udsvingene ere smaa, vil Forskel i deres Størrelse kun have ringe Indflydelse paa Svingningstiden. Imidlertid er den Nøjagtighed, som man behøver, og som man kan opnaa ved Tidsmaaling, saa stor, at man maa søge at gøre Svingningstiden uafhængig af Forandringer i Udsvingets Størrelse. Man gør Udsvingene saa smaa, som det er foreneligt med en sikker Indgriben mellem Pendulet og Hemværket i Uret. Jo sværere Pendullegemet er, des mindre Indflydelse vil Forskel i Luftens Tæthed have paa Udsvingets Størrelse. Jo fuldkomnere Urværket er konstrueret, des konstantere ere de Impulser, Pendulet faar derfra. Man indretter det saavidt mulig saaledes, at det modtager Impulserne, naar dets Hastighed er størst, altsaa naar det passerer sin Ligevægtsstilling, fordi Indflydelsen paa Svingningstiden da er mindst. Pendulet ophænges i et fjedrende Staalbaand; dette krummer sig under Udsvinget og forkorter derved Pendulet; den Forkortelse af Svingningstiden, som hermed følger, kan delvis kompensere den Forlængelse af Svingningstiden, som følger med et forstørret Udsving.

Urværket har til Opgave at holde Pendulets Svingninger vedlige og at optælle dets Svingninger; viser Uret $a^h\ b^m\ c^s$, da har Pendulet, hvis det er et Sekundpendul, udført $3600\,a + 60\,b + c$, enkelte Svingninger efter Klokkeslettet $0^h\ 0^m\ 0^s$. Urets *Stand* er Forskellen mellem det virkelige Klokkeslet og det, som Uret viser. *Gangen* er det Antal Sekunder, som Uret taber i 1 Døgn. Den er altsaa negativ, hvis Uret vinder.

Penduluret er ikke bekvemt at bruge paa Rejser, fordi det ikke kan holdes i Gang under Transporten. Gangen vil blive forskellig paa forskellige Steder af Jorden, fordi Tyngdekraften forandres med Stedet. I transportable Ure (se »Hverdagsfysik« S. 199—212) erstattes Pendulet af et lille Svinghjul (Uroen), som forbindes med en lille fin, spiralformet Fjeder, hvorved det faar en stadig Ligevægtsstilling, om hvilken det kan udføre meget nær ligetidige Svingninger. Lommeuret kan indrettes som Stoppeur (Væddeløbsur) til bekvem Maaling af kortere Tidsrum; det forsynes i den Hensigt med en Mekanisme, der stopper Gangen, naar det ikke bruges; ved Tryk paa en Knap sættes det i Gang; ved det næste Tryk standses Uret, og ved et tredie Tryk springe Viserne tilbage til Nul. Foretager man de to første Knaptryk henholdsvis ved Begyndelsen og ved Slutningen af det Tidsrum, der skal maales, kan man bagefter i Ro aflæse dettes Længde. Ved det tredie Tryk gøres Uret færdig til en ny Iagttagelse.

KRONOGRAFEN. Penduluret med Sekundpendul kan kun maale hele Sekunder. Forat finde Tidspunktet for en Begivenhed, der indtræffer mellem to Sekundslag, bruger man Kronografen i Forbindelse med Uret til Bestemmelse af Brøkdelen af Sekundet. Kronografen bestaar af et Løbeværk, der trækker et Papirbaand med nogenlunde jævn Hastighed paa en eller nogle faa cm i Sekundet. Hermed er sædvanlig to Elektromagneter bragt i Forbindelse paa samme Maade som Elektromagneten i et telegrafisk Modtagerapparat, saa at der sættes et Mærke paa Papirbaandet, naar Strømmen sluttes en kort Tid i en af Elektromagneterne. Mærkerne fra de to Magneter sættes hvert paa sin Side af Papirstrimlens Midte, hvorved de kunne kendes fra hverandre. Den ene Elektromagnets Ledning føres til en med Urværket eller Pendulet forbunden Strømslutter, saaledes at Strømmen sluttes en kort Tid hvert Sekund; der afsættes følgelig en Række Sekundmærker paa den ene Side af Papirsstrimlen. Vil man finde Tidspunktet for en Begivenhed,

forsyner man den anden Elektromagnets Strømkreds med en Strømslutter, der paavirkes i det Øjeblik, da Begivenheden indtræffer; ved bagefter at udmaale dette Mærkes Plads i Forhold til de to nærmeste Sekundmærker kan den søgte Brøkdel af Sekundet findes.

Paa den polytekniske Læreanstalts fysiske Laboratorium bruges en Kronograf, der, forat kunne arbejde med svage Strømme (omtr. $^1/_{200}$ Ampere), blev udført i det store nordiske Telegrafselskabs Værksted i Lighed med Selskabets Modtagerapparat til Kabeltelegrafering, Undulatoren. Et fint Glasrør *R* (Fig. 35), der ved Hævertvirkning holder sig fyldt med en Farveopløsning i Beholderen *B*, hviler med sin nedadbøjede Spids mod Papirbaandet *P*; naar dette føres frem, skrives der af den Grund en lige Streg paa Baandet. Røret er anbragt let bevægeligt om en lodret Axe *A*; denne bærer Ankeret for en Elektromagnet (ikke vist i Figuren).

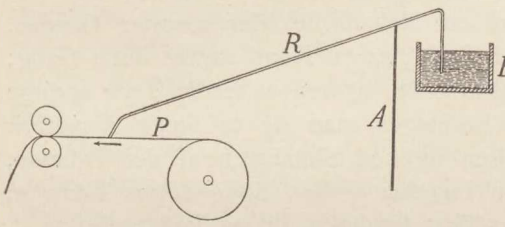


Fig. 35

Elektromagneten er omviklet med to fra hinanden isolerede Traade, hver med 200 Ohms Modstand. Gaar der Strøm i den ene Traad, svinger Røret lidt ud til den ene Side, mens Strømmen i den anden fører Røret til modsat Side. Dette vil vise sig paa Papirbaandet, ved at hver af de to Strømslutninger giver en Bugt paa den lige Streg (se Fig. 36). De af de to Strømme afsatte Mærker kunne kendes fra hverandre, ved at de gaa til modsatte Sider.

Exempel paa en Tidsmaaling ved Kronograf. Opgaven var at foretage den S. 59 omtalte Bestemmelse af Svingningstiden for den for sine Skaale befriede Balance i en Vægtskaal. I Kronografens ene Kredsløb var der indskudt et Pendul, som i Løbet af hvert Sekund skiftevis sluttede og afbrød Strømmen og derved tegnede den i Fig. 36 i noget formindsket Maalestok gengivne Bølgelinie; den opadgaaende Bølge svarer til Strømslutningen. Balancen blev sat i Svingninger, og dens Tunge iagttoges i en Kikkert. Der blev iagttaget 22 Svingninger saaledes, at Iagttageren nedtrykte Kontakten i Kronografens andet Kredsløb en kort Tid, hver Gang han i Kikkerten saa Tungen gaa forbi Nulstillingen.

Der fremkom derved for hvert iagttaget Udsving fra Ligevægtsstillingen en lille nedadgaaende Bugt paa Papirbaandet. I Figuren sees Resultatet for en af Svingningerne; den er begyndt ved x og endt ved y. Mellem x og y sees der at ligge 3 hele Sekunder, begyndte ved b og endte ved c; de to Brøkdele svarende til xb og cy blev fundne saaledes. Man udmaalte Afstandene, som fandtes

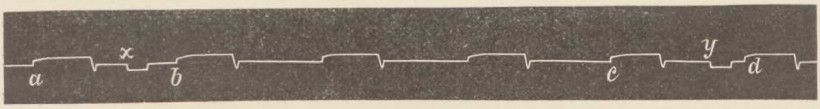


Fig. 36

at være $xb = 7{,}8$ mm og $ab = 22{,}5$ mm, $cy = 18{,}7$ mm og $cd = 24{,}0$ mm. Svingningstiden bestemmes ved disse Tal til

$$3 + \frac{xb}{ab} + \frac{cy}{cd} = 4{,}13 \text{ sek.}$$

NØJAGTIGHEDEN VED MAALING AF ET TIDSRUM vil afhænge af de Fejl, der begaaes ved Overførelsen af Tidsrummet paa Uret og af Uregelmæssighederne i dette Tidsrum i Urets Gang. Middelgangen i Løbet af et Døgn kan findes med overordenlig stor Nøjagtighed ved Iagttagelse af Urtiderne for en Fixstjærnes Kulminationer; men der hører meget til at faa en dertil svarende Nøjagtighed ved Brugen af Uret, selv om dette skulde vise en konstant Middelgang; de ovenfor nævnte Forhold, der influere paa Gangen, særlig Temperaturen, kunne nemlig skifte flere Gange i Døgnet og derfor fremkalde forbigaaende Forandringer, som muligvis ikke mærkes i Middelværdien for Døgnet. Ved Urets Forbindelse med en Kronograf faar man, foruden de før omtalte forstyrrende Virkninger, ogsaa den, at Pendulet eller Urværket skal slutte den elektriske Kontakt hvert Sekund, og det har sine Vanskeligheder at opnaa dette uden at indføre uvedkommende Indvirkninger paa Pendulet.

Overførelsen paa Uret af det Tidsrum, der skal maales, sker lettest, hvis man kan afpasse det til et helt Antal Sekunder; i saa Fald vil man begynde og afslutte Iagttagelsen i de Øjeblikke, da man *ser* Sekundviseren springe fra Sekund til andet, eller da man *hører* Sekundslaget mod Pendulankeret. I andre Tilfælde maa man bruge Kronografen. Den Nøjagtighed, hvormed man kan afpasse

et Tidsrum efter Ursekunderne, afhænger i høj Grad af Øvelse og Anlæg hos Iagttageren.

Skal man udføre en Handling, f. Ex. trykke paa Kontakten til den ene af Kronografens Strømkredse, i det Øjeblik man hører en Lyd som den fra Pendulslaget i et Ur, vil det vise sig, at der forløber en kendelig Tid mellem Lydens Fremkomst og Trykket paa Kontakten. Denne Tid, den personlige Funktion, er forskellig for forskellige Iagttagere. Ved den ovenfor omtalte Kronograf blev den maalt saaledes. I Kronografens ene Strømkreds var der indskudt det før nævnte Pendul, som hvert Sekund skiftevis afbrød og sluttede Strømmen; der blev følgelig paa Papirbaandet skrevet en bugtet Linie som den i Fig. 36 viste med en Bugt for hver Strømslutning. Ved en Telefon modtog Iagttagerens Øre en Lyd i det Øjeblik, da Strømmen en Gang blev sluttet; hans Opgave var saa hurtig som mulig derefter at trykke Kontakten for Kronografens anden Strømkreds ned, hvorved et Mærke blev afsat paa Papirbaandet. Det viste sig ved Undersøgelse af Papirbaandet, at Fingeren havde afsat dette Mærke $^1/_4$ sek, efterat Lyden var ankommen til Øret. Denne Tid er medgaaet til Lydindtrykkets Forplantning til Hjernen og til Afsendelse derfra gennem Nerverne af Ordren til Fingrene om at trykke paa Kontakten. De Tider, der ere medgaaede til elektriske og mekaniske Bevægelser under Forsøget, ere forsvindende. For 3 andre Iagttagere fandtes Tiderne 0,23, 0,26, 0,29 sek.

Tidens Telegrafering. Fra det astronomiske Observatorium kan Tiden telegraferes andet Steds hen, naar man paa dette Sted har et Ur med Kronograf, som er i telegrafisk Forbindelse med Observatoriet. Paa en i Forvejen aftalt Tid sættes Kronografen i Gang til Modtagelse dels af Sekundmærker fra Uret dels af en fra Observatoriet til aftalt Klokkeslet afsendt Strøm, som paa det løbende Papirbaand afsætter et Tidsmærke, af hvis Plads i Forhold til Urets Sekundmærker man kan finde Urets Stand. Gentages det samme efter en passende Tids Forløb, faar man bestemt Urets Gang. I mange Byer har man Tidssignaler, som sættes automatisk i Bevægelse ved et dertil indrettet Ur. I København er Tidssignalet en paa Nikolaj Taarn anbragt Kugle af Kurvefletning, som bæres af en Jærnstang, der ophejses Kl. $12^h 55^m$ Em. og bringes til at falde ved en elektrisk Strøm, som Tidssignaluret paa Observatoriet udsender Kl. 1 gennem en Ledning til Taarnet (se Hverdagsfysik S. 213). Ved Telegrafering af Klokkeslettet forbruges der Tid paa

forskellig Maade, saa at Signalet kommer noget for sent. Hvor nøjagtig man kan faa et Urs Gang bestemt derved vil afhænge af, hvorvidt den forbrugte Tid er ens ved Begyndelses- og Slutningssignalet.

Hvor man ikke kan faa Tiden telegraferet, maa man finde Urets Gang ved transportable astronomiske Instrumenter, idet man iagttager Klokkeslettene paa Uret for to Begivenheder paa Himlen, hvis Tidsforskel man kan regne sig til eller kender i Forvejen.

SMAATIDSMAALING. Det kan falde for at maale meget korte Tider, som $^1/_{100}$ eller en endnu meget mindre Brøkdel af 1 sek, og at man skal kende denne Tid med en betydelig procentisk Nøjagtighed. I Kronografen, som indrettes til en saadan Maaling, benytter man et Legeme, som bevæges med en betydelig Hastighed og under saadanne Forhold, at man kender Loven for Bevægelsen. Ved Maalingen bliver der paa dette Legemes Overflade afsat to Mærker, og af Mærkernes Afstand beregnes Tidsrummet. I Boulangé's Kronograf bruges Faldbevægelsen til Tidsmaaling, af hvilken Grund den skal omtales her. Den finder hyppig Anvendelse ved Maaling af Projektilers Begyndelseshastighed. Fra to Elektromagneter hænge Stængerne I og II (Fig. 37) ned. De bringes til at falde, den ene ved Begyndelsen, den anden ved Slutningen af det søgte Tidsrum ϑ. Idet Stængerne begge gaa nedad, vil den første have et Forspring for den sidste; dette Forspring, som afhænger af Tiden ϑ, vil voxe med den Tid, Stængerne faa Lov til at falde i. Kaldes Faldvejene til Tiden t s_1 og s_2, faar man nemlig $s_1 - s_2 = {}^1/_2 g\,(2\,t - \vartheta)\,\vartheta$. Ved at vælge en passende Værdi for Faldtiden, kan man faa den ubekendte korte Tid ϑ gjort afhængig af de forholdsvis store Længder s_1 og s_2.

Maalingen af disse Længder indrettes saaledes, at den sidst faldende Stang II under sit Fald møder en vandret Plade p; ved Stødet mod den udløses en Fjeder, der slaar en Staalkniv ind mod den første Stang I og derved sætter et Mærke i dens Overflade. Har man i Forvejen ladet Fjedren slaa et Mærke i Stangen I, mens den hængte rolig, vil Afstanden mellem de to Mærker være dens Faldhøjde s_1, mens Pladens Dybde under Stangen II er dens Faldhøjde s_2. For den søgte Tid ϑ faar man $\vartheta = \sqrt{2/g}(\sqrt{s_1} - \sqrt{s_2})$, hvor g og s_2 ere Konstanter, mens s_1 fremgaar af Forsøget.

Jo større man vælger Afstanden fra Stangen II til Pladen p, des større bliver den Længde, der tjener til Bestemmelse af Tiden

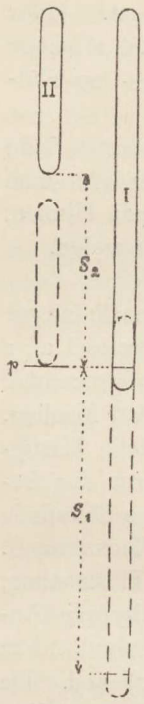


Fig. 37

ϑ. Apparatets Følsomhed kan findes, ved at man søger den Tilvæxt δs_1 i Faldhøjden s_1, der svarer til en lille Forøgelse $\delta\vartheta$ af Tiden ϑ. Man faar

$$\delta\vartheta = \sqrt{\frac{1}{2gs_1}}\,\delta s_1, \quad \delta s_1 = \sqrt{2gs_1}\,\delta\vartheta = (g\vartheta + \sqrt{2gs_2})\,\delta\vartheta$$

Er f. Ex. $\vartheta = {}^1/_{10}$ sek, $s_2 = 5$ cm, og sætter man $g = 1000$ cm, $\delta\vartheta = {}^1/_{1000}$ sek, faaes $\delta s_1 = 0{,}2$ cm. Vælger man $s_2 = 20$ cm, faaes $\delta s_1 = 0{,}3$ cm. I sidste Tilfælde vil altsaa en Forskel paa ${}^1/_{1000}$ sek give en Forskel paa 3 mm i det Sted paa Stangen I, hvor Mærket afsættes under Faldet.

Der er dog flere Fejlkilder, som ville gøre denne Følsomhed illusorisk, naar man ikke anvender stor Omhu ved Apparatets Brug. Selvinduktionen i Elektromagneternes Kredsløb vil gøre, at Strømmen ikke forsvinder strax efter Afbrydningen; er der et betydeligt Overskud af Bærekraft, kan Følgen derfor blive, at Faldet først begynder en kendelig Tid efter Strømmens Afbrydning. Endvidere vil der blive en kendelig Mængde Kraftlinier tilbage mellem Magnet og Anker efter Strømmens Forsvinden, og derfra vil der hidrøre en Tiltrækning, som modvirker Tyngden og derfor formindsker Faldhastigheden i Begyndelsen af Faldtiden.

En Fejlkilde af anden Art er den Tid, Slagfjedren bruger om at forplante Virkningen fra Stødet af Stangen II til Overfladen af Stangen I. Denne Tid kan afhænge af Temperaturen og af forskellige andre Forhold.

Paa Grund af den ringe Hastighed, der opnaaes ved Fald gennem mindre Højder — saadanne som man kan bruge i et Maaleapparat —, kan Maaling af meget smaa Tider ikke grundes derpaa. Hertil anvender man sædvanlig en hurtig roterende Tromle eller Skive, som gaar med en nogenlunde jævn Hastighed, hvis Størrelse man kender. Mærkerne for Tidsrummets Begyndelse og Slutning afsættes paa Overfladen ved Elektromagneter eller bedre ved elektriske Induktionsgnister, som fra en Platinspids slaa igennem et Sodlag, der er afsat af en sodende Flamme paa den metalliske Overflade. En Skive, hvis Diameter er 20 cm, og som gør 50 Omløb i sek, vil have en Periferihastighed, der er større end 3000

cm/sek; afsættes der ved dens Omkreds to Mærker, det ene $^1/_{10000}$ sek senere end det andet, ville Mærkerne ligge i en Afstand c. 3 mm fra hinanden. Da en saadan Afstand vil kunne maales med en Nøjagtighed af omtrent $^1/_4$ mm, kan man gøre Regning paa $^1/_{100\,000}$ sek Nøjagtighed i Tidsmaalingen.

Den største Vanskelighed ved Anvendelsen af den hurtige Rotation til Smaatidsmaalingen, kommer fra Maaling af Rotationshastigheden, altsaa fra Sammenligningen af den korte Omløbstid med Sekundet. Kunde man sikre sig jævn Hastighed i længere Tid, var der ingen Vanskelighed, thi da kunde man forbinde det roterende Legeme med et Tælleværk og optælle et stort Antal Omløb i en Tid, der kunde maales paa Uret; det vil imidlertid vanskelig kunne undgaaes, at der i denne forholdsvis lange Tid opstaar dels periodiske, dels tilfældige Hastighedsforskelle, saa at den Middelværdi, man finder, ikke kan anvendes i det korte Tidsrum, da Smaatidsmærkerne afsættes. I Reglen vil man være nødt til at maale Rotationstiden direkte; jeg har foretaget dette bl. a. paa den Maade, at jeg lod en $^3/_4$ m lang Metalstang falde tæt forbi Randen af den om en lodret Axe roterende Skive, fra hvilken der til samme Tid gennem et fint Glasrør udslyngedes en Farveopløsning, som traf Stangen under dens Fald og saaledes afsatte en Række Mærker paa Stangen, et for hvert Omløb; ved bagefter at udmaale Afstanden mellem Mærkerne kunde Omløbstiden beregnes. Mærkernes Udseende fremgaar af det i Fig. 38 viste Brudstykke af Stangen. I nedenstaaende Tabel findes opført Resultaterne af en saadan Maaling; i første Kolonne findes de til de forskellige Mærker svarende Faldhøjder, i anden de deraf beregnede Omløbstider.

Fig. 38

Faldhøjde	Omløbstid
6,194 cm	0,04367 sek
11,944 —	0,04364 —
19,562 —	0,04365 —
29,050 —	0,04366 —
40,412 —	0,04364 —
53,638 —	0,04365 —
68,732 —	

Det sees, at Forskellene mellem de forskellige Værdier for Omløbstiderne kun beløber sig til nogle faa Hundredetusindedele af 1 sek.

V. Metoder til Undersøgelse af Legemers Bevægelse.

MAALING AF HASTIGHEDER. *Et Projektils Hastighed* findes ved at maale den korte Tid, Projektilet bruger for at gennemløbe en Strækning paa nogle Meter; Strækningen maa være saa kort, at Hastighedstabet paa den er saa ringe, at man enten kan betragte Hastigheden som jævn eller dog med tilstrækkelig Sikkerhed kan korrigere for den skete Forandring. Ved begge Ender af den afmaalte Vej udspændes Ledningstraade for elektriske Strømme, som Projektilet skærer over, eller dette bringes paa anden Maade til at afbryde Strømmene. Herved bliver Opgaven reduceret til at maale Tiden mellem de to Strømmes Afbrydninger. Denne Maaling kan foretages med de S. 73 og 74 omtalte Kronografer. Med Boulangé's Kronograf bruges de to Strømme til at bære Faldstængerne, med Gnistkronografen bruges de til i Induktionsruller at frembringe de Gnister, der afsætte Tidsmærkerne paa det roterende Legeme.

Maaling af Projektilhastighed ved det *ballistiske Pendul* er grundet paa, at man kan beregne Begyndelseshastigheden u for et Legeme, der stiger og under Stigningen ikke er paavirket af andre arbejdende Kræfter end Tyngdekraften, naar man maaler Stighøjden h; man har nemlig $u = \sqrt{2gh}$, hvor g er Tyngdeakcelerationen. Da Projektilets egen Stighøjde ikke kan bruges til Maalingen, overfører man dets Bevægelsesmængde til Pendulets forholdsvis store Masse og maaler dennes Stighøjde. Af den derved fundne Begyndelseshastighed for Pendulet kan man regne sig til Projektilets.

En Vogns Hastighed kan maales, naar et af Hjulene forbindes med et Tælleværk til Visning af Hjulets Omløbstal. Tælleværket vil give den tilbagelagte Vej lig Hjulets Omløbstal gange dets

Omkreds; maales de til forskellige Vejlængder svarende Tider, kan man finde Hastighederne.

Et Apparat til Bestemmelse af et Skibs Hastighed kaldes en *Log*. Denne bestaar sædvanlig af en lille med et Tælleværk forbunden Skibsskrue, der slæbes i en Line efter Skibet. Ved at sejle med Loggen paa en udmaalt Strækning, baade frem og tilbage for at eliminere Virkningen af Strømmen, kan man finde Relationen mellem Skibets Fart og Skruens Vinkelhastighed. Loggens Visning i Forbindelse med en Tidsmaaling giver Skibets Hastighed i Forhold til Vandet.

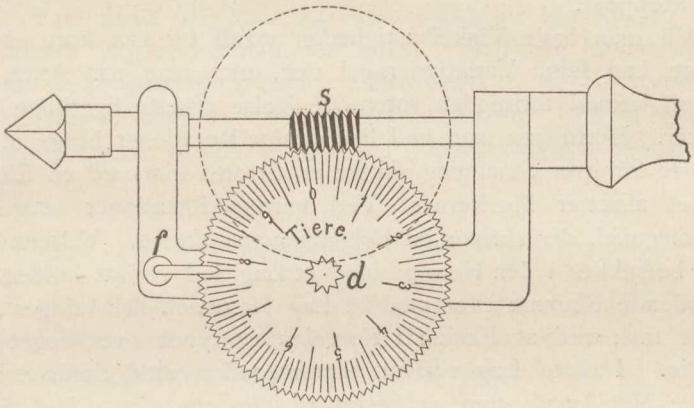


Fig. 39

Hastigheden af Delene i strømmende Vædske eller Luft kan findes paa samme Maade som Skibshastighed, nemlig ved en Skrue eller Mølle, der anbringes faststaaende i Strømmen. Man maa i Forvejen undersøge, hvorledes Apparatets Vinkelhastighed afhænger af vedkommende Fluidums Strømningshastighed. Man kan ikke forudsætte, at disse to Hastigheder ere indbyrdes proportionale, og Relationen imellem dem vil kunne afhænge af Fluidets Vægtfylde og indre Gnidning.

Et roterende Legemes Vinkelhastighed kan, naar man vil nøjes med Middelværdien for en længere Tid, findes ved at bruge et Tælleværk og Ur, saaledes som det er omtalt S. 75. Tælleværket bestaar af en Skrue uden Ende i Forbindelse med et Tandhjul med 100 Tænder (Fig. 39). Skruens Axe forsynes med en tresidet Spids, som trykkes mod Midten af Endefladen for den Axe, hvis Vinkelhastighed skal maales; herved føres Skrueaxen med, og Tandhjulet vil gaa en Tand frem for hver Omdrejning.

En Viser *f* er rettet mod Hjulets Overside, som har en Kredsinddeling med 100 Delestreger paa Kredsen. Herved kan der tælles indtil 100 Omløb. Forsynes Tandhjulet med et Drev *d*, der griber ind i et nyt Tandhjul med 100 Tænder, vil hver Inddeling paa dette svare til 10 Omløb, saa at man kan optælle indtil 1100 Omløb.

Ved Brugen af Tælleværket maa man huske, at dets Bevægelse kræver et Arbejde udført af den Axe, hvis Omløbstal maales, og at Hastigheden ved en Maskine med ringe Drivkraft kan paavirkes deraf. Til Tidsmaalingen benytter man med Fordel det S. 69 omtalte Stoppeur.

Vil man have Vinkelhastigheden maalt for saa kort en Tid, at man kan følge Variationerne i den, maa man paa Axen eller paa en dermed forbunden roterende Valse afsætte ligetidige Tidsmærker. Hertil kan man ved langsomme Rotationer bruge et Pendul, der for hver Svingning slutter en Strøm, som ved en Elektromagnet afsætter Mærkerne. Ved hurtige Rotationer bruges en Stemmegaffel, der skriver en Bølgelinie paa Valsen. Valsens Overflade bedækkes i den Hensigt med et Lag Sod ved at holdes over en sodende Flamme eller med et Lag Hexemel, der bringes til at hænge fast, ved at Fladen i Forvejen er tyndt overstrøget med Vaselin. I dette Lag skriver Stemmegaflen med Spidsen af et Stykke Metaltraad, som er fæstet til den ene Gren, idet Svingningsretningen er parallel med Valsens Axe. Længden af en Bølge vil være den Vej, det vedkommende Punkt af Valsens Overflade har flyttet sig i en Tid, der er lig Stemmegaflens Svingningstid.

En særlig Fremgangsmaade til Maaling af en hurtig Rotations Hastighed er omtalt S. 75.

Hastighedsmaaling uden Tidsmaaling. Ved et Legemes Bevægelse kan der opstaa Tryk, Spændinger, Formforandringer eller andre Virkninger, hvis Størrelse afhænger af Hastigheden; der bliver altsaa en Mulighed for at finde Hastigheden ved at maale den vedkommende Virknings Størrelse; dette kan føre til en Hastighedsmaaling, som er grundet paa en enkelt Iagttagelse, og som derfor giver Resultatet strax; det kan i mange Tilfælde være af Betydning paa saadan Maade at kunne faa en øjeblikkelig Bestemmelse af Hastigheden, og man har derfor konstrueret forskellige Apparater, Tachometre, til dette Brug.

Man kan saaledes grunde en Maaling af Strømningshastighed i Vand eller Luft paa det Forhold, at der paa Forsiden af et Legeme,

som møder Strømmen, opstaar en Forøgelse af Trykket, mens der paa Bagsiden vil komme en Formindskelse af Trykket. I et roterende fast Legeme vil der opstaa Spændinger, og i roterende Vædsker eller Luftarter vil der opstaa Forandringer i Overfladeform og Tryk, som kunne benyttes til Maaling af Rotationshastigheder.

TILVEJEBRINGELSE AF KONSTANT OMLØBSHASTIGHED. Ved Smaatidsmaaling og ved Registrering af Bevægelser har man Brug for en med meget konstant Hastighed roterende Valse. I de fleste Maskiner har man roterende Bevægelser, som man stræber at give konstant Hastighed. En første Betingelse for at opnaa dette med tilstrækkelig Tilnærmelse er, at det roterende Legeme har et stort Bevægelsesmængdemoment. Til at give et roterende Legeme et lille Tillæg $\delta\omega$ i Vinkelhastighed skal der et Arbejde

$$\delta A = \delta\,(^1/_2\, I\,\omega^2) = I\,\omega\,\delta\,\omega$$

hvor I er Inertiemomentet. Til at fremkalde en given Hastighedsforandring kræves der altsaa udført et Arbejde, som er des større, jo større Hastigheden i Forvejen er, og jo større Legemets Inertiemoment er.

Rotationshastigheden bliver konstant, naar Drivkraftens Arbejde pr. Sekund er lig Modstandenes Arbejde. De sidstes Sekundarbejde vil voxe uden Grænse med Hastigheden, mens der sædvanlig kommer en Grænse for Drivkraftens; derfor vil der, naar de to Arbejder blive lige store, indtræde Ligevægtstilstand ved en vis Hastighed, som da vil blive uforandret, saalænge Drivkraft og Modstand blive uforandrede. Smaa forbigaaende Forandringer faa, som før omtalt, kun ringe Indflydelse, naar Produktet af Inertiemoment og Vinkelhastighed er stort.

Et Lod, som trækker en Valse rundt, kan afgive en meget konstant Drivkraft. Forbindes Valsen med en Axe, som bærer et Vindfang paa en saadan Maade, at Vindfanget løber mange Gange hurtigere rundt end Valsen, faar man en ret konstant Hastighed; det hele kaldes et *Løbeværk*. Den konstante Hastighed er betinget af, at Luftmodstanden mod Vindfanget er den overvejende Modstand, og af at denne Luftmodstand er en bestemt Funktion af Hastigheden.

Kan man ikke sikre sig mod vilkaarlige Forandringer i Drivkraft og Modstand, maa man bruge en Hastighedsregulator; det er en Mekanisme, hvis Led indtage en alene af Hastigheden afhængig indbyrdes Stilling, og som bringes til at øge eller mindske Drivkraften (eller Modstanden), naar de afvige fra den til den ønskede Hastighed svarende Stilling. Det koniske Pendul dannet af en Vægt, der hænger i en til en lodret Axe leddet Stang, kan bruges som Regulator for denne Axes Omløbshastighed. Dets Fjærningsvinkel vil nemlig voxe med Hastigheden, og det kan uden Vanskelighed indrettes saaledes, at Fjærningen ud over en vis Vinkel formindsker Drivkraften, mens denne øges ved tilbagegaaende Bevægelse. For ikke at faa Sidetryk paa Axen bruger man et Dobbeltpendul. En saadan Regulator bruges i Dampmaskinen, idet Pendulerne formindske Damptilførslen, naar de løftes, og øge den, naar de sænkes.

Da Regulatoren ikke træder i Virksomhed, førend der er indtraadt nogen Hastighedsforandring, faar man ikke en virkelig konstant Hastighed, men denne vil svinge paa begge Sider af den tilsigtede Værdi. Det gælder da om at gøre de uundgaaelige Svingninger saa smaa som mulig.

Det koniske Penduls Fortrin som Regulator er grundet paa, at dets Omløbstid T varierer langsomt med Fjærningsvinklen φ, naar denne er lille. Man har nemlig, idet Pendullængden er l

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l\cos\varphi}{g}}, \qquad \frac{\delta T}{T} = {}^1/_2\, tg\,\varphi\delta\varphi$$

dette Udtryk giver, at hvis Fjærningsvinklen forøges med $\delta\varphi = {}^1/_{60}$ (omtr. 1^0), vil Omløbstiden formindskes med

	$^1/_7$	$^1/_3$	$^1/_2$	$^3/_4$	Procent
naar $\varphi =$	10^0	20^0	30^0	40^0	

En lille Forandring i Omløbstiden vil altsaa fremkalde en forholdsvis stor Forandring i Fjærningsvinklen og følgelig en tilsvarende stor Bevægelse af det Organ, der regulerer Drivkraften.

Hjulene i et Ur have konstant Omløbstid, men ikke konstant Hastighed; det med Pendulet direkte forbundne Echappementshjul bevæger sig i Spring, idet det standses ved hvert Pendulslag. Da alle Urhjulene er i Forbindelse, maa ogsaa disses Bevægelse være stødvis, om det end kun mærkes lidt for de Hjul, der gennem

flere Mellemled ere forbundne med Echappementet. Iagttager man Minutviseren paa et Lommeur gennem en Lup, ser man dog tydeligt den springende Bevægelse, som uden videre falder i Øjne for Sekundviserens Vedkommende. Den konstante Omløbstid skyldes Forbindelsen med det ligetidig svingende Pendul. Der er intet i Vejen for at bruge Urværket til at drive en Valse til Smaatidsmaaling med stor Hastighed, f. Ex. 10 Omløb i sek. Paa Grund

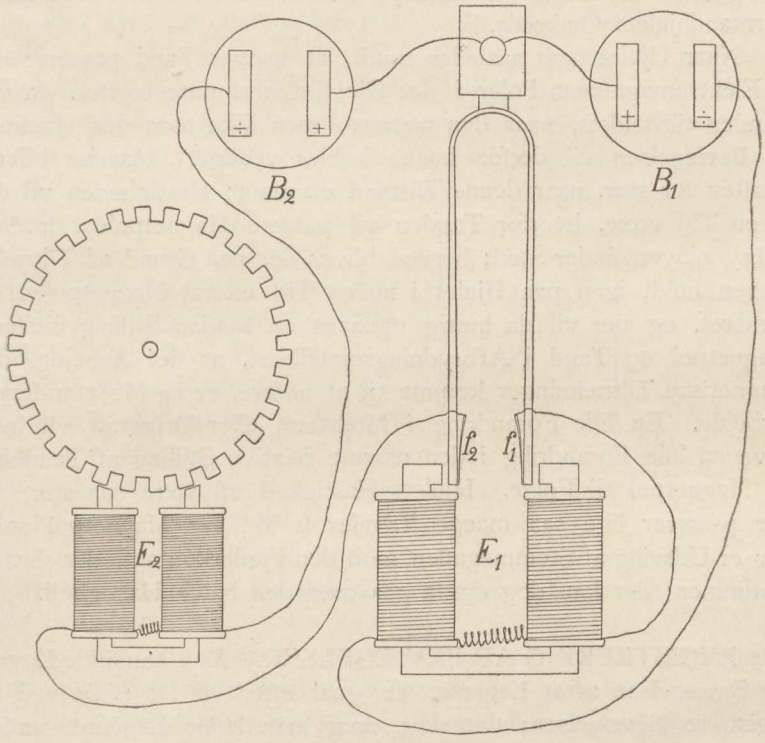


Fig. 40

af den store Hastighedsomsætning, der maa ske ved flere Tandhjul og Drev, mellem Ganghjulet i Uret og Valsen, vil den stødvise Bevægelse ikke mærkes i Valsen; alligevel kan man ikke gøre Regning paa en meget konstant Vinkelhastighed, fordi de samme Mellemled, der udjævne Stødene, ogsaa give Spillerum for periodiske Forandringer i Valsens Vinkelhastighed.

I la Cours Tonehjul Fig. 40 bruges de ligetidige Svingninger af en Stemmegaffel til at holde et Tandhjul af Jærn i konstant

Omløbshastighed. En Stemmegaffel holdes ved Batteriet B_1 i stadige Svingninger paa samme Maade som Kneblen i en elektrisk Klokke eller Afbryderen i et Induktionsapparat. Strømmen fra B_1 gaar gennem Elektromagneten E_1 til Fjedren f_1; herfra gaar den, naar Gaflen svinger, over i denne og derfra tilbage til Batteriet. Samme Stemmegaffel vil, naar den svinger, ved Fjedren f_2 skiftevis slutte og afbryde Strømmen fra Batteriet B_2, hvis Strøm er ført gennem Elektromagneten E_2, der har sine Poler rettede mod Jærntandhjulets Omkreds.

Naar Hjulet gaar saaledes rundt, at enhver Tand passerer en af Elektromagnetens Poler i det Øjeblik Strømmen brydes, da vil Tanden tiltrækkes, naar den nærmes, men ikke naar den fjærnes, og Bevægelsen vil derfor kunne holdes vedlige. Maaske bliver Kraften for stor, naar denne Tilstand er naaet; Hastigheden vil da til en Tid voxe, hvorfor Tanden vil passere Magnetpolen, førend Afbrydningen finder Sted; herved bliver der paa Grund af Tiltrækningen holdt igen paa Hjulet i nogen Tid efterat Magnetpolen er passeret, og der vil da hurtig opnaaes en saadan Stilling mellem Magnetpol og Tand i Afbrydningsøjeblikket, at det Arbejde, de magnetiske Tiltrækninger komme til at udføre, er lig Modstandenes Arbejde. En lille Forandring i Modstand eller Drivkraft vil kun have en lille Forandrihg i den nævnte relative Stilling af Tandhjul og Magnetpol til Følge. Hjulets Hastighed vil være saa stor, at der passerer lige saa mange Tænder forbi hver Magnetpol som der er Udsving af Stemmegaflen mod den Fjederkontakt, der slutter Strømmen; det kan dog ogsaa gaa med den halve Hastighed.

REGISTRERING AF BEVÆGELSER. Man kan finde Loven for Bevægelsen af et Legeme, der gaar efter en ret Linie ved at registrere Bevægelsen; det sker, naar man lader Legemet under sin Bevægelse skrive paa en plan eller cylindrisk Overflade, som man holder i Bevægelse med jævn Hastighed i sit eget Spor i en Retning vinkelret paa Legemets Bevægelsesretning. Herved tegnes en Kurve OB (Fig. 41), ved hvilken Loven for Bevægelsen, som det nedenfor skal vises, kan udledes. Skrivning med en Stift eller Pen kræver imidlertid Arbejde; derved kan der indvirkes kendelig paa Legemets Bevægelse, saa at Resultatet forfalskes. Maa man tage Hensyn til dette Arbejde, kan man bruge fotografisk Registrering, idet man fotograferer Legemet under Bevægelsen paa en Plade, der føres i sit eget Plan vinkelret paa Bevægelsens Retning.

Smaa Drejninger af et Legeme kunne registreres fotografisk, naar man anbringer et Hulspejl paa Legemet, saaledes som vist i Fig. 26, S. 44. Overfor Spejlet stiller man en lille Lysgiver, hvis Billede man lader falde paa en lysfølsom Flade, som føres i sit eget Spor i en Retning parallel med Legemets Omdrejningsaxe. Billedpunktet vil under disse Forhold tegne en Kurve, som afhænger af Spejlets Drejninger. Paa denne Maade registreres ophængte Magneters smaa Bevægelser i de magnetiske Observatorier.

Fig. 41 viser den plane Flade eller den udfoldede Cylinderflade, hvorpaa et Legeme med retlinet Bevægelse tænkes at have tegnet Kurven OB; TO er Fladens og OS Legemets Bevægelsesretning. Da Fladens Bevægelse er forudsat jævn, vil Abscissen $OC = t$ være et Maal for den Tid, Legemet har været om at skrive Kurvestykket OD; den tilhørende Ordinat $CD = s$ er den Vej, Legemet har tilbagelagt i Tiden t. Hastigheden til Tiden t er $v = ds/dt$; den er lig tg til Vinklen mellem Tangenten i Punktet D og Abscisseaxen. Udmaaler man Koordinaterne til Punkter i Kurven samt de tilhørende Tangentvinkler, faar man altsaa Oplysning om de til forskellige Tidspunkter gennemløbne Veje og om de til samme Tidspunkter hørende Hastigheder. Kurven er følgelig et Udtryk for Bevægelsesloven.

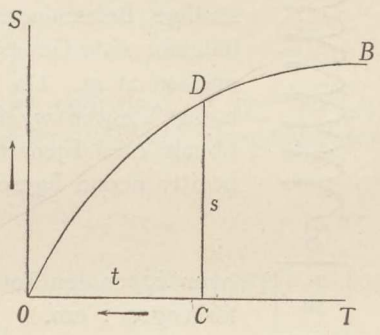


Fig. 41

Registrering anvendes meget ved meteorologiske Iagttagelser. I et selvregistrerende Barometer registreres saaledes Kvægsølvets op- eller nedadgaaende Bevægelse i Form af en Kurve, paa hvilken man kan udmaale hvad Barometerstanden har været til ethvert forbigangent Tidspunkt indenfor Registrertiden. Den S. 70 omtalte Kronograf registrerer Pennens Bevægelse og kan derigennem bruges til at registrere Variationerne i den Strøm, som føres gennem Elektromagneterne; et lignende Apparat har af det store nordiske Telegrafselskab været brugt paa denne Maade til Registrering af Jordstrømme, der fremkomme i en Telegrafledning, naar Jorden ved Ledningens to Jordplader har forskelligt Potential.

DEN SVINGENDE BEVÆGELSE har en stor Mængde vigtige Anvendelser ved Undersøgelser især indenfor den mekaniske Fysik og Elektricitetslæren. Da Haandbøgerne i Mekanik og Fysik i Reglen ikke behandle Lovene for denne Bevægelse med det ønskelige Hensyn til dens Anvendelser, skal der nedenfor meddeles de vigtigste derhen hørende Sætninger.

Som et simpelt Exempel paa et svingende Legeme tages en i en Skruefjeder hængende Vægt m (Fig. 42), der sættes i Svingning, ved at man tvinger Legemet lodret ned under sin Ligevægtsstilling og derpaa slipper det. Legemet er under Paavirkning af den konstante Tyngdekraft mg og af den variable Fjederkraft f. Den sidste kan undersøges ved at iagttage Ligevægtsstillingerne af Fjedrens nederste Endepunkt ved forskellige Belastninger m. Man vil finde, at Fjedren indenfor vide Grænser forlænges proportionalt med Forøgelsen af m. Da Fjederkraften i Ligevægtsstillingen er lig Vægten mg følger det heraf, at f voxer proportionalt med Fjedrens Forlængelse l. Regnes Kraften positiv nedad ligesom l, bliver

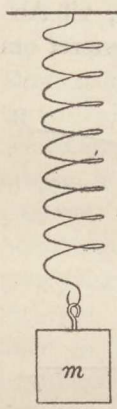


Fig. 42

$$\delta f = -k_1 \delta l,$$

hvor k_1 er den Forøgelse Kraften faar, ved at Fjedren forlænges 1 cm.

I Ligevægtsstillingen er $f = -mg$. Forlænges Fjedren yderligere et Stykke s, idet Legemet trykkes nedad, bliver $f = -mg - k_1 s$. Resultanten af samtlige paa Legemet i Afstanden s fra Ligevægtsstillingen virkende Kræfter bliver følgelig

$$k = -k_1 s$$

Resultanten eller den bevægende Kraft er proportional med Afstanden fra Ligevægtsstillingen og er rettet mod denne. Udtrykket for k finder ogsaa Anvendelse, naar Fjedren forkortes, idet s da er negativ.

De Svingninger, som det ophængte Legeme udfører, vise sig *ligetidige*, idet Svingningstiden er uafhængig af Udsvingets Størrelse (Amplituden); den afhænger af den ophængte Masse m og af Størrelsen k_1, der er et Maal for Fjedrens Stivhed. Ved Svingningstiden forstaaes Tiden fra en Gennemgang gennem Ligevægtsstillingen til den næste Gennemgang i samme Retning. Den findes at være

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_1}} \text{ sek},$$

naar m maales i gr og k i Dyn.

Loven for en Bevægelse af denne Art er udtrykt ved

$$s = a \sin bt$$

hvor s og t er Flytning og Tid, begge regnede fra Legemets Udgang fra Ligevægtsstillingen, mens a og b er Konstanter. Giver man t efterhaanden Værdierne $0, \frac{\pi}{2b}, \frac{\pi}{b}, \frac{3\pi}{2b}, \frac{2\pi}{b}$, ser man, at Ligningen udtrykker en svingende Bevægelse med Udsvinget a. Svingningstiden bliver

$$T = \frac{2\pi}{b}$$

Da a ikke indgaar heri, sees det endvidere, at der ved Ligningen er udtrykt ligetidige Svingninger. Indføres Svingningstiden, faaes

$$s = a \sin \frac{2\pi}{T} t.$$

Ved at differentiere Ligningen faar man Hastigheden v til forskellige Tider

$$v = \frac{2\pi a}{T} \cos \frac{2\pi}{T} t = u \cos \frac{2\pi}{T} t$$

Denne Ligning viser, at Hastigheden er Maximum (positiv eller negativ), naar Ligevægtsstillingen passeres.

Akcelerationen faaes ved at differentiere Udtrykket for v. Multipliceres γ med Legemets Masse m, faaes Kraftens Størrelse k til forskellige Tider

$$k = m\gamma = -m \frac{4\pi^2 a}{T^2} \sin \frac{2\pi}{T} t = -m \frac{4\pi^2}{T^2} s$$

En Bevægelse som den givne fremkommer altsaa, i Overensstemmelse med hvad Forsøget med det i en Fjeder ophængte Legeme viser, ved en Kraft, som er proportional med Legemets Afstand fra Ligevægtsstillingen, og som er rettet ind mod denne; det sidste er udtrykt ved det negative Fortegn for k. Omvendt kan man slutte, at man kan faa ligetidige Svingninger, hvor en saadan Kraft virker. Sætter man

$$k = -k_1 s,$$

finder man det ovenfor givne Udtryk for Svingningstiden

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_1}}.$$

Den svingende Bevægelses Betydning for fysiske Undersøgelser er grundet paa, at man kan finde Svingningstiden med stor Nøjagtighed, fordi Bevægelsen kan fortsættes i lang Tid. Har man funden Svingningstiden, kan man ved ovenstaaende Udtryk beregne Konstanten k_1, der bestemmer den bevægende Kraft. Kræfter af højst forskellig Oprindelse undersøges derfor ad den Vej. Som velkendte Exempler skal nævnes Tyngdens og Jordmagnetismens Undersøgelse.

Dæmpede Svingninger. Mens det ovennævnte i en Fjeder ophængte Legeme svinger, vil man se, at Udsvinget efterhaanden tager af; Svingningerne dæmpes. Dette skyldes tildels Luftmodstanden, men dog mest en indre Gnidning i den Metalraad, hvoraf Fjedren er dannet; ved Traadens Bøjninger forskydes nemlig Partiklerne i den i Forhold til hverandre, hvorved Gnidningen fremkaldes. Denne Kraft er ikke taget med i ovenstaaende Regning, hvorfor den virkelige Svingningstid er lidt større end beregnet.

Ved dæmpede Svingninger vil man i mange Tilfælde finde, at Resultanten af de forskellige *Modstande er proportional med det svingende Legemes Hastighed*; under den Forudsætning ere Svingningerne ligetidige ligesom de udæmpede. Betyder $\varkappa$ den til en Hastighed 1 cm i sek svarende Modstand, kan man vise, at Svingningstiden bliver

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_1 - \frac{\varkappa^2}{4m}}}$$

Under samme Forudsætning, at Modstanden er proportional med Hastigheden, kan man vise, at Udsvinget a aftager saaledes, at der bliver et konstant Forhold, Dæmpningsforholdet, mellem to hvilkesomhelst paa hinanden følgende Udsving, eller en konstant Differens mellem Udsvingenes Logaritmer. Denne Differens kaldes det logaritmiske Dekrement. Benyttes naturlige Logaritmer kan det vises, at

$$\lambda = \text{lognat} \frac{a_n}{a_{n+1}} = \frac{\varkappa T}{4m}$$

Ligningen for den dæmpede Svingningsbevægelse er

$$s = c\, e^{-\frac{\varkappa}{2m} t} \sin \frac{2\pi}{T} t,$$

hvor c er en Konstant, e Grundtallet for de naturlige Logaritmer. Udsvinget er proportionalt med Faktoren $c\, e^{-\frac{\varkappa}{2m} t}$. Mellem to paa hinanden følgende Udsving forløber Tiden $^1/_2\ T$. Forholdet mellem dem bliver derfor lig $1 : e^{-\frac{\varkappa}{4m} T}$, og Differensen mellem deres naturlige Logaritmer bliver som ovenfor sagt $\lambda = \varkappa T/4\, m$.

Indføres λ i Udtrykkene for s og T faaes

$$s = c\, e^{-\frac{2\lambda}{T} t} \sin \frac{2\pi}{T} t, \qquad T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_1}\left(1 + \frac{\lambda^2}{\pi^2}\right)},$$

hvilke Udtryk foretrækkes i Praxis, da λ kan findes ved simple Iagttagelser. For det svingende Legemes Hastighed faaes ved Differentiation

$$v = \frac{2\pi c}{T} e^{-\frac{2\lambda}{T} t} \cos \frac{2\pi}{T} t - \frac{2\lambda}{T} s = v_0\, e^{-\frac{2\lambda}{T} t} \cos \frac{2\pi}{T} t - \frac{2\lambda}{T} s$$

hvor $v_0 = \frac{2\pi c}{T}$ er Hastigheden i Ligevægtsstillingen til Tiden $t = 0$. Herved er Betydningen af Konstanten c i Bevægelsesligningen given. Søges dv/dt, faaes Akcelerationen, i Overensstemmelse med hvad før er sagt, sammensat af to Led, det ene proportionalt med s, det andet med v.

Dæmpningens Indflydelse paa Svingningstiden fremgaar af Udtrykket for T. Naar der ingen Dæmpning var, vilde Svingningstiden være $T_0 = 2\pi \sqrt{m/k_1}$. Følgelig er

$$T = T_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2}$$

Er λ lille mod π, kan man sætte

$$T = T_0 \left(1 + {}^1/_2 \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2\right).$$

Heraf sees det, at selv en betydelig Dæmpning kun har en ringe Indflydelse paa Svingningstiden, saaledes som det nærmere fremgaar af omstaaende Tabel, hvor a_n/a_{n+1} er Dæmpningsforholdet.

$\frac{a_n}{a_{n+1}} - 1$	$\frac{1}{2}\left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2$	λ
$\frac{1}{100}$	$5{,}0 \cdot 10^{-6}$	0,0099
$\frac{1}{50}$	$2{,}0 \cdot 10^{-5}$	0,0198
$\frac{1}{20}$	$1{,}2 \cdot 10^{-4}$	0,0488
$\frac{1}{10}$	$4{,}6 \cdot 10^{-4}$	0,0953
$\frac{1}{7}$	$9{,}1 \cdot 10^{-4}$	0,1335

Ved udæmpede Svingninger er Tiden for Udsvinget fra Ligevægtsstillingen til Yderstillingen lig Tiden for Tilbagesvinget; dette gælder ikke for de dæmpede Svingninger, hvor Tilbagesvinget tager længere Tid end Udsvinget. For svag Dæmpning er Tidsforskellen omtr. lig $\frac{1}{10}\lambda T$.

Maaler man baade Svingningstid og Dæmpning, kan man ved de ovenstaaende Udtryk finde Konstanterne k_1 og $\varkappa$, der henholdsvis bestemmer den bevægende Kraft og Modstanden. Ad den Vej har man kunnet undersøge den indre Gnidning i Luftarter og Vædsker.

Dæmpede man det svingende Legeme kunstig, lod man det f. Ex. hænge ned i en sejg Vædske, kunde Modstanden blive saa stor, at

$$(\tfrac{1}{2}\varkappa)^2 = mk_1.$$

Svingningstiden vil da blive uendelig stor. Dette vil sige, at Legemet, ført ud fra sin Ligevægtsstilling og derpaa sluppet, vil være uendelig længe om at vende tilbage; det vil dog i en endelig Tid komme Ligevægtsstillingen saa nær, at man ikke kan se Afvigelsen. Det ejendommelige ved Bevægelsen er, at Legemet ikke længer kan svinge; det gaar først med voxende, derpaa med aftagende Hastighed hen mod sin Ligevægtsstilling, hvor det forbliver i Hvile. En saadan Bevægelse kaldes *aperiodisk*. I Galvanometre indretter man det ofte saaledes, at den ophængte Magnet eller Traadrulle har aperiodisk Bevægelse, fordi man derved kan undgaa at iagttage en Række Svingninger, naar man skal finde Ligevægtsstillingen.

De udæmpede ligetidige Svingninger kunne som bekendt fremstilles ved Projektion paa en Diameter af Cirkelbevægelsen med jævn Hastighed. Paa lignende Maade faar man de dæmpede Svingninger fremstillede som Projektionen paa en ret Linie gennem Polen for en logaritmisk Spiral af et Punkt, som gaar indad i Spi-

ralen, saaledes at radius vector fra Polen har konstant Vinkelhastighed.

Svingninger om en Axe. Naar et om en Axe drejeligt Legeme har en Stilling, hvor det er i stadig Ligevægt, kan det udføre Svingninger om denne Stilling. Hvis Resultanten H af de Momenter, der føre Legemet mod Ligevægtsstillingen, er proportional med Fjærningsvinklen φ, $H = -H_1 \varphi$, blive Svingningerne ligetidige, og Svingningstiden for udæmpede Svingninger bliver analogt med det S. 85 givne Udtryk.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{H_1}}$$

hvor I er Legemets Inertiemoment om Svingeaxen og H_1 Momentets Størrelse, naar Fjærningsvinklen er lig 1 i Buemaal. Her betyder Svingningstiden, ligesom før, Tiden mellem to Gennemgange i samme Retning gennem Ligevægtsstillingen. Man bruger dog oftest, naar Talen er om Penduler og Galvanometre, Svingningstid som Betegnelse for det halve af denne Tid, Tiden for en »enkelt« Svingning ɔ: Bevægelsen fra den ene Yderstilling til den anden; det første er for saa vidt at foretrække, som man derved faar Betegnelse for en hel Periode i Bevægelsen, den Tid efter hvilken Legemet faar samme Fase, som det begyndte med. Tiden for en enkelt Svingning skal i det følgende betegnes ved ϑ.

Ere Svingningerne dæmpede ved en Modstand, hvis Moment om Axen er proportionalt med Vinkelhastigheden, blive de fremdeles ligetidige. Er ε Momentet for den til Vinkelhastigheden 1 svarende Modstand, bliver det logaritmiske Dekrement λ og den enkelte Svingningstid ϑ

$$\lambda = \text{lognat} \frac{a_n}{a_{n+1}} = \frac{\varepsilon \vartheta}{2I} \qquad \vartheta = \pi \sqrt{\frac{I}{H_1}\left(1 + \frac{\lambda^2}{\pi^2}\right)}$$

hvor a betegner Udsvingets Størrelse.

Ligningerne for Bevægelsen faaes ved i de ovenfor for retlinede Svingninger givne at sætte φ for s, ω for v og I for m. Altsaa

$$\varphi = \frac{\omega_0 \vartheta}{\pi} e^{-\lambda \frac{t}{\vartheta}} \sin \frac{\pi}{\vartheta} t, \qquad \omega = \omega_0 e^{-\frac{\lambda}{\vartheta} t} \cos \frac{\pi}{\vartheta} t - \frac{\lambda}{\vartheta} \varphi$$

Sættes $\lambda = 0$, faaes Ligningerne for de udæmpede Svingninger, hvor, $\omega_0 = \pi a/\vartheta$.

MAALING AF SVINGNINGSTID OG DÆMPNING. Svingningstiden kan findes ved at optælle Svingningerne i en paa Uret afmaalt Tid; bruger man et Stoppeur (se S. 69), sættes dette i Gang, idet man tæller Nul ved en begyndende Svingning, og standses, naar man har talt et forudbestemt Antal N_1 Svingninger; er det paa Uret aflæste Antal Sekunder N, bliver Svingningstiden N/N_1. Bestemmelsens Nøjagtighed voxer med det Antal Svingninger man tæller, og den begrænses derfor, ved at man er udsat for at tælle fejl, naar man skal optælle et meget stort Antal.

Fortsættes Svingningerne i længere Tid med kun ringe Forandring i Svingningstiden, kan man opnaa en stor Nøjagtighed uden at behøve Optællingen af et tilsvarende stort Antal Svingninger. Man iagttager det svingende Legeme saaledes, at man noterer de Tidspunkter, da det passerer sin Ligevægtsstilling i en Række efter hverandre følgende Svingninger; herved faar man en foreløbig Værdi T_1 for Svingningstiden. Ere Svingningerne for hurtige, til at man kan følge dem paa den Maade, kan man nøjes med at notere Tiden for hver anden eller hver fjerde Gennemgang. Man lader nu Legemet svinge videre nogen Tid uden at iagttage det, og begynder da atter at iagttage Klokkeslettene for nogle Passager gennem Ligevægtsstillingen. Er Klokkeslettet for en Passage i den første Række K_1 og for en Passage i samme Retning i den anden Række K_2, da ved man, at der er udført et helt Antal Svingninger i Tidsrummet $K_2 - K_1$. Altsaa er

$$K_2 - K_1 = N \cdot T$$

hvor N er et endnu ukendt *helt Tal* og T den søgte Svingningstid. Det hele Tal finder man ved den foreløbige Værdi T_1, idet man udfører Divisionen $(K_2 - K_1)/T_1$. Hvis T_1 er bestemt med tilstrækkelig Nøjagtighed, vil denne Kvotient være saa nær ved et helt Tal, at man ikke kan være i Tvivl om, hvilket helt Tal N er. Man faar en stor Betryggelse i saa Henseende, hvis man gør tre Iagttagelsesrækker, saaledes at man iagttager Passager ved Klokkeslettene K_1, K_2, K_3 og vælger $K_2 - K_1$ saa kort, at der slet ingen Tvivl kan være om det hele Antal (om saa skal være, kan man optælle Svingningerne i Mellemtiden dog uden at notere Klokkeslettene). Herved kan man opnaa en saa sikkert bestemt foreløbig Værdi, at man uden Fare for at tage en hel Svingning fejl kan lade $K_3 - K_2$ vare en meget længere Tid end $K_2 - K_1$ og saaledes opnaa en dertil svarende forøget Nøjagtighed.

Hvis Udsvinget ikke tager kendelig af i Iagttagelsestiden, vil det ikke medføre nogen Fejl, om Passagepunktet ikke netop er Ligevægtsstillingen, da det stadig er i samme Fase man iagttager Svingningerne; det er dog heldigst at bruge Ligevægtsstillingen, fordi Hastigheden der er størst og Tidspunktet derfor skarpest bestemt. Er der derimod en kendelig Dæmpning, vil der begaaes en Fejl ved Iagttagelser udenfor Ligevægtsstillingen, fordi der da ikke svarer samme Fase til samme Afstand fra Ligevægtsstillingen i de forskellige Svingninger.

I det følgende skal det vises, hvorledes man kan korrigere Bestemmelsen af Svingningstiden for den Fejl, der hidrører fra, at man ved dæmpede Svingninger ikke iagttager Legemet nøjagtig i Ligevægtsstillingen. Der er Grund til at foretage en saadan Undersøgelse, fordi Ligevægtsstillingen kan have forandret sig, efter at Legemet er sat i Bevægelse, f. Ex. paa Grund af en elastisk Eftervirkning ved Torsionssvingninger.

I Fig. 43 er den dæmpede ligetidige Svingningsbevægelse grafisk fremstillet med Tiden som Abscisse og Afstanden fra Ligevægtsstillingen som Ordinat. OT betegner altsaa Ligevægtsstillingen, og det antages, at man noterer Klokkeslettene for de Tidspunkter, fremstillede ved $v_0, v_1, v_2 \ldots$, da Legemet findes i Afstanden OO^1 derfra. Herved faaes Tidsintervallerne $\vartheta_1, \vartheta_2 \ldots$ henholdsvis for Bevægelserne $v_0 a_1 v_1$, $v_1 a_2 v_2 \ldots$

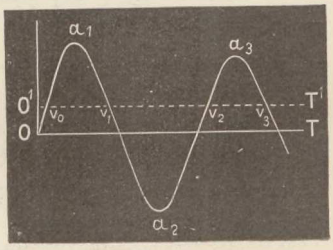


Fig. 43

Ligningerne for Bevægelsen ere

$$\varphi = \frac{\omega_0 \vartheta}{\pi} e^{-\lambda \frac{t}{\vartheta}} \sin \frac{\pi}{\vartheta} t, \qquad \omega = \omega_0 e^{-\frac{\lambda}{\vartheta} t} \cos \frac{\pi}{\vartheta} t - \frac{\lambda}{\vartheta} \varphi$$

Tiden $O^1 v_0 = \tau_0$ for Bevægelsen $OO^1 = a$ kan sættes lig a/ω_0, idet a forudsættes saa lille i Sammenligning med hele Udsvinget til a_1, at man kan regne Hastigheden konstant lig ω_0. Den til Bevægelsen mellem OT og v_n svarende Tid τ_n bliver under samme Forudsætning

$$\tau_n = \frac{a}{\omega_0 e^{-n\lambda}} = \tau_0 e^{n\lambda}$$

De observerede Tidsintervaller ϑ_1, ϑ_2 . . . ere aabenbart skiftevis større og mindre end Svingningstiden ϑ. Man faar

$$\vartheta_1 = \vartheta - \tau_0 - \tau_1, \quad \vartheta_2 = \vartheta + \tau_1 + \tau_2, \quad \vartheta = \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2} + \frac{\tau_0 - \tau_2}{2}$$

$$\vartheta_2 - \vartheta_1 = \tau_0 + 2\tau_1 + \tau_2 = (1 + e^{\lambda})^2 \tau_0$$

Da $\vartheta_2 - \vartheta_1$ kendes fra Iagttagelserne, og da det logaritmiske Dekrement λ ligeledes kan iagttages, kan man finde Tiden τ_0. Man kan følgelig beregne det Klokkeslet, da Legemet gik ud fra sin Ligevægtsstilling i O, naar man har observeret Klokkeslettene for Passagerne v_0, v_1 og v_2, og naar man kender λ.

Har man med et passende Tidsmellemrum udført to Rækker Iagttagelser af Klokkeslettene for de nævnte Passager, kan man altsaa i Henhold til ovenstaaende finde Klokkeslettene K_1 og K_2 for den første Udgang fra Ligevægtsstillingen i hver af Rækkerne. Tidsrummet $K_2 - K_1$ omfatter da et helt Antal Svingninger; $K_2 - K_1 = N\vartheta$. Den foreløbige Værdi for ϑ, der bruges til at bestemme N, findes som Middeltallet af et lige Antal af de observerede Intervaller ϑ_1, ϑ_2 . . .

Dæmpningen findes bedst saaledes, at man bliver uafhængig af Ligevægtsstillingen, idet man maaler Størrelsen b af Svinget fra den ene Yderstilling til den anden. Man har

$$e^{\lambda} = \frac{a_n}{a_{n+1}} = \frac{a_{n+1}}{a_{n+2}} = \frac{a_n + a_{n+1}}{a_{n+1} + a_{n+2}} = \frac{b_n}{b_{n+1}}.$$

Maaler man Størrelsen af to Sving b_o og b_p, idet man optæller det mellemliggende Antal Sving, $n-1$, vil man have

$$\frac{b_o}{b_n} = e^{n\lambda}, \qquad \lambda = \frac{1}{n} \text{lognat} \frac{b_o}{b_n}$$

Antallet n vælger man saa stort, at b_n bliver betydelig mindre end b_o uden dog at blive for lille til at kunne maales sikkert.

Exempel. Et ballistisk Galvanometer med bevægelig Traadrulle og fast Magnet blev undersøgt for Svingningstid og Dæmpning. Svingningerne iagttoges ved Spejlaflæsning. For at bestemme Dæmpningen maaltes to Sving b_0 og b_{20}

$$b_0 = 57{,}8 \text{ mm}, \quad b_{20} = 11{,}18 \text{ mm}; \text{ heraf } \lambda = 0{,}0821.$$

Svingningstiden blev funden ved Undulatorkronografen (S. 70), paa hvis Papirbaand en Sekundbølgelinie, som den i Fig. 36 viste,

blev tegnet af det strømsluttende Pendul. Ved Sekundslaget Kl. $2^h\ 21^m\ 0^s$ blev Kontakten for det andet Strømløb trykket ned, hvorved dette Sekunds Bølge paa Papirbaandet blev mærket ved en Bugt som den ved x i Fig. 36 viste. Traadrullen i Galvanometret var i Forvejen sat i Svingninger, der nu iagttoges i Kikkerten, og ved den første Passage gennem Traadkorset af Billedet af en under Kikkerten paa sort Grund tegnet hvid, lodret Streg, samt ved de 4 derpaa følgende Passager blev Kontakten hver Gang paa ny nedtrykt. Herved blev Tidspunkterne for disse Passager afmærkede paa Baandet.

Kronografen blev nu standset i omtr. 2^m og derefter atter sat i Gang. Tidspunktet $2^h\ 24^m\ 0^s$ blev afmærket, og der blev paa ny afsat Mærker for 5 Passager i Kikkerten.

Ved Tælning af de hele Sekunder fra det med hver Iagttagelsesrække afmærkede Begyndelsesmoment og ved Udmaaling af Passagemærkernes Plads i de tilhørende Sekundbølger blev de nedenstaaende Klokkeslet for Passagerne bestemte.

1. Række			2. Række		
Passage	Klokkeslet	Interval	Passage	Klokkeslet	Interval
0	$2^h\ 21^m\ 6{,}69^s$		0	$2^h\ 24^m\ 24{,}67^s$	
		10,96 sek			10,79 sek
1	17,65		1	35,46	
		11,09			11,14
2	28,74		2	46,60	
		10,92			10,69
3	39,66		3	57,29	
		11,04			11,29
4	50,70		4	68,58	

Da Intervallerne ϑ_1 til ϑ_4 i begge Rækker skiftevis voxe og aftage, sluttes det, at man ikke har faaet noteret Tidspunkterne for Gennemgang gennem Ligevægtsstillingen. Forskellene ere større i 2. end i 1. Række i Overensstemmelse med, at Udsvingene ere aftagne, hvorfor den konstante Afvigelse fra Ligevægtsstillingen gør sig stærkere gældende der.

Korrektionstiden τ_0 for 1. Række findes, idet $\vartheta_2 - \vartheta_1 = 0{,}13$ sek og $\lambda = 0{,}0821$. Man faar $\tau_0 = 0{,}03$ sek. Den første Passage gennem Ligevægtsstillingen har altsaa fundet Sted Kl. $2^h\ 21^m\ 6{,}66^s$. For 2. Række haves $\vartheta_2 - \vartheta_1 = 0{,}35$, som giver $\tau_0 = 0{,}08$; første Passage gennem Ligevægtsstillingen har funden Sted Kl. $2^h\ 24^m\ 24{,}59^s$. Man har derfor til Bestemmelse af Svingningstiden

$$N\vartheta = K_2 - K_1 = 197{,}93 \text{ sek},$$

hvor N er et helt Tal. Den foreløbige Værdi for ϑ faaes lig 11,00 sek som Middeltallet af de 4 Intervaller; 2. Række giver 10,98 sek. Det fremgaar heraf med fuldkommen Sikkerhed, at N maa være lig 18, saa at

$$\vartheta = \frac{197{,}96}{18} = 10{,}996 \text{ sek}.$$

Her er kun benyttet den første Iagttagelse i hver Række. Medtoges de andre, vilde der kunne opnaaes endnu større Nøjagtighed.

PENDULSVINGNINGER. Er et Pendul fjærnet en Vinkel φ fra sin Ligevægtsstilling, bliver det paavirket af et Moment $H = mga \sin \varphi$, hvor m er Pendulets Masse, g Faldakcelerationen og a Tyngdepunktets Afstand fra den vandrette Axe. Naar Udsvinget α er tilstrækkelig lille, kan man, for Svingninger i lufttomt Rum, benytte Rækkeudviklingen

$$\vartheta = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left(1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 \sin^4 \frac{\alpha}{2} + \ldots\right)$$

til Bestemmelse af Tiden for en Svingning fra den ene Yderstilling til den anden. Hvor mange Led man maa tage med afhænger af Fjærningsvinklens Størrelse og af den Nøjagtighed, hvormed man iagttager Svingningstiden. Et Pendul der for uendelig smaa Svingninger er et Sekundpendul, vil ved 1 Grads Udsving bruge 1,00002 sek og ved 5 Graders 1,00048 sek til en Svingning. Kan man nøjes med første Led i Rækken ere Pendulsvingningerne at regne for ligetidige, svarende til, at Momentet i saa Fald kan sættes lig $mga\varphi$, altsaa proportionalt med Fjærningsvinklen.

Anvendelsen af Pendulet i Uret er omtalt under Tidsmaaling. Det har endvidere en vigtig Anvendelse ved Tyngdemaalingen. Ved denne gælder det om, saavidt mulig, at frigøre Pendulet for andre Paavirkninger end Tyngden; derfor lader man det bæres af en Knivsæg (ikke af et Staalbaand som i Uret), og man overlader det til sig selv efter at have sat det i Gang. Heraf følger, at Udsvingene stadig tage af, og at Tiden, i hvilken de kunne iagttages, bliver begrænset. For uendelig smaa Svingninger har man

$$\vartheta = \pi \sqrt{\frac{l}{g}},$$

hvor l er den reducerede Pendullængde. For at finde g maa man maale Svingningstiden ϑ og den reducerede Pendullængde l; denne har man i Reversionspendulet som Afstanden mellem to mod hinanden vendte parallele Knivsægge, en Afstand, der kan findes med stor procentisk Nøjagtighed, naar man kender Temperaturen tilstrækkelig nøje.

Af Hensyn til Svingningstidens Bestemmelse vælger man, saavidt Forholdene tillade det, en Længde for Forsøgspendulet, som bringer dets Svingninger i nær Overensstemmelse med Sekundpendulets i Uret. Vi kunne derfor gaa ud fra, at dets Svingningstid ϑ er nær ved 1 eller $^1/_2$ sek. Vi sætte $\vartheta = 1 + \tau$ hvor τ, er en lille Brøk, der tilnærmelsesvis kan skrives som $^1/_n$, idet n er et stort helt Tal. Svinge begge Penduler, og passere de i et givet Øjeblik samtidig deres Ligevægtsstillinger, da vil Forsøgspendulet under hver følgende Svingning blive noget tilbage for Urpendulet, og dets Tilbagebliven vil i Løbet af n Svingninger løbe op til meget nær en hel Svingning; Urpendulet har gjort $n + 1$ Svingninger i denne Tid; Pendulerne ville nu atter paa det nærmeste passere deres Ligevægtsstillinger samtidig; man siger der er indtruffen en *Koincidens* eller et Sammentræf. Er $\vartheta = 1 - \tau$, vil Forsøgspendulet have vundet en hel Svingning, naar Urpendulet har gjort $n - 1$ Svingninger. Iagttages Klokkeslettene for to efter hinanden følgende Koincidenser, og findes derved den mellemliggende Tid at indeholde N_1 sek, da vil Forsøgspendulet i den samme Tid tilnærmelsesvis have udført $N_1 \pm 1$ Svingninger. Af en saadan Iagttagelse faar man

$$\vartheta_1 = \frac{N_1}{N_1 \pm 1} \text{ sek}$$

som en første Værdi for Svingningstiden. Hvilket Fortegn der skal bruges, bestemmes af, om Forsøgspendulet gaar hurtigst eller langsomst.

I denne første Værdi for ϑ indgaar der Fejl, fordi Koincidenserne ikke ere absolute; det vil være et sjældent Træf, at de to Penduler gaa nøjagtig samtidig gennem deres Ligevægtstilling. Værdien ϑ_1 bruges nu til at forudberegne de omtrentlige Tidspunkter for de følgende Koincidenser; man lader Pendulerne svinge videre f. Ex. $^1/_2$ Time, og noget før den $(p + 1)^{te}$ Koincidens skal indtræffe iagttager man Pendulerne og bestemmer Klokkeslettet for

Koincidensen; indtræffer den N_p sek efter den første, vil Svingningstiden være bestemt ved

$$\vartheta_p = \frac{N_p}{N_p \pm p} \text{ sek.}$$

Her kan N_p regnes at være bestemt med omtrent samme absolute Nøjagtighed som N_1, og da N_p paa det nærmeste er p Gange saa stort et Tal som N_1, kan det indsees at Nøjagtigheden stiger omtrent proportionalt med Iagttagelsestiden. Fuldt ud proportional er den ikke, fordi den Omstændighed, at Forsøgspendulets Svingninger blive mindre, dets Bevægelse altsaa langsommere, gør Bestemmelsen af Fasen mindre sikker. Ligesom det før er omtalt for andre Svingninger vælger man ogsaa her at iagttage det Tidspunkt, da Pendulet passerer sin Ligevægtsstilling, fordi det der har sin største Hastighed, og fordi det i den Fase altid har samme Stilling uanset Udsvingets Størrelse.

Man forøger Nøjagtigheden, naar man saavel ved Begyndelsen som ved Slutningen iagttager Klokkeslettene for flere efter hverandre følgende Koincidenser, idet hvert Par af disse giver en Værdi for ϑ. Medens Tidsbestemmelsens Nøjagtighed forøges ved en lang Iagttagelsestid, kan en saadan dog medføre Usikkerhed i anden Henseende, fordi Udsigten til Forandringer i Luftens Tryk og Temperatur voxer med Tiden.

Jo mindre Forskellen τ mellem Urpendulets og Forsøgspendulets Svingningstid er, desto færre Koincidenser vil der fremkomme i given Tid, men des nærmere ville de paa den anden Side komme det absolute Sammentræf, fordi den Faseforskel, hver Svingning fører med sig, aftager med τ. Er τ forholdsvis stor, faar man mange grovere, og naar τ er lille, faar man færre finere Koincidenser. Det sidste vil være at foretrække i Henhold til, at faa gode Iagttagelser er at foretrække for mange grovere. Forskellen i Svingningstid maa dog være saa stor, at der i den ved Udsvingets Aftagen begrænsede Tid bliver Koincidenser nok til at arbejde efter den ovenfor angivne Fremgangsmaade.

Faar man ved Bestemmelse af Svingningstiden for et Pendul $N_p = 1800$ og $p = 6$, bliver Svingningstiden $\vartheta = 1800/1806$. Er N_p bestemt med en Fejl paa $^1/_5$ sek, vil det medføre en Fejl paa omtr. $4 \cdot 10^{-7}$ sek i Svingningstiden.

Koincidenserne kunne iagttages ved at anbringe Forsøgspendulet foran Urpendulet saaledes, at man kan se begge Penduler

samtidig i en Kikkert. Herved bliver man dog ikke frit stillet med Hensyn til de to Instrumenters Opstilling; i saa Henseende er det bedre at iagttage Forsøgspendulets forskellige Stillinger ved at iagttage de forskellige Retninger, i hvilke et paa Pendulet anbragt Spejl kaster en Lysstraale tilbage. Fig. 44 viser en Maade paa hvilken dette kan ske. P_1 forestiller Urpendulet, P_2 Forsøgspendulet forsynede hvert med sit Spejl, der staar lodret og vinkelret paa Svingningsplanet. Fra en Lysgiver sendes Lys mod Urpendulets Spejl; derfra kastes det hen mod det andet Spejl; men paa Vejen er der anbragt en Skærm S, hvori der findes en Aabning i en saadan Højde, at Lyset kun naar frem til det andet Pendul, naar det første er i sin Ligevægtsstilling. Fra det andet Spejl kastes Lyset hen mod en Maalestok M.

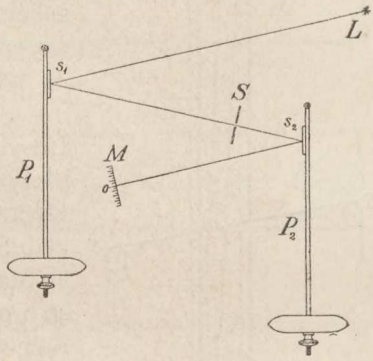


Fig. 44

For hver Svingning Urpendulet gør, sender det et kortvarigt Glimt ind mod Forsøgspendulets Spejl og derfra mod Maalestokken. Havde de to Penduler nøjagtig samme Svingningstid, vilde Lyset altid falde paa samme Sted af Maalestokken; men er der Forskel, vil Stedet uafladelig flytte sig efter den Fase P_2 har, naar P_1 er i sin Ligevægtsstilling. Falder Lyset ved o, naar begge Penduler er i deres Ligevægtsstillinger, vil Glimtets Indtræffen dersteds betegne Koincidensen.

Koincidensmetoden kan ikke bruges, naar Forsøgspendulets Svingningstid afviger meget fra Urpendulets hele, halve eller dobbelte Svingningstid, fordi Koincidenserne da blive for grove; den kan, som før nævnt, heller ikke bruges, naar der er meget nær Overensstemmelse mellem Tiderne, da der i saa Fald bliver for faa Koincidenser i Iagttagelsestiden. Man maa i saa Tilfælde benytte den S. 90 omtalte almindelige Fremgangsmaade, at maale ved Ur og Kronograf Tiden for et Antal af Svingninger. Idet man paa Kronografbaandet afmærker det Moment, da man ser Pendulet begynde sin første Svingning, og dernæst det Moment, da man ser det afslutte den sidste Svingning, bliver Iagttagelsen afhængig af Iagttagerens personlige Funktion (se S. 72); det samme gælder forøvrigt ogsaa Maaling ved Koincidensmetoden. Jeg har udarbejdet en Metode, hvorved Pendulet selv afmærker paa Kro-

nografbaandet de to Momenter med stor Sikkerhed. Det sker paa følgende Maade:

I Højde med Pendulets Stødcentrum er der udspændt en vandret Stræng SS, som ved Stilleskruer kan forskydes saaledes, at den uden at faa noget Tryk derfra netop rører Pendulet, naar dette hænger i Ro i sin Ligevægtsstilling. Strængen er parallel med Pendulets Omdrejningsaxe; denne dannes af en Staalkniv, som hviler med sin Æg mod et Staalunderlag. Dette og Staalstrængen er sammen med den ene Elektromagnetledning i Kronografen indskudt i et Elements Kredsløb; Kronografens anden Ledning modtager Sekundmærker saaledes som det er vist i Fig. 36 S. 71 og i Fig. 46a og 46b.

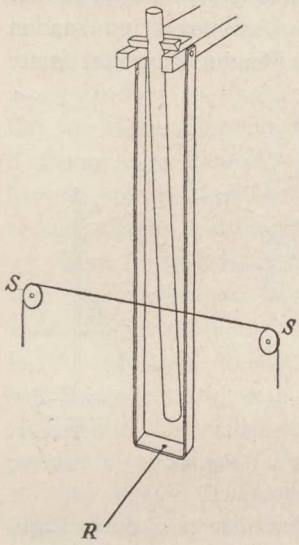


Fig. 45

Svinger Pendulet, vil det efter hvert Udsving støde mod Strængen og kastes tilbage af denne, idet det hver Gang slutter Kontakt i den korte Tid, da det rører ved Strængen. Det vil herved afsætte et Mærke, en lille Bølge, p i Fig. 46a og 46b paa Kronografbaandet for hvert Stød. Bølgens Længde svarer til den Tid, i hvilken Pendulet under Stødet rører ved Strængen. Det er nu indrettet saaledes, at man ved at trække i en Snor R kan fjærne Strængen noget fra sin Ligevægtsstilling; sker det mens Pendulet er i Udsving fra Strængen, vil Pendulet være overladt til sig selv og saaledes udføre frie, sædvanlige Pendulsvingninger. Naar det fornødne Antal af disse er udført, giver man atter Strængen fri, ligeledes mens Pendulet er i Udsving fra den; de frie Svingninger ville da afsluttes ved det første Stød mod Strængen.

I Fig. 46a og 46b er vist Resultatet af en saadan Pendulmaaling. De store Bølger er afsatte hvert Sekund af Urpendulet. Til det med x i Fig. 46a betegnede Tidspunkt er Pendulet svinget ud fra sin Ligevægtsstilling og har dermed begyndt sine frie Svingninger, idet Strængen er bleven fjærnet. Til det med y i Fig. 46b betegnede Tidspunkt har Pendulet afsluttet sin sidste frie Svingning ved at støde mod Strængen, der kort iforvejen er bleven gjort fri. Til begge Tidspunkter har Pendulet været i sin Lige-

vægtsstilling; det har følgelig udført et helt (og ulige) Antal Svingninger i det mellem x og y forløbne Tidsrum. I det ved Fig. 46 fremstillede Forsøg blev der udført 6259 Svingninger i 3118,296 sek.

Pendulets Svingningstid afhænger, som omtalt S. 68 af Udsvingets Størrelse, af Temperaturen og af Luftens Vægtfylde. Man søger dets Svingningstid svarende til uendelig smaa Udsving, til $0^0 C$ eller en anden given Temperatur, og til det tomme Rum eller til Luft af given Vægtfylde. Reduktionen til uendelig smaa Ud-

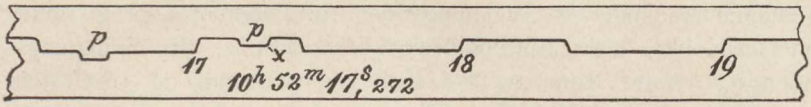


Fig. 46a

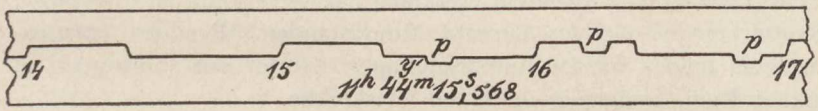


Fig. 46b

sving sker ved den S. 94 givne Række, som med tilstrækkelig Nøjagtighed kan skrives

$$\vartheta_0 = \vartheta\left(1 - \frac{\alpha^2}{16}\right),$$

hvor ϑ_0 er Svingningstiden svarende til Udsvinget $\alpha = o$; α forudsættes givet i Buemaal.

Temperaturens Indflydelse skyldes Pendulets Længdeudvidelse; da Længden i Udtrykket for Svingningstiden staar under Kvadratrodtegnet, bliver Temperaturkoefficienten for Svingningstiden det halve af Udvidelseskoefficienten; den første er derfor given, naar man kender den sidste, men i Reglen vil man bestemme Temperaturkoefficienten ved at maale Svingningstiden ved forskellige konstant holdte Temperaturer. Det har nogen Vanskelighed at faa Pendulets Temperatur sikkert bestemt, fordi Luften, hvori det svinger, i Reglen vil have forskellig Temperatur i forskellige Højder, og fordi dets Temperatur kan paavirkes ved Udstraaling fra fjærnere Legemer. Det bedste er vistnok at anbringe Termometerbeholderen i en Udboring i et Legeme, der er dannet i Lighed med Pendulet, hvad Form og Materiale angaar, og som anbringes i dets Nærhed.

Overfor denne Vanskelighed er man gunstigst stillet med et kort Pendul, f. Ex. Halvsekundpendulet, hvis reducerede Længde er omtr. $^1/_4$ m, medens Sekundpendulet er omtr. 1 m langt. $^1/_{10}$ Grads Fejl i Temperaturbestemmelsen vil for et Pendul af Messing give en Fejl paa omtrent 1 Milliontedel af Svingningstiden.

Luftens Indvirkning paa Værdien af ϑ skyldes dels Opdriften, dels Luftmodstanden; mens den første Virkning kan beregnes (jvfr. S. 48), er det ikke muligt for den sidstes Vedkommende. Man bestemmer derfor den samlede Virkning af Luften ved at foretage gentagne Maalinger af Svingningstiden for Pendulet anbragt under en Glasklokke, hvor Luftens Vægtfylde varieres. Er Svingningstiden ϑ_0 i tomt Rum, og ϑ i Luft ved 760 mm og 0^0 C, kan man sætte $\vartheta_0 = \vartheta(1 - \beta)$. For et af den danske Gradmaaling benyttet Pendul blev Koefficienten β funden at være omtrent 0,000111. Opdriftens Virkning vil være omtrent 0,000077; Restvirkningen skyldes altsaa Luftmodstanden. Pendulet maa naturligvis holdes frit for Luftstrømninger, hvorfor det anbringes i et lukket Rum, sædvanlig under en Glasklokke.

Pendulmaalinger udføres særlig af Geodæter til Undersøgelse af Tyngdekraftens Størrelse. Med en tilstrækkelig nøjagtig Metode til Sammenligning mellem to Pendulers Svingningstider kan man bruge et om en Knivsæg frit svingende Pendul til Bestemmelse af et Urs Gang, naar man først een Gang for alle har maalt Pendulets Svingningstid og undersøgt de Forhold, der kunne have Indflydelse paa dennes Størrelse.

LYDSVINGNINGER. At en Tonegivers Lydsvingninger er ligetidige, Svingningstiden altsaa uafhængig af Udsvingets Størrelse, sluttes af, at Tonen beholder uforandret Højde, mens dens Styrke efterhaanden tager af. Ved Lydbevægelsen regner man i Reglen med hele Svingninger; man angiver sædvanlig Svingningstallet pr. Sekund, $N = 1/T$, hvor T er Svingningstiden.

Lydsvingningerne hidrøre fra indbyrdes Forskydninger indenfor Elasticitetsgrænsen af det svingende Legemes enkelte Dele. Ligetidigheden er betinget af, at den Kraft, der opstaar ved en saadan Forskydning, er proportional med Størrelsen af den vedkommende Massedels Fjærnelse fra sin Ligevægtsstilling.

Mens man har forholdsvis simple Metoder til Sammenligning af to Toners Svingningstal, opstaar der Vanskeligheder ved den absolute Bestemmelse; denne kan siges at bestaa i en Sammen-

ligning mellem Tonegiverens og Sekundpendulets Svingningstider. Vanskeligheden ligger i, at den sidste Tid er mange Gange større end den første.

Til den *absolute Tonemaaling* bruger man sædvanlig et roterende Legeme som Mellemled mellem Tonegiveren og Pendulet. Man kan saaledes lade Tonegiveren, f. Ex. en Stemmegaffel, skrive en Bølgelinie paa Overfladen af en Valse (jvfr. S. 78), paa hvilken man samtidig afsætter Sekundmærker ved et Pendul. Fører man en ret Linie fra hvert Sekundmærke parallelt med Axen hen til Bølgelinien, faar man paa denne Linie afskaaren det Antal Bølger, der ere skrevne i 1 sek. og har dermed Svingningstallet. Er Svingningstallet f. Ex. 300, og gør Valsen, med en Omkreds lig 600 mm, 1 Omløb i hvert sek, bliver hver Bølge 2 mm lang; man kan følgelig faa det udførte Antal Lydsvingninger godt bestemt; men Sekundmærkerne kan man vanskelig faa afsat med en tilsvarende Nøjagtighed. Endvidere er det ikke den frit svingende Gaffels Svingningstal man finder, da Arbejdet som Opskrivningen af Bølgelinien kræver har en ukendt og næppe helt ringe Indflydelse paa Svingningstiden.

Man kan finde Forholdet mellem et Omløbstal og et Svingningstal ved den *stroboskopiske* Fremgangsmaade. En Skive forsynet med en Krans af Huller, der ligge alle lige langt fra Axen og i lige indbyrdes Afstande, anbringes bevægelig om sin Axe. Stemmegaflen, hvis Svingningstal søges, anbringes bagved Skiven, saaledes at man kan se den frie Ende af en af Grenene gennem Hullerne, naar disse ved Rotationen føres forbi; Svingningsplanet er parallelt med Skiven. Naar denne roterer netop med en saadan Hastighed, at et Hul foran Stemmegaflen erstattes med det nærmest efterfølgende Hul i en Tid, der er lig Svingningstiden, da vil man altid se Gaflen i samme Fase, og det vil derfor se ud, som om den var i Ro. Er der en lille Afvigelse fra den rigtige Hastighed, ser det ud, som om Gaflen udførte langsomme Svingninger; gaar der $n + 1$ Huller forbi Gaflen, mens denne gør n Svingninger, vil den Stilling, hvori man ser Gaflen, være forskudt lidt for hvert Hul; først naar der er passeret $n + 1$ Huller, vil Fasen være den samme som før; i den Tid, altsaa i Tiden nT, vil Gaflen synes at have gjort 1 Svingning. For at skønne over, hvorledes dette vil stille sig i Virkeligheden, ville vi antage, at Svingningstiden $T = {}^1/_{300}$ sek, at Skiven gør 20 Omløb i Sekundet, og at den har 15 Huller. I det Tilfælde vil Gaflen synes at være i Ro; men

afviger Hastigheden 1 Procent fra den rette Værdi, og er den for stor, vil der i Tiden $300\,T = 1$ sek gaa 303 Huller forbi; Gaflen vil altsaa synes at udføre 3 Svingninger i sek, naar den ses gennem Skivens Krans af Huller.

For at den stroboskopiske Metode skal kunne give paalidelige Resultater, maa man enten kunne holde Hastigheden konstant med en Nøjagtighed, som svarer til den, hvormed Overensstemmelsen mellem Omløbstal og Svingningstal kan iagttages, og i en Tid der er lang nok til at man kan faa Omløbstallet bestemt ved Tælleværk og Ur, eller ogsaa maa man have Middel til at maale Hastigheden strax, naar Overensstemmelsen er tilstede.

Den hurtige Rotation kan bringes i Forbindelse med Svingningstallet for en Tone paa den Maade, at *Tonen frembringes ved Rotationen* med et Svingningstal, som er proportionalt med og kan beregnes af Omløbstallet; dette er saaledes Tilfældet ved Savarts Tandhjul og ved Sirenen. Betyder n_1 Omløbstallet pr. sek og n_2 Antallet af Tænder i Tandhjulet eller af Hullerne i Sirenens Skive, bliver Svingningstallet

$$N = n_1 n_2.$$

Skal en foreliggende Tonegivers Svingningstal bestemmes ved Sirenen, sker det ved at man varierer dens Omløbstal, indtil den giver en Tone saa nær af samme Højde som Tonegiverens, at man kan sammenligne deres Svingningstal ved Ørets Hjælp. Det gælder da om, naar det er naaet, at maale Omløbshastigheden.

I Tonehjulet (S. 81) har man en Sammenhæng mellem Svingningstal og Omløbstal af lignende Art som i Uret. Naar Hjulet gaar med det til Stemmegaflens Svingningstal N svarende Omløbstal n_1, er der vel Mulighed for Forandringer i Hastigheden væsenlig hidrørende fra, at Stemmegaflens Svingningstal paavirkes af Kontaktfjedrenes Tilstand og Stilling, men er der i Løbet af en given Tid udført r Omløb, maa der samtidig være udført

$$R = rn_2$$

Svingninger, hvor n_2 er Antallet af Tænder i Hjulet. Hvis man derfor forbinder Tonehjulet med et Tælleværk, vil man faa en virkelig Optælling af de i given Tid udførte Lydsvingninger, naar man aflæser Tælleværkets Stand til to givne Klokkeslet. Da Tonehjulet kan holdes gaaende i lang Tid, kan saavel Antallet af Svingninger som Tiden blive nøjagtig bestemte.

Ad indirekte Vej kan man faa en tilnærmet Bestemmelse af Svingningstallet ved at maale *Lydens Bølgelængde* l under Forudsætning af, at man kender Lydhastigheden V. Man har nemlig, naar T er Svingningstiden,

$$l = VT, \quad N = \frac{V}{l}.$$

For Luftens Vedkommende har man $V = 333\sqrt{1 + at}$, hvor a er Luftens Udvidelseskoefficient, t dens Temperatur. Bølgelængden i Luften for en Stemmegaffels Tone kan maales grovt ved at holde den svingende Gaffel ud for Mundingen af et ved den ene Ende aabent Rør. Er Røret ved den anden Ende lukket ved et tæt sluttende Stempel eller ved Vand, hvis Højde man kan variere, kan man faa en kraftig Lyd at høre ved at afpasse Længden af Luftsøjlen i Røret efter Gaflen (Resonans). Den mindste Længde, der giver Resonans, er omtrent lig $^1/_4$ Bølgelængde; den er ikke nøjagtig $^1/_4 l$, da den staaende Bølge fortsætter sig noget ud over Mundingen. Derimod vil det være den rigtige Bølgelængde man faar med at gøre, naar man forlænger Luftsøjlen, indtil der atter kommer Resonans; Forlængelsen vil være $^1/_2$ Bølgelængde. Her som i Reglen ellers, hvor man indstiller efter et Maximum, kan man ikke vente nogen stor Nøjagtighed, fordi Variationen i Nærheden af et Maximum sædvanlig er langsom.

I et vandret Rør, hvor Luften holdes i staaende Svingninger, kan man finde Bølgelængden og dermed Svingningstallet, naar man i Forvejen har indbragt et let Pulver som Hexemel; dette vil nemlig samle sig i smaa Bunker med lige Mellemrum omkring de staaende Bølgers Knuder, hvor Luftdelen er i Ro (Kundts Støvfigurer). En anden Fremgangsmaade (Quincke) er vist i Fig. 47. Man frembringer staaende Svingninger ved at holde en Lydgiver nær ved Mundingen af et ved den anden Ende lukket Rør; heri indfører man et andet, snævert Rør, Hørerøret, der er aabent ved begge Ender, og fra hvilket en Kautsjukslange fører til Øret. Føres Hørerøret frem eller tilbage, vil man høre Tonen med Maximum af Styrke naar Mundingen er i en Knude, og med Minimum naar den er midt imellem to Knuder; man indstiller bedst

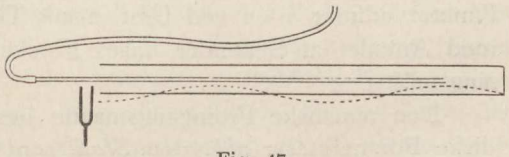


Fig. 47

efter Minimet. Afstanden mellem to Steder med Minimum af Lydstyrke vil være et helt Antal af halve Bølgelængder.

I en udspændt Streng forplante Tværsvingninger sig med en Hastighed $V = \sqrt{P/m}$, hvor P er Stramningen og m Massen i 1 cm af Strængen, forudsat at dennes Modstand mod at bøjes er forsvindende mod den fra P hidrørende bevægende Kraft. Svinger Strængen som Helhed, er dens Længde L lig $^1/_2$ Bølgelængde, og følgelig bliver

$$N = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{P}{m}}.$$

Strammer man Strængen over en let bevægelig Trisse ved en bekendt Vægt, har man ved Vejning fundet m, og maaler man Længden, kan man altsaa beregne Svingningstallet (Monokord).

Sammenligning mellem Svingningstallene for to Lydgivere kan foregaa ad optisk eller ad akustisk Vej. Den før omtalte stroboskopiske Fremgangsmaade kan bruges, naar det indrettes saaledes, at et Punkt af den ene Lydgiver skiftevis gøres synligt og usynligt i Takt med den anden Lydgivers Svingninger, idet det ved Spejl eller paa anden Maade indrettes saaledes, at der for hver Svingning af den anden Lydgiver sendes et kortvarigt Blink mod Punktet; det er samme Fremgangsmaade, som er vist i Fig. 44. Er Svingningstallene ens, vil Punktet synes at staa stille; i andet Fald vil det synes at svinge med et Svingningstal, som er Forskellen mellem de to Lydgiveres Svingningstal. Naar Forskellen er lille, kan man tælle det Antal tilsyneladende Svingninger, som Punktet udfører i en ved Uret maalt Tid. Divideres dette Antal med Antallet af Sekunder, faaes Forskellen mellem de to Svingningstal.

Den akustiske Fremgangsmaade bestaar i at tælle de periodiske Forstærkelser af Lyden, *Stød*, som opstaar, naar to Toner af nær samme Højde klinge samtidig. I Tiden mellem to Stød har den ene Gaffel udført een Svingning mere end den anden. Tæller man f. Ex. 146 Stød i 60,6 sek, er det ene Svingningstal 2,41 større end det andet. Er Tiden bestemt med en Nøjagtighed af $^1/_{10}$ sek, kan man stole paa 2. Decimal i Differensen. Denne Nøjagtighed kan tilnærmelsesvis opnaaes ved at bruge Kronograf til Tidsmaalingen. Man hører ogsaa Stød ved to samtidige Toner, for hvilke Forholdet mellem Svingningstallene er nær ved 2.

Exempel paa en Bestemmelse af et Tonesvingningstal med praktisk Maal for Øje. Som en saadan skal omtales Bestemmelsen af Svingningstallet for en Normalstemmegaffel, udført af Leman i det bekendte fysiske Undersøgelseskammer »die Physikalisch-Technische Reichsanstalt« i Charlottenburg ved Berlin. Gaflen var leveret af Koenig i Paris med Angivelse af at den udførte 435 hele Svingninger i sek ved 20° C. Til Undersøgelsen brugtes Tonehjulet (S. 81), og Opgaven var ved Tælning af Stød at sammenligne de Antal af samtidige Svingninger, der udførtes i given Tid, henholdsvis af den Koenigske Gaffel og af den til Tonehjulet hørende Gaffel. Idet den sidstes Antal kunde aflæses paa Tonehjulets Tælleværk, blev Antallet af den førstes Svingninger bekendt.

Til Undersøgelsen brugtes en Kronograf (S. 69), paa hvis Papirbaand (Fig. 48) et Ur afsatte Sekundmærker (Prikker) ved en Elektromagnet og tilhørende Vippe med Anker og Skrivestift. Samme Elektromagnet var i Forbindelse med en Strømslutter paa

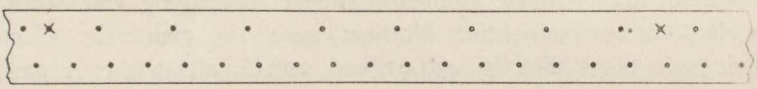


Fig. 48

Tonehjulet, saaledes at Vippen foruden Sekundmærkerne tillige afsatte et Mærke paa Baandet for hvert Omløb; Omløbstiden var omtrent 8 sek. En anden Elektromagnet med Vippe blev benyttet af den, der talte Stødene, idet han ved en Strømslutter i Elektromagnetens Kredsløb kunde afsætte et Mærke paa Papirbaandet for hvert Stød, han hørte. Forsøget blev udført saaledes, at Tonehjul og Kronograf blev sat i Gang. Efterat Normalgaflen var bleven anslaaet, hørte Iagttageren efter Stødene og trykkede Kronografens Strømslutter ned for hvert Stød, han hørte. Herved blev der altsaa afsat 3 Sæt Mærker paa Papirbaandet, nemlig Sekundmærkerne og Mærkerne for Tonehjulets Omløbstal i een Række og for Stødene i en anden Række. I Fig. 48 sees Sekundmærkerne for oven; de to med × mærkede Prikker svare til Begyndelse og Slutning af et Tonehjulsomløb; den nederste Række Prikker svarer til Stødene. Ved Udmaaling paa Baandet kunde man finde Tiden for et givet Antal Omløb af Tonehjulet og Antallet af de samtidig udførte Stød. Herved findes først det Antal Svingninger, Hjælpegaflen har udført, og da Normalgaflen har gjort 1 Svingning mer eller mindre end Hjælpegaflen for hvert Stød, der er hørt, findes

dernæst Antallet af Normalgaflens Svingninger ved at danne Summen eller Differensen af Antallet af Hjælpegaflens Svingninger og Antallet af Stødene. Divideres det saaledes fundne Tal med det optalte Antal sek, findes Normalgaflens Svingningstal pr. sek.

Tonehjulet gaar, som nævnt S. 102, ikke fuldstændig jævnt; da man uafhængig deraf faar det samlede Antal Svingninger optalt, vilde dette være uden Betydning, hvis man kunde fortsætte Optællingen af Stødene tilstrækkelig længe; men disse kunne ikke høres tydelig nok længer end 30—40 sek, og man maatte høre dem i 10 Minuter for at faa en Nøjagtighed 0,01 i Svingningstallet. Af den Grund maa man anslaa Stemmegaflen flere Gange under Forsøget, og da Kontinuiteten saaledes brydes, faar Variationerne i Tonehjulets Hastighed Indflydelse paa Resultatet, og man maa søge at udjævne de derfra hidrørende Fejl ved Gentagelse af Forsøgene. Forøvrigt finder Leman, at en væsenlig Del af Maalefejlene hidrører fra Registreringen af Stødene; et Stød vil i sin Egenskab af et Lydmaximum ikke definere Momentet meget sikkert, og ved dets Iagttagelse kan et subjektivt Moment gøre sig gældende. Leman fandt Svingningstallet lig 434,97 ved 20^0 C, altsaa meget nær lig det opgivne.

En Stemmegaffels Svingningstal aftager, naar Temperaturen stiger; for den nævnte Gaffel af Staal fandt Leman Temperaturkoefficienten lig — 0,000108. Jeg har for en Gaffel af blødt Jærn funden Koefficienten — 0,00014.)

VI. Maaling af Kræfter og Momenter.

En Krafts Størrelse er given ved Produktet mg, hvor m er det af Kraften paavirkede Legemes Masse og g den Akceleration, som Kraften meddeler Legemet. Kendes Legemets Masse, finder man derfor Kraftens Størrelse ved at maale Akcelerationen i en Bevægelse, som betinges af Kraften. Dette er den *dynamiske* Kraftmaaling. Man faar kun sjælden med den simple Bevægelse efter en ret Linie at gøre, fordi en saadan sædvanlig ikke kan iagttages i saa lang en Tid, at en nøjagtig Undersøgelse kan finde Sted. Det er den periodiske Bevægelse, især den svingende Bevægelse af et om en fast Axe bevægeligt Legeme, man benytter; af den Grund er det ofte Kraftens Moment, man har med at gøre, istedenfor selve Kraften.

Da Undersøgelsen af en Ligevægtstilstand sædvanlig er en meget simplere Opgave end Undersøgelsen af en Bevægelse, maaler man i de fleste Tilfælde Kræfterne *statisk*, idet man bringer den søgte Kraft eller Moment i Ligevægt med en bekendt Kraft eller Moment, og finder den søgte Størrelse ud fra de givne Ligevægtsbetingelser. Som Exempel herpaa kan nævnes Vægtstangens Anvendelse til Maaling af den elektriske Tiltrækning i Thomsons absolute Elektrometer; man faar denne Kraft statisk maalt, idet den er lig med Tyngdens Virkning paa de Lodder, der holder den i Ligevægt, og hvis Masse er m. Denne Virkning kender man fra dynamiske Maalinger, idet man ved Pendulets Svingninger har funden Tyngdeakcelerationen g. Den elektriske Tiltrækning er følgelig lig mg. Er *cm*, *gr* og *sek* Enhederne for henholdsvis Længde, Masse og Tid, bliver Enheden for Hastighed 1 cm i 1 sek, og naar en saa stor Hastighed lægges til i 1 sek, har man Enhed for Akceleration. Enheden for Kraften kaldes en Dyn; det er den Kraft, som giver 1 gr en Akceleration lig 1.

Af Udtrykket $k = mg$, der definerer Kraften, kan det sees, hvilke Maalinger der maa udføres ved dynamisk Bestemmelse af en Kraft. Man skal for det første maale Legemets Masse, altsaa veje det. Da Akcelerationen er det Hastighedstillæg, som Kraften giver Legemet i hvert Sekund, faaes den ved at dividere en opnaaet Hastighed med Tiden, og da en Hastighed er en gennemløben Vejlængde divideret med en Tid, sees det, at Bestemmelsen af en Akceleration kræver Maaling af Længde og af Tid. Kraftens Bestemmelse kræver altsaa Maaling af Masse, Længde og Tid; er Enhederne for disse tre Størrelser givne, vil ogsaa det Tal, der tjener som Maal for Kraften, være bestemt. Som Exempel herpaa kan nævnes Bestemmelsen af den Kraft, hvormed Tyngden virker paa et givet Legeme; den kan udføres ved at man ophænger Legemet som et Pendul; har man maalt dettes reducerede *Længde* l i cm og *Tiden* t for dets Svingning i Sekunder, faar man Tyngdeakcelerationen ved Formlen $t = \pi\sqrt{\frac{l}{g}}$. Vejer man derpaa Legemet, faar man dets Masse m og Kraften k i Dyn

$$k = \pi^2 \frac{m\,l}{t^2}.$$

I ethvert Udtryk for en Kraft vil Grundenhederne indgaa paa samme Maade som i det ovenstaaende; Faktoren $m\,l/t^2$ kalder man Kraftens Dimension; ved den kan man finde, hvorledes Kraftenheden forandres, naar nogen af Grundenhederne forandres.

Kender man med Enhederne cm, gr, sek Tallet mg som Udtryk for Kraftens Størrelse, siges denne at være *absolut* bestemt. Man faar Kraftens absolute Værdi, naar man maaler den dynamisk, eller naar man ved statisk Maaling faar den sammenlignet med en anden Kraft, hvis absolute Værdi man kender.

De absolut bestemte Kræfter, som man bruger til Sammenligning med andre Kræfter, er i Hovedsagen Tyngdekraften, Jordmagnetismen og Fjederkraften. Tyngdekraften bestemmes absolut ved Pendulmaalinger. Jordmagnetismen bestemmes, ved at man lader en Magnet svinge under dens Paavirkning; S. 86 er omtalt en absolut Bestemmelse af en Fjederkraft. I mange Tilfælde har man ingen Interesse af at kende Kraftens absolute Størrelse, idet man kun har Brug for at kende Forholdet mellem de Værdier, Kraften faar i forskellige Tilfælde, eller Forholdet mellem den søgte Kraft og en anden Kraft, som man vilkaarlig har valgt til Enhed.

Dette er f. Ex. sædvanlig Tilfældet, hvor man maaler en eller anden Størrelse, f. Ex. et Lufttryk eller en elektrisk Strøm, ved den mekaniske Kraft, den kan fremkalde. I saa Fald kan man vælge en vilkaarlig Enhed, f. Ex. en tilfældig Vægt, en Fjederkraft, eller Jordmagnetismens Virkning paa en Magnet, som Enhed for Kraften; man faar da en *relativ* Bestemmelse af denne.

Man bestemmer ogsaa andre fysiske Størrelser end Kræfter absolut. Arbejdet er en Kraft gange en Vej; naar Kraften er absolut bestemt, og naar den Længdeenhed, hvori Vejen er given, er den samme som den, der indgaar i Kraften, faaes Arbejdet absolut bestemt. Enhver Størrelse, som levende Kraft, Varme og elektrisk Energi, der er ækvivalent med et Arbejde, maa ogsaa være ensbenævnt dermed; da der i Arbejdet kun indgaar Enhederne for Længde, Masse og Tid, kan der heller ikke indgaa andre i den med Arbejdet ækvivalente Størrelse; disse Enheder kaldes derfor *Grundenhederne.* Findes to ensartede Magnetpoler, hver med Mængde af Magnetisme μ i en indbyrdes Afstand r, og fjærnes de yderligere et lille Stykke δ fra hinanden, da udføre de magnetiske Kræfter et Arbejde $A = c\mu^2\delta/r^2$, hvor c er en Talfaktor. Hvis man nu vælger Enheden for Mængde af Magnetisme saaledes, at $c = 1$, da vil man altid ved Beregning af et magnetisk Arbejde faa dette frem af Regningen med dets absolute Værdi uden at besværes af Tilføjelsen af nogen Talfaktor; den derved givne Enhed for μ kaldes den absolute Enhed for Magnetisme.

Beregner man det Arbejde, der udføres naar en elektrisk Strøm bevæges i Forhold til en Magnet, faar man paa lignende Maade en absolut Enhed for Strømstyrke. Da Produktet af Strømstyrke, Spændingsforskel og Tid er ækvivalent med et Arbejde, faar man dernæst den absolute Enhed for Spændingsforskel. Udtrykket for Joules Lov giver den absolute Enhed for Ledningsmodstand og saaledes videre.

For hver absolut bestemt Størrelse kan man finde Udtryk, der vise, hvorledes Grundenhederne indgaa i Størrelsen, analogt med det der ovenfor er funden for Kraften. Et saadant Udtryk kaldes Størrelsens *Dimension.* Et Arbejde er en Kraft gange en Vej; $A = k \cdot l$. Da $k = m\,l/t^2$ bliver Arbejdets Dimension $A = m\,l^2/t^2$. Sætter man i ovenstaaende Udtryk for det magnetiske Arbejde $\delta = r = l$, faaes $A = m\,l^2/t^2 = \mu^2/l$, hvorved man faar Dimensionen for μ, idet $\mu = \sqrt{l^3 m/t^2}$. Naar man i en Beregning har med flere forskellig benævnte Størrelser at gøre, kan det have sin

Betydning at kende disses Dimensioner, idet det giver nogen Kontrol for Regningens Rigtighed, at to identisk ligestore Størrelser maa have samme Dimensioner. Kendskabet til en Størrelses Dimension kan ogsaa have praktisk Betydning ved Maalinger. Skal man f. Ex. finde et Legemes Inertiemoment ved Svingningsforsøg, maa man maale baade Længder, Masser og Tider; da imidlertid Inertiemomentets Dimension er $m\,l^2$, er Tidsenheden uden Betydning for det Tal, der tjener som Maal derfor; man kan heraf slutte, at man ikke behøver at kende Gangen for det Ur, man bruger ved Maalingen. Derimod maa man kende den Længde- og Vægtenhed, man bruger.

Ved at bruge det absolute Maalsystem har man den Fordel ved Beregninger, at man er fri for de Reduktionsfaktorer, der følge med vilkaarlig valgte Enheder; dette gælder dog kun saalænge man har med de Virkninger at gøre, som have ført til Enhederne. Saaledes kan man ikke uden Reduktionsfaktor beregne et Arbejde, der er betinget af elektrostatiske Virkninger, naar man anvender den af den elektriske Strøms Virkninger udledede Enhed for Elektricitetsmængde. Anvendt ved Maalinger har det absolute System den store Fordel, at det giver Resultater, som direkte kunne sammenlignes med Resultater fra Maalinger, der er udførte andetsteds eller til anden Tid, naar kun Grundenhederne ere de samme; som saadanne er man nu enig om at bruge *cm*, *gr* og *sek*. Den absolute Enhed for Kraft, 1 *Dyn*, er omtrent lig Vægten af 1 Milligram. Denne Vægt er nemlig lig $^1/_{1000} \times g$ Dyn, hvor g er omtr. 981.

SNOVÆGTEN. Naar Tyngdekraften anvendes til statisk Kraftmaaling, er det sædvanlig Ligevægten paa Vægtstangen, der paa forskellig Maade anvendes. Den ved Kraftmaaling hyppigst brugte Fjederkraft er den, der opstaar naar en Traad af elastisk Materiale snoes. Snovægten bestaar af et Legeme, der er hængt op i og bæres af den elastiske Traad. Man kan faa en absolut Maaling af vandrette Kræfter, der virke paa Legemet, naar man i Forvejen har foretaget en absolut Maaling af det Snomoment, som opstaar ved en given Snoning af Traaden. Dette sidste kan ske ved at undersøge de vandrette Svingninger, Legemet kan udføre under Paavirkning af Snomomentet. Da dette i hvert Fald meget nær er proportionalt med Fjærningsvinklen, blive Svingningerne ligetidige. Svingningstiden afhænger af Legemets Inertiemoment

I og af Snomomentsfaktoren H_1, d. v. s. det Tal, hvormed Snovinklen α, udtrykt i Buemaal, skal multipliceres for at give Momentet; Tiden ϑ for en enkelt udæmpet Svingning bliver ifølge S. 89

$$\vartheta = \pi \sqrt{\frac{I}{H_1}}$$

Kan man ved Udmaaling og Vejning af Legemet finde dets Inertiemoment, faar man Konstanten H_1 bestemt, naar man maaler Svingningstiden. Er Legemets Form ikke en saadan, at Inertiemomentet kan beregnes med tilstrækkelig Nøjagtighed efter en Udmaaling, maa man gøre to Svingningsforsøg, som ere forskellige derved, at man giver Inertiemomentet en bekendt Forøgelse, naar man gaar over fra det ene Forsøg til det andet. Dette kan ske ved, efter det første Forsøg, at lægge en nøjagtig afdrejet og udmaalt Ring ovenpaa Legemet, saaledes, at Ringens Axe falder sammen med Ophængningstraadens. Har Ringen rektangulært Tværsnit, maa man maale den ydre og indre Radius, r_1 og r_2; vejer Ringen M gr, vil den forøge Inertiemomentet med $I_1 = M\frac{r_1^2 + r_2^2}{2}$. En anden Maade, man kan bruge, bestaar i paa Legemet at anbringe to i vandret Retning forskydelige, lige store og ens dannede Vægte, m i Fig. 49; forud for det andet Forsøg forøger man hver af disse Vægtes Afstande fra Ophængningsaxen ligemeget. Forøges Afstandene fra a_1 til a_2, bliver Inertiemomentet forøget fra I til $I + I_1 = I + 2\,m\,(a_2^2 - a_1^2)$.

I de to Forsøg blive Svingningstiderne

$$\vartheta = \pi \sqrt{\frac{I}{H_1}} \text{ og } \vartheta_1 = \pi \sqrt{\frac{I + I_1}{H_1}}, \text{ hvoraf } \vartheta_1^2 - \vartheta^2 = \pi^2 \frac{I_1}{H_1}$$

saa at H_1 findes ved den bekjendte Inertiemomentforøgelse I_1 og ved de to maalte Svingningstider. Man maa ikke have I_1 lille i Sammenligning med I, thi i Differensen $\vartheta_1^2 - \vartheta^2$ har man Maalefejlene fra begge Tidsmaalingerne indgaaende, og de ville gøre sig des mere gældende, jo mindre denne Differens er. Man har $\vartheta_1^2 - \vartheta^2 = I_1 \pi^2 / H_1 = \vartheta^2 I_1 / I$; Differensen er altsaa proportional med Forholdet I_1 / I.

Naar man har funden Konstanten H_1, kan Traaden bruges til absolut Maaling af et Moment H, som udefra paavirker det ophængte Legeme, idet man maaler den Vinkel α, Traaden maa

snoes, for at Snomomentet skal holde Ligevægt mod det søgte Moment. $H = -H_1\varphi$ (jvfr. S. 89). Snovægtens Anvendelighed til Maaling af Momenter og derigennem af Kræfter er grundet paa 1) at Omdrejningsaxen af sig selv bliver lodret, hvorved Tyngdekraftens Indvirkning er udelukket, 2) at man kan opnaa en stor Følsomhed ved at bruge en lang og tynd Ophængningstraad. Begge disse Forhold gør Snovægten egnet til Undersøgelse af smaa Kræfter, som den almindelige Massetiltrækning og elektrisk Tiltrækning (Cavendish og Coulomb).

Relativ Kraftmaaling ved Snoning finder Sted i en stor Mængde Maaleapparater, især Apparater til Maaling af elektrisk Strøm og Spænding. Af Grunde som de S. 44 nævnte indretter man sig oftest paa at arbejde med smaa Snovinkler, saadanne som bekvemt kunne maales ved Spejlaflæsning; hertil opfordrer ogsaa den *elastiske Eftervirkning*, som kan være til stor Ulæmpe ved Snomomentmaalinger; den viser sig ved at det ophængte Legeme efter at have gjort et Udsving har en anden Ligevægtsstilling end den, det havde før Udsvinget. Man har funden, at Traade, trukne af smeltet Kvarts, have en ringe elastisk Eftervirkning; da de tillige have stor Bærekraft, anvendes de meget istedetfor Metaltraade.

Statisk Maaling af et Moment ved Snoning foregaar saaledes, at man først iagttager det ophængte Legemes Ligevægtsstilling uden Snoning, derefter indfører man Kraften og iagttager den af Kraftens Moment og Snomomentet betingede nye Ligevægtsstilling; herved finder man Snovinklen og ved den Momentet. Hvis man ikke anvender kraftig Dæmpning, finder man Ligevægtsstillingen ved at iagttage Udsvingene til begge Sider, saaledes som det er omtalt S. 57 for Vægtskaalens Vedkommende.

Snovægtens Følsomhed er betinget af Ophængningstraadens Længde og Tykkelse, idet det Moment, der maa anbringes paa det ophængte Legeme for at dreje det en Vinkel = 1, er omvendt proportionalt med Længden og ligefrem proportionalt med fjerde Potens af Tykkelsen; det gælder da især om at bruge den tyndest mulige Traad. En lang Traad medfører en mindre indbyrdes Forskydning af Delene ved en given Drejning af Legemet og dermed en mindre elastisk Eftervirkning end en kort Traad, men den længere Traad kræver i Reglen en nøjagtigere Indstilling af Maaleapparatet, af Hensyn til at det ophængte Legeme sædvanlig skal indtage en bestemt Stilling til sine Omgivelser.

Grænsen for hvor tynd Traad man kan bruge, bestemmes af, hvad den skal kunne bære. Af den Grund bestræber man sig for at gøre det ophængte Legeme saa let, som Omstændighederne tillade. Den store Følsomhed forlænger Svingningstiden ligesom ved Vægtskaalen, hvorfor man søger at gøre Inertiemomentet saa lille som mulig. Man kan give Snovægten en overordentlig stor Følsomhed.

Hvor vidt man kan naa i saa Henseende, vil fremgaa af følgende Exempel. Traaden i en Snovægt tænkes dannet af et Materiale med Elasticitetskoefficient $E = 20{,}000$ (Kraftenhed kg, Arealenhed mm^2). Traaden er 20 cm lang og $^1/_{100}$ mm tyk. I absolut Maal (cm, gr, sek) bliver Elasticitetskoefficienten E' omtrent lig 2.10^{12}, Længden $l = 20$, Radius i Traadens Tværsnit $r = 0{,}0005$. Til Bestemmelse af det Snomoment H, der opstaar naar denne Traad snoes en Vinkel α, haves

$$H = \frac{\pi E' r^4}{4\,(1 + k)\,l}\,\alpha,$$

hvor $k = {}^1/_4$. Indsættes de ovenstaaende Talværdier faaes

$$H = \frac{\pi}{800}\,\alpha \text{ Dyncm.}$$

Til at frembringe et Udslag paa 5″ skal der herefter et Moment mindre end 10^{-7} Dyncm. Man kan altsaa iagttage en Kraft mindre end en Timilliontedel af et Milligrams Vægt, naar den virker paa en Arm lig 1 cm i Snovægten. Var Traaden af Staal, vilde den kunne bære omtrent 2 gr. Omtrent med denne Følsomhed arbejdede Boys ved sine Undersøgelser over Massetiltrækning.

Temperaturforandringer har Indflydelse paa en Snovægts Visning, ved at de forandre Traadens Dimensioner og Elasticitetskonstanter. Temperaturforandringens Indflydelse maa findes ved at maale Svingningstiden ved forskellige Temperaturer; den samtidig indtrædende Forandring i Inertiemomentet kan findes ved Udvidelseskoefficienten for det ophængte Legeme.

Exempel paa en Kraftmaaling ved Snovægt. Den benyttede Snovægt, der er vist i Fig. 49, bestaar af en Messingskinne, som er ophængt mellem to lodrette, udspændte Metaltraade. Op-

gaven var at maale det Tryk, som en paa Skinnen fæstet, lodret plan Plade s modtager fra en Straale af Luft, der føres vinkelret mod Pladen gennem Røret r. For at finde Snokonstanten H_1 blev der udført Svingningsforsøg, idet Svingningstiden blev maalt, dels med de lige tunge Cylindre m i den viste Stilling, dels med Cylindrene flyttede tæt ind til Axen.

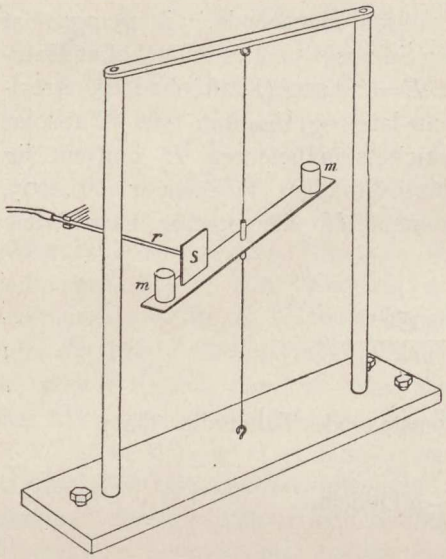


Fig. 49

Naar Luftstraalen rettes mod Pladen s, som er parallel med Skinnens Længderetning, drejes Skinnen ud af sin Ligevægtsstilling, en Vinkel α, som maa maales; det skete ved Spejlaflæsning, idet man lod s være et Spejl, eller man anbragte et saadant inde ved Axen. For at hindre Svingninger under denne Maaling, blev der til en fra Skinnen nedadgaaende Metaltraad fæstet en Plade (ikke vist i Figuren), som dyppede ned i et Kar med Olie. Er Vægtstangsarmen for Trykket l, bestemmes Trykket P ved

$$Pl = H_1 \alpha$$

De Størrelser, som fremgaa af de enkelte Maalinger, er følgende. Til Bestemmelse af H_1 haves Vægten m af hver af de to Cylindre, disses Axers Afstande a_1 og a_2 fra Omdrejningsaxen, og endelig de to Svingningstider ϑ og ϑ_1. Til Bestemmelse af P maales l som Afstanden til Omdrejningsaxen fra det Punkt af s, mod hvilket Rørets Axe er rettet; for at finde α maa man maale Afstanden A fra Spejlet til Aflæsningskikkertens Maalestok samt det Antal cm N, som dennes Spejlbillede i Kikkerten har flyttet sig ved Skinnens Drejning ud fra sin Ligevægtsstilling. Nedenfor findes angivet Resultaterne fra et af de udførte Forsøg:

$$m = 51{,}346 \text{ gr}, \quad a_2 - a_1 = 6{,}806 \text{ cm}, \quad a_2 + a_1 = 14{,}174 \text{ cm},$$
$$\vartheta = 0{,}9895 \text{ sek}, \quad \vartheta_1 = 1{,}6731 \text{ sek},$$
$$\text{hvoraf } H_1 = 53716.$$

$$l = 10{,}50 \text{ cm}, \quad A = 86{,}5 \text{ cm}, \quad N = 13{,}48 \text{ cm}$$

$$\text{hvoraf } \alpha = 0{,}0778, \quad P = \frac{H_1 \alpha}{l} = 398 \text{ Dyn.}$$

Trykket af en Straale, som føres vinkelret ind mod en stor, plan Flade, er lig Produktet af den i hvert sek udstrømmende Masse og de udstrømmende Deles Hastighed eller lig $q\rho v^2$, hvor q er Straalens Tværsnitsareal, ρ Fluidets Vægtfylde og v Hastigheden, saafremt Delenes Hastighedskomposant vinkelret paa Fladen efter Stødet er Nul. Ved ovennævnte Forsøg var det i hvert sek udstrømmende Luftvolumen $qv = 56 \text{ cm}^3$, $q = 0{,}0096 \text{ cm}^2$, $\rho = 0{,}00121$ og $v = 5830 \text{ cm/sek}$. Heraf findes $P = 395$ Dyn. Maalingen ved Snovægten har saaledes givet et med Teorien nogenlunde overensstemmende Resultat.

En Række Forsøg med atmosfærisk Luft af forskellige Hastigheder gav Trykket tilnærmelsesvis proportionalt med Hastighedens Kvadrat. Et Forsøg med Belysningsgas gav med en Hastighed $v = 8600$, et Tryk $P = 330$, mens Ligningen $P = q\rho v^2$, hvor ρ er 0,4 Gange den atmosfæriske Lufts Vægtfylde, gav Værdien 340 for Trykket.

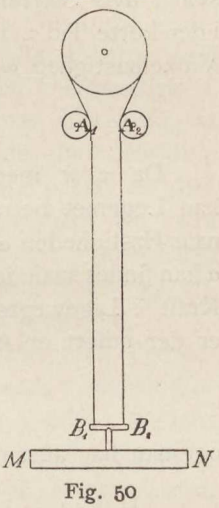


Fig. 50

Bifilarophængning. To Traade er støttede i samme Højde ved A_1 og A_2; de bære et Legeme MN, hvortil de er fæstede ved B_1 og B_2, saaledes at $B_1B_2 = A_1A_2 = d$ og $A_1B_1 = A_2B_2 = l$. Legemet vil være i stadig Ligevægt, naar Traadene er lodrette og parallele samt usnoede. Drejes Legemet ud fra sin Ligevægtsstilling om en lodret Axe gennem Tyngdepunktet, som antages at ligge midt imellem Traadenes Forlængelser, vil det løftes, og Traadene ville snoes. Forudsættes Snomomentet forsvindende, vil det Moment, som opstaar ved en lille Fjærningsvinkel α være

$$H = \frac{d^2}{4l} mg\alpha$$

Er f. Ex. $d = 0{,}2$ cm, $l = 30$ cm, $m = 1$ gr, $\alpha = 1/60$, bliver H omtrent lig 0,005 Dyncm. Omvendt kan det sluttes, at et Moment, som hidrører fra en Kraft paa $1/1000$ Dyn, der virker paa en 5 cm lang Arm, vil dreje Legemet en Vinkel, der omtrent er 1^0.

Bifilarophængningen bruges jævnlig istedetfor Torsionsophængningen, hvor Følsomheden ikke skal være meget stor; man kan indrette sig paa at kunne ændre Følsomheden ved at forandre Afstandene mellem de øverste Befæstelsespunkter. Ere de to Afstande A_1A_2 og B_1B_2 ikke ligestore, indgaar deres Produkt istedenfor d^2 i Udtrykket for Momentet.

Undersøgelse af kortvarige Kræfter. Naar en Kraft virker paa et Legeme, som kan udføre Svingninger af den S. 89 omtalte Art, og som forud er i Ro i sin Ligevægtsstilling, i en Tid der er meget kort i Forhold til Svingningstiden, vil Legemet gøre et Udsving, hvis Størrelse findes saaledes. Kraftens Moment kaldes H; i den korte Tid τ, i hvilken Momentet existerer, opnaar Legemet en Vinkelhastighed ω, idet

$$I d\omega = H dt, \quad I\omega = \int_0^\tau H dt$$

Da τ er meget lille imod Tiden ϑ for en enkelt Svingning, kan Legemet betragtes som endnu værende i sin Ligevægtsstilling, naar Hastigheden ω er opnaaet; det derefter følgende første Udsving α kan findes saaledes, naar Svingningerne er udæmpede. Den levende Kraft i Ligevægtsstillingen er $^1/_2 I\omega^2$. Naar Udsvinget er gjort, er der udført et Arbejde

$$\int_0^\alpha H_1 \varphi d\varphi = {}^1/_2 H_1 \alpha^2$$

og man har altsaa

$$^1/_2 I\omega^2 = {}^1/_2 H_1 \alpha^2, \quad I\omega = \alpha \sqrt{H_1 I} = \frac{\pi I}{\vartheta} \alpha = \frac{H_1 \vartheta}{\pi} \alpha$$

Man kan altsaa, ved at maale det første Udsving α, finde Størrelsen $I\omega$, Momentet af den Bevægelsesmængde, som den kortvarige Kraft har meddelt Legemet. Man kan, som omtalt S. 76, paa denne Maade finde Projektilhastigheder. Metoden anvendes i det ballistiske Galvanometer til Maaling af i kort Tid udladede Elektricitetsmængder.

VII. Maaling af Varmegrader.

KVÆGSØLVTERMOMETRET. Kvægsølvets Fortrin som Termometervædske skyldes først og fremmest den Omstændighed, at det ikke befugter Glasset; man er af den Grund sikker paa at have hele Vædskemængden under den Overflade, hvis Højde i Røret angiver Temperaturen; en anden vigtig Egenskab er den, at Kvægsølvet kan fremstilles meget rent, saa at man kan være sikker paa, at det har samme Udvidelseskoefficient i forskellige Termometre. Andre Fortrin er dets Uigennemsigtighed og udbuede Overflade, dets lave Frysepunkt og høje Kogepunkt.

Kvægsølvets Stigen i Termometerrøret ved en given Temperaturstigning er afhængig af saavel Kvægsølvets som Glassets Udvidelse, af Beholderens Størrelse og af Rørets Vidde. Medens man som nævnt kan gøre Regning paa at Kvægsølvets Rumfang er en entydig og altid den samme Funktion af Temperaturen, gælder det samme ikke om Glasset. Forskellige Glassorter have forskellig Udvidelseslov, og det samme maa forudsættes at gælde forskellige Prøver af samme Glassort, om man end i de senere Aar er naaet vidt i Retning af Ensartethed. Denne Omstændighed bevirker, at man ikke kan være sikker paa, at to Termometre vise nøjagtig ens udenfor de to Punkter, der ere bestemte ved Vandets Frysning og Kogning.

Den værste Egenskab ved Glasset som Materiale for Termometerbeholderen er dog den *termiske Eftervirkning*, den Omstændighed, at Beholderens Rumfang afhænger ikke alene af den øjeblikkelige Temperatur men ogsaa af de Temperaturer, den tidligere har haft, og af Tiden, der er forløben siden da. Eftervirkningen iagttages lettest og sikrest ved Vandets Frysepunkt paa Grund af denne Temperaturs Uforanderlighed. Man har tilvejebragt Glassorter (verre dur og Jenaglas), hvor Eftervirkningen kun

er ringe, men den er der dog. Vil man sikre sig imod den, maa man hurtig efter hver iagttagen Temperatur bestemme Frysepunktets Beliggenhed. Skal man foretage flere Iagttagelser efter hinanden i Nærheden af en given Temperatur, kan man sikre sig mod Forandring af Frysepunktet i den Tid, Maalingerne staar paa ved at opbevare Termometret i Mellemtiderne i et Rum, hvor Temperaturen holdes nær ved denne Temperatur, f. Ex. i Is, hvis man maaler Opløsningers Frysepunkt.

Beholders og Rørs Dimensioner og Form. I Termometre til videnskabeligt Brug giver man sædvanlig Beholderen Form af en langstrakt Cylinder, dels af Hensyn til den forholdsvis store Overflade, som derved frembydes for en hurtig Tilførsel af den til Temperaturstigningen nødvendige Varmemængde, dels af Hensyn til Muligheden af at føre Termometret frem i snævre Rum f. Ex. et Hul i en Prop, der skal lukke tæt om Termometerrøret. Rørkanalen har cirkelrundt eller fladt Gennemsnit (jvfr. S. 39); det sidste bruges hyppig og da af Hensyn til at gøre den smalle Kvægsølvtraad lettere synlig. Den cirkulære Form maa dog foretrækkes ved følsomme Termometre af Hensyn til at man maa vente en mere regelmæssig Haarrørsvirkning med den end med den elliptiske Form.

Rørets Længde er given ved Gradernes Længde og Antal. For at kunne foretage en paalidelig Undersøgelse af Termometret er det meget ønskeligt at have baade Frysepunkt og Kogepunkt paa Gradestokken. Derved bliver altsaa den mindste Længde 100 × Gradlængden, idet der forudsættes et Celsiustermometer. Er det ønskeligt eller nødvendigt at afkorte Termometret f. Ex. til Brug ved Temperaturer over 100^0 eller under 0^0 kan det uden Skade opnaaes, naar man som vist i Fig. 65, blæser en eller flere Udvidelser, Poser paa Termometerrøret, forudsat at Poserne ikke er større end at man ved Kalibreringen kan faa deres relative Rumfang udmaalte i de inddelte og cylindriske Dele af Røret. Man er naturligvis udelukket fra at maale de Grader, der falde indenfor Poserne.

Rørkanalens Tværsnitsareal vælges efter den Længde for Graderne og den Størrelse for Beholderen man har valgt. Med et meget snævert Rør følger der en stor Haarrørsvirkning, og Kvægsølvtraaden kan være vanskelig at se. Skal der i et Termometer med en Beholder paa 1 cm^3 være 30 cm fra Frysepunkt til Kogepunkt, maa Rørets indvendige Diameter være omtrent $^1/_4$ mm.

Sædvanlig lader man Røret ende foroven i en lille Udvidelse, der ved Kalibreringen tjener til at optage en Del af Kvægsølvet, naar man skal undersøge den nederste Del af Termometerrøret.

Beholderen gør man helst saa lille som Forholdene tillade for at formindske den Varmemængde, der maa tilføres Termometret ved en Temperaturstigning; dette har direkte Betydning, naar man bruger Termometret ved Maaling af Varmemængder og indirekte af Hensyn til at formindske den Tid, det varer før der bliver Temperaturligevægt. Af samme Grunde ønsker man tynde Vægge i Beholderen, men herfor sættes der en Grænse, da Indflydelsen af ydre og indre Tryk, derunder Haarrørsvirkningen, paa Beholderens Rumfang voxer, naar Vægtykkelsen aftager. Vægtykkelsen kan være omkring $^1/_2$ mm.

Termometrets Udstyr. Termometret indrettes sædvanlig enten som Stangtermometer (Fig. 51) eller som Kappetermometer (Fig. 63). Røret i det første er meget tykvægget og fortsættes forneden med en cylindrisk Beholder, der har omtrent samme ydre Diameter som Røret. Inddelingerne ætses eller ridses paa selve Røret.

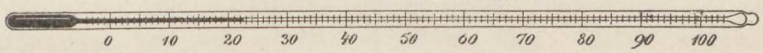


Fig. 51

I Kappetermometret har Røret et lille ydre Tværmaal og Inddelingerne er afsatte paa en bagved liggende Strimmel af Mælkeglas; Rør og Gradestok er omsluttede af et vidt Glasrør, der forneden er smeltet til Beholderens Overside, mens det foroven er tilsmeltet. For at give Gradestokken og Termometerrøret uforanderlig Stilling til hinanden kan de smeltes sammen foroven.

Fordelene ved Kappetermometret er at Inddelinger og Tal staa meget tydeligere paa den flade og brede Mælkeglasplade end paa det runde Rør, og at Kvægsølvets Top kommer nærmere til Inddelingerne end i Stangtermometret; det vil i Reglen ogsaa være stærkere mod Stød. Men det staar tilbage for Stangtermometret i Paalidelighed, fordi en Del af Beholderens Overflade falder indenfor Kappen, og fordi man ikke altid med fornøden Sikkerhed kan kende Termometerrørets Temperatur; endvidere sker der ved Opvarmning en lille Forskydning af Gradstokken i Forhold til Røret, fordi de to ikke have nøjagtig samme Udvidelseskoefficient.

Temperaturens Definition ved Kvægsølvtermometret. Afstanden ved 0^0 fra Frysepunktet til Kogepunktet kaldes L, Termo-

meterrørets Lysnings Tværsnit ved 0^0 kaldes q, Beholderens Rumfang regnet indtil Frysepunktet og taget ved 0^0 kaldes V_0. Naar Kvægsølvet ved en Opvarmning stiger fra Frysepunktet gennem $t/100$ af Afstanden fra Frysepunkt til Kogepunkt, er Temperaturen t^0 C. Hvis denne Opvarmning giver en Kubcentimeter Kvægsølv en Udvidelse k og en Kubcentimeter Glas en Udvidelse g, da vil man have

$$\frac{t}{100} Lq(1+g) + V_0(1+g) = V_0(1+k),$$

hvilken Ligning kun udtrykker, at Kvægsølvets Rum er lig det Glashulrum, som det udfylder. Betegner K og G Værdierne ved Kogepunktet for k og g, faaes

$$Lq(1+G) + V_0(1+G) = V_0(1+K)$$

Ved disse to Ligninger kan man eliminere Termometrets tilfældige Dimensioner L, q og V_0 og man faar

$$t = \frac{(k-g)(1+G)}{(K-G)(1+g)} \cdot 100 .$$

Herved sees Temperaturen at være defineret ved Kvægsølvets og Glassets Rumudvidelser. Var Glassets Udvidelse forsvindende, vilde Temperaturen være proportional med Kvægsølvets Udvidelse; nu er g omtrent $^1/_7\, k$, saa at Glassets Udvidelse faar en kendelig Indflydelse paa Temperaturens Definition.

Man maa forudsætte hele Kvægsølvmassen, altsaa ogsaa den i Røret værende Del, opvarmet til de t^0. Har Røret en afvigende Temperatur, maa man bestemme dens Indflydelse paa Standen og derefter rette Aflæsningen. Vilde man bestemme Temperaturen t som Forholdet mellem *Vægten* af det Kvægsølv, der ved t^0 staar over 0^0, og det som ved 100^0 staar over 0^0, vilde t blive defineret ved $t = \frac{(k-g)(1+K)}{(K-g)(1+k)} \cdot 100$, som kun ved 0^0 og 100^0 er identisk med den ved Rørtermometret bestemte; ved alle mellemliggende Temperaturer vilde Vægttermometret give et højere Tal for den samme Temperatur. Ved 50^0 vilde Forskellen beløbe sig til omtrent $^1/_2{}^0$.

Det er forudsat at Beholderens Rumfang afhænger alene af Temperaturen; da de Tryk, der virke indvendig og udvendig paa Væggene, ogsaa have en kendelig Indflydelse paa Rumfanget, maa det altsaa forudsættes, at de er ens ved alle Maalinger; er

det ikke Tilfældet, maa man iagttage Trykkene og korrigere for deres Indflydelse.

Varige Forandringer i et Kvægsølvtermometer. Herved skal forstaas saadanne Forandringer i Beholders og Rørs Dimensioner, som er uafhængige af den øjeblikkelige Temperatur, idet de er betingede af en forudgaaende Behandling. De ere dels blivende, dels forbigaaende.

Der kan fremkaldes en *blivende* Forandring i Glassets molekylære Bygning og en dermed følgende *Formindskelse* i dets Rumfang, naar Termometret i længere Tid holdes opvarmet til en høj Temperatur, 200^0—350^0, og derpaa langsomt afkøles. Denne Forandring er betinget af Termometrets Tilblivelsesmaade. Under Blæsningen af Termometret og under dets Fylding med Kvægsølv ophedes det stærkt. Under den derefter følgende forholdsvis hurtige Afkøling vil der være betydelige Temperaturforskelle og dermed følgende Spændinger i Beholderens Vægge tilstede. Af den Grund synes Glasmolekylerne ikke at naa deres endelige Ligevægtsstillinger, naar Afkølingen er til Ende. I Tidens Løb sker en langsom Tilnærmelse dertil; det er denne Tilnærmelse, der kan fremskyndes ved den ovennævnte Behandling. Glasset forholder sig analogt med Staalet, naar dette hærdes og derpaa »anløbes« eller delvis afhærdes.

Glassets Forhold viser sig paa følgende Maade ved Termometret. Hvis man strax efter Forfærdigelsen bestemmer Frysepunktet og gentager Bestemmelsen senere hen, vil man finde, at Frysepunktet stiger, Beholderens Rumfang aftager i Tidens Løb, først hurtig, senere langsommere, saaledes at det bliver næsten konstant i Løbet af nogle Aar; Termometret skal være gammelt for at være godt. Efter det ovenstaaende kan man ælde et ungt Termometer kunstig ved en »Afhærdning«, idet man opheder det til en passende høj Temperatur, holder det der i nogen Tid og derpaa afkøler det langsomt. Efter denne Behandling vil det vise sig, at Frysepunktet er steget betydeligt, maaske flere Grader, men den fortsatte langsomme Stigen vil være hindret. En fornyet Ophedning, som ikke overskrider den forrige, vil ikke have nogen blivende Indflydelse paa Frysepunktet.

Den stærke Ophedning har en tilsvarende Indflydelse paa Termometerrøret, hvis Kaliber derfor forandres; man kan ikke stole paa en Kalibrering, der er foretagen forud for Termometrets Forfærdigelse, fordi Kaliberet ikke forandres jævnt. Glassets Afhærd-

ning forandrer ogsaa dets Udvidelseskoefficient. Kalibreringen bør derfor foretages, før Termometret nærmere undersøges.

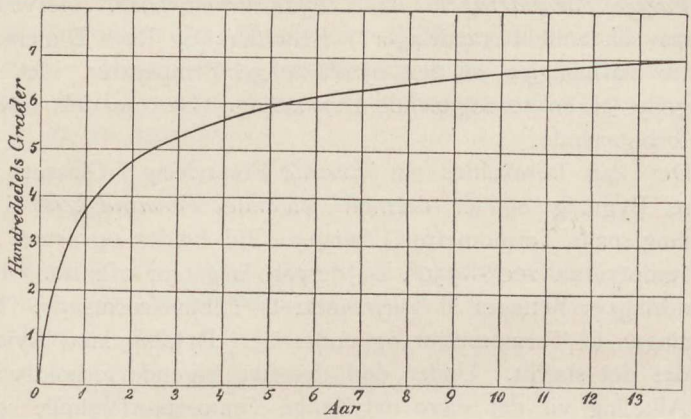


Fig. 52

Fig. 52 viser hvorledes Frysepunktet for et Termometer af verre dur har varieret i Løbet af 14 Aar (Guillaume). Undersøgelsen begyndte kort Tid efter Termometrets Forfærdigelse. I de første 5 Aar er Frysepunktet steget 0,06°, men i de derpaa følgende 9 Aar kun 0,01°.

De varige men dog *forbigaaende* Forandringer af Beholderens Rumfang og dermed af Frysepunktets Beliggenhed (termisk Eftervirkning) viser sig, naar Termometret har ligget hen nogen Tid; bestemmer man først Frysepunktet, derpaa opvarmer Termometret f. Ex. til 100° og endelig igen bestemmer Frysepunktet, vil dette ligge lavere end ved den første Bestemmelse.

Tildragelsen forklares saaledes: Ved Opvarmningen fra 0° udvider Beholderen sig og antager hurtig det til 100° svarende Rumfang; ved den derpaa følgende Afkøling tilbage til 0° trækker Beholderen sig sammen men ikke nøjagtig til samme Rumfang som før; den bibeholder i længere Tid en Del af den Udvidelse, den fik ved Opvarmningen. Hverken ved Opvarmningen eller ved Afkølingen holder Rumforandringen Skridt med Temperaturforandringen, men den endelige Ligevægtstilstand indtræder meget hurtigere ved stigende end ved aftagende Temperatur. Fig. 53 viser hvorledes Rumfanget varierer, naar Termometret efter lang Tids Henstand ved 0° opvarmes hurtig til 100° og derpaa atter afkøles hurtig til 0°. Temperaturen er afsat som Abscisse, Rum-

forandringen som Ordinat. Det maa dog bemærkes, at Rumforandringerne BB_1 og A_1A ved konstant Temperatur ere fremstillede stærkt overdrevne. AB fremstiller Udvidelsen under Opvarmningen, BB_1 en lille Udvidelse, der indtræder kort Tid efter at de 100° er naaet. B_1A_1 viser Sammentrækningen under Afkølingen til 0°; Restsammentrækningen A_1A indtræder først ved langvarig Henstand i smeltende Is. Den heraf betingede Variation i Frysepunktet F og i Kogepunktet K er vist i Fig. 54 ved FKK_1F_1F.

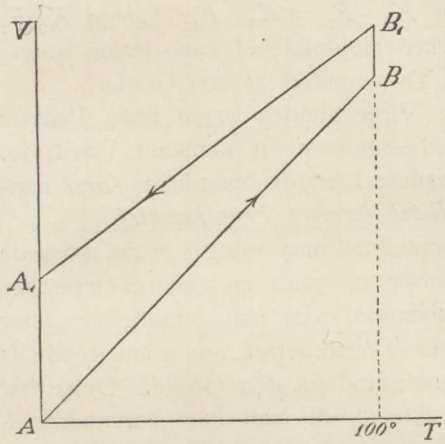


Fig. 53

Som det vil fremgaa af Fig. 54 faar man ved en Bestemmelse af Udgangspunkter paa Termometret Valget mellem to Kogepunkter og to Frysepunkter. For Kogepunktets Vedkommende er der dog ingen Tvivl ved Valget, idet Bevægelsen KK_1 foregaar i saa kort Tid, at kun K_1 kan bestemmes sikkert. Derimod er Bevægelsen fra F_1 til F saa langsom, at Minimumspunktet F_1 kan bestemmes sikkert. For et tilstrækkelig gammelt (eller kunstig ældet) Termometer kan F regnes som et virkelig fast Punkt, der ogsaa uden Vanskelighed kan bestemmes.

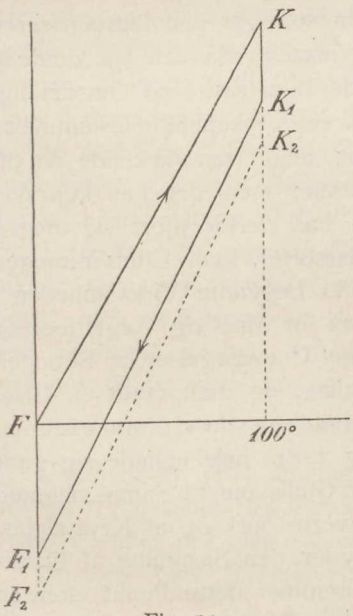


Fig. 54

Spørgsmaalet er altsaa om 100° skal være fremstillet ved Højdeforskellen mellem F og K_1 eller ved den mellem F_1 og K_1. Man vælger den sidste, fordi den kan findes til enhver Tid, uanset hvorledes Termometret forud har været behandlet. Begynder man Opvarmningen til 100° ikke med F men med et lavere liggende Punkt som Frysepunkt, og det vil hyppig være Tilfældet med et i Brug værende

Termometer, da kommer man ogsaa til et lavere liggende Kogepunkt K_2. Nu har det vist sig, at hvis man fra Kogepunktet K_2 igen gaar ned til 0^0 og derved bestemmer et nyt Frysepunkt F_2, da bliver Højdeforskellen $K_2 - F_2 = K_1 - F_1$; Linien $K_2 F_2$ er parallel med $K_1 F_1$. Nævnte Højdeforskel kan derfor bruges til Definition af Længden paa Termometret af 100 Grader.

Man bestemmer derfor i Virkeligheden ingen faste Punkter paa Termometret; men man bestemmer en konstant Værdi for Længden af 100^0 altsaa for Gradens Længde, naar man *først iagttager Kogepunktet og umiddelbart derefter Frysepunktet.*

Hvad der gælder om Kogepunktet maa antages ogsaa at gælde andre Temperaturer; Termometret vil maale en given Temperatur altid ved den samme Kvægsølvhøjde, naar man umiddelbart efter Iagttagelsen af Standen bringer Termometret ned i smeltende Is og subtraherer den der iagttagne Stand fra den forrige. Dette har man ikke kunnet paavise direkte, fordi man ikke har andre tilstrækkelig nøjagtig definerede Varmetilstande end Vandets Frysning og Kogning; men Sætningens Rigtighed fremgaar deraf, at forskellige og forskelligt behandlede Termometre kun ved at bruges paa den Maade give overensstemmende Resultater.

Den termiske Eftervirkning er naturligvis dog en Ufuldkommenhed ved Termometret, og er den stor gør den Iagttagelserne usikre, fordi Forskelle i Behandlingsmaaden da kan faa kendelig Indflydelse. Ved adskillige Lejligheder kan man ved Omstændighederne være hindret i at foretage en Frysepunktsbestemmelse efter hver ny iagttagen Temperatur; man maa da finde de tilhørende Frysepunkter ved Interpolation; men det kan kun ske, naar Variationerne ere smaa. Man har derfor gjort sig megen Umage for at finde eller fremstille Glassorter, hvor Eftervirkningen er ringe. Da man omtrent ved 1880 begyndte Virksomheden i det S. 35 omtalte internationale Bureau for Maal og Vægt, foretog man der (særlig *Pernet*) omhyggelige Undersøgelser af Betingelgelserne for paalidelig Temperaturmaaling, og man fandt en Glassort, der tilvirkedes under Navn af »verre dur«, som viste en meget ringe termisk Eftervirkning og i det hele egnede sig godt til Termometre. I Fig. 55 er efter Guillaume til Sammenligning vist den termiske Eftervirkning af »verre dur« og af Krystalglas. Ordinaten til et Punkt af Kurven betyder den Sænkning af Frysepunktet, der viser sig, naar man bestemmer dette Punkt efter en længere Henliggen af Termometret og derpaa gentager Bestem-

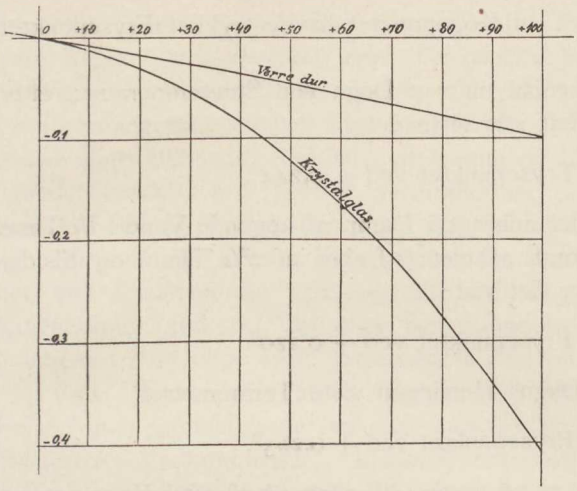


Fig. 55

melsen efter i Mellemtiden at have opvarmet Termometret til den ved Abscissen fremstillede Temperatur.

Man ser, at Frysepunktssænkningen voxer med Temperaturen, men medens den for verre dur kun naar $^1/_{10}{}^0$ efter en Opvarmning til 100^0, er den $^4/_{10}{}^0$ for Krystalglas. I Tyskland foretog man, særlig i Henhold til *H. F. Wiebe*'s Undersøgelser, systematiske Undersøgelser af Glassorters termiske Forhold og kemiske Sammensætning. Man fandt, at den termiske Eftervirkning er størst ved Glassorter, der indeholde baade Kali og Natron, betydelig mindre ved Glas med kun et af disse Metaller. I Henhold hertil gav man sig til i Jena at fremstille nye Glassorter egnede til Termometerbrug, hvorved der fremkom to Sorter betegnede som Jenaglas 16 III og 59 III (Borosilikatglas) med fortrinlige Egenskaber: Ringe Eftervirkning og højt Smeltepunkt samt en Udvidelse, der gør, at især Termometre af Jenaglas 59 III meget nær følger Lufttermometret. Samme Glassorts Eftervirkning efter en Opvarmning til 100^0 naar højst op til $^1/_{30}{}^0$.

Exempel. Et gammelt Termometer delt i $^1/_5{}^0$, forfærdiget af Julius Nissen i København og tilhørende den polytekniske Læreanstalt blev undersøgt for den termiske Eftervirkning. Efter at have henligget ubenyttet i lang Tid blev Termometret nedsat i smeltende Is og viste da

Frysepunktet ved $+ 0{,}523^0$.

Umiddelbart efter anbragtes det i Damp af kogende Vand, hvorved Kvægsølvet steg strax til $99{,}68^0$, for derpaa snart at falde til $99{,}63^0$, hvor det blev staaende uforandret.

Derefter blev Termometret atter nedsat i Is og viste nu

Frysepunktet ved $+ 0{,}044^0$,

saa at Opvarmningen til Kogepunktet havde trykket Frysepunktet 0,479° ned.

Termometret henlaa nu i et Døgn ved Stuetemperatur; efter derpaa at være nedsat i Is viste det

Frysepunktet ved + 0,244°.

Derefter blev det anbragt i Damp af kogende Vand i ¾ Time og blev saa langsomt afkølet (i Løbet af 2¾ Time) og tilsidst nedsat i Is, hvorefter det viste

Frysepunktet ved + 0,220°.

Efter andre 4 Døgns Henliggen viste Termometret

Frysepunktet ved + 0,283°.

Det sees heraf, at en hurtig Afkøling til 0° efter Kogning har flyttet Frysepunktet næsten ½° ned under Ligevægtsfrysepunktet. Derimod har en langsom Afkøling efter en langvarig Kogning næsten ingen Forandring gjort. En Henliggen i et Døgn efter den store Nedtrykning har flyttet Frysepuntet 0,200° op, mens de paafølgende 4 Døgns Henliggen kun har flyttet det 0,063° op mod den oprindelige Plads.

Efter den sidste Henliggen og efter at Frysepunktet som før nævnt var fundet ved 0,283 bestemtes 3 Gange først Kogepunktet og umiddelbart derefter Frysepunktet; der fandtes

Vanddamps Temper.	Kogepunkt	Frysepunkt	Differens
99,820°	99,728	0,041	99,687
99,809	99,689	0,016	99,673
99,834	99,704	0,009	99,695

Den gentagne Opvarmning har altsaa trykket Frysepunktet yderligere ned. 100° paa Termometret betyder efter de tre sidstnævnte Forsøg henholdsvis 100,13 100,14 100,14 Celsiusgrader. Det vil indsees, at man med et saadant Termometer hvor man med blotte Øje kan aflæse med 1/50° Nøjagtighed, kan faa en Fejl paa 1/4°—1/2°, naar man ikke tager Hensyn til Frysepunktsændringerne.

KVÆGSØLVTERMOMETRETS UNDERSØGELSE. Forudsætningen for Bestemmelsen af Temperaturen ved Aflæsning af Kvægsølvoverfladens Stand er, at Rummet mellem to paa hinanden

følgende Delestreger er lige stort overalt. Skønt man ikke kan gøre Regning paa konstant indre Tværsnit af Røret, selv om man udvælger det bedste blandt mange, vilde man dog faa den nævnte Forudsætning tilfredsstillet, hvis man afsatte Delestregerne med saadanne ulige indbyrdes Afstande, at Rummene blev ens, og i Virkeligheden inddeler man jævnlig Termometrene saaledes. Ved Præcisionstermometre foretrækker man dog at afsætte Stregerne med lige Afstande og indføre Korrektioner for Kaliberfejlene; dels vil det ved Undersøgelse vise sig, at man dog ikke helt undgaar Korrektioner ved de tilstræbte lige Rumdele, og dels vil Interpolationen i de ulige store Intervaller kunne blive usikker.

Ved Undersøgelse af et Termometer bestemmer man først Fejlene paa Inddelingerne saaledes som det S. 34 er omtalt for en Maalestoks Vedkommende. Inddelingerne kunne være vilkaarlige f. Ex. hele eller halve mm, eller de kunne afsættes saaledes, at Nulpunktet er nær ved Frysepunktet, at Afstanden derfra til nær ved Kogepunktet er delt i 100 Dele, og at Inddelingen med disse Dele, Graderne, er fortsat under 0 og over 100; Graderne kunne atter være underdelte i 5, 10, 20 eller flere Dele efter deres Længde.

Kalibreringen af et Termometer foregaar paa en Maade der er analog med den, som bruges ved Undersøgelse af en Maalestok. Forudsættes Inddelingerne afsatte uden kendelige Fejl skulde Tallet n for en Delestreg betyde, at Rummet fra Nulstregen til n-Stregen er $n/100$ af hele Rummet R mellem 0 og 100. Hvis det virkelige Rum er $(n + \delta_n)/100$, bliver δ_n den til n-Stregen hørende Kaliberkorrektion. Korrektionen paa 0 og 100 Stregen er efter Definitionen Nul.

Man foretager Kalibreringen, efter at Termometret er færdigt (jvfr. S. 122), og løsner i den Hensigt en Del af Kvægsølvtraaden i Røret fra den øvrige Masse, idet man saa nær som gørligt giver den en Længde, der gaar et helt Antal Gange f. Ex. 5 Gange op i Længden 0—100. Ved denne Traad finder man Korrektionerne paa Stregerne 20, 40, 60 og 80, idet man sammenligner dens konstante Rumfang r paa den ene Side med hele Rummet R, paa den anden Side med hvert af de 5 ved de nævnte Streger afdelte Rum, hvorved man finder den Brøkdel, som hvert af de sidstnævnte er af det hele Rum.

Man bringer først Kvægsølvtraaden til at begynde tæt ved 0 og ende tæt ved 20 og aflæser de to Overfladers Stillinger: α_0 og

$20 + \alpha_1$; dernæst bringes den i Stilling til 20 og 40, og man aflæser $20 + \alpha'_1$ og $40 + \alpha_2$; idet man fortsætter saaledes faar man Aflæsningerne $40 + \alpha'_2$ og $60 + \alpha_3$, $60 + \alpha'_3$ og $80 + \alpha_4$, $80 + \alpha'_4$ og $100 + \alpha_5$. Iagttagelserne give 5 Ligninger:

$$r = (20 + \delta_{20} + \alpha_1 - \alpha_0)\frac{R}{100} = \left(40 + \delta_{40} + \alpha_2 - (20 + \delta_{20} + \alpha'_2)\right)\frac{R}{100} = \ldots,$$

der hver for sig udtrykker, at Kvægsølvets Rumfang r er lig Glashulrummet, som det fylder. Af de 5 Ligninger eliminerer man Forholdet $\frac{r}{R}$ og beregner de fire Korrektioner δ for Stregerne 20, 40, 60 og 80. Da $\frac{r}{R}$ er meget nær lig $^1/_5$, kunne Størrelserne α blive meget smaa; dette er nødvendigt, da man kun i det Tilfælde kan indføre dem i Ligningerne uden Korrektioner.

Nu kender man de 5 ved de omhandlede Streger afdelte Rum udtrykte ved R. Ved den fortsatte Undersøgelse behandler man hvert af disse som man før behandlede Rummet 0—100, idet man f. Ex. løsner en Kvægsølvtraad paa 5 Graders Længde og saaledes faar Korrektionerne for hver 5. Grad, hvorefter man ved en Traad paa 2 Graders Længde faar hver anden Grad korrigeret. Hvor langt man paa den Maade fortsætter, afhænger af de nærmere Omstændigheder; man behøver ikke som ved en Maalestok at gaa alle Stregerne igennem, da man, efter den Maade hvorpaa et Glasrør bliver til, kan gaa ud fra, at der ikke sker pludselige Spring i Tværsnittets Størrelse, saa at man indenfor kortere Strækninger kan interpolere sig til Forskellene. For Kontrols Skyld og for at faa Midler til Udjævning af Iagttagelsesfejl kan man fortsætte Kalibreringen med Kvægsølvtraade af andre Længder end de her forudsatte.

Ved at kombinere Resultaterne fra de omtalte Undersøgelser kan man danne sig en Tabel over hver Delestregs Korrektion til Rettelse af den samlede Fejl i Inddeling og i Kaliber, eller man kan opføre Korrektionerne grafisk i passende stor Maalestok med Gradtallene som Abscisser. Fig. 56 er en grafisk Fremstilling af Kaliberkorrektionerne hørende til et Normaltermometer fra Tonnelot i Paris. Af Kaliberkorrektionerne kan man paa følgende Maade finde, hvorledes Rørets Tværsnitsareal q varierer. Middeltværsnitsarealet kaldes q_m, Korrektionen til Temperaturen t kaldes δ. For

Rumfanget r i Røret fra 0^0 til t^0 har man, idet Gradlængden tages som Længdeenhed,

$$r = q_m(t + \delta) = \int_0^t q\,dt$$

Ved Differentiation faaes

$$q = q_m\left(1 + \frac{d\delta}{dt}\right), \quad q - q_m = q_m \frac{d\delta}{dt}$$

Overskuddet af Tværsnitsarealet ved Delestregen t over Middeltværsnittet er altsaa proportionalt med Tangens til den Vinkel, som Tangenten til det tilhørende Punkt af Kaliberkurven danner med Abscisseaxen. Vilde man efter Udmaaling paa Fig. 56 finde

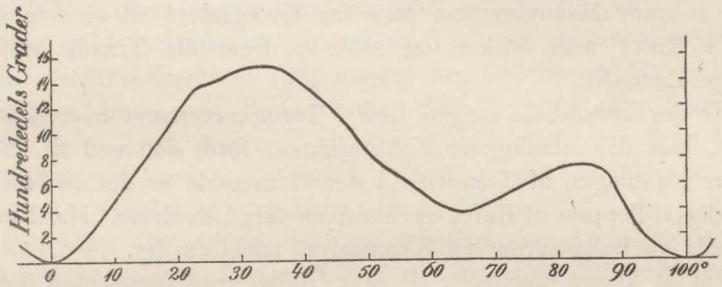


Fig. 56

$d\delta/dt$, maatte man dividere Tangens til hver af de maalte Vinkler med 200, fordi Ordinaterne er afsatte i en 200 Gange saa stor Maalestok som Abscisserne. Ved hver Temperaturiagttagelse lægger man den af Tabellen eller Kurven fremgaaende Korrektion til den iagttagne Stand.

Der er forskelligt at bemærke med Hensyn til Kalibreringens Udførelse. Det kræver Øvelse sikkert og hurtig at fraskille den Kvægsølvtraad, man har Brug for. Naar Kvægsølvet i Røret deler sig, skyldes det ofte en ringe Luftmængde, der sidder som en mikroskopisk Boble paa Siden af Røret, og som udvider sig og derved deler Kvægsølvet, naar Termometret i vandret Stilling føres hurtig frem og derpaa pludselig standses.

Holder man Termometret lodret med Beholderen opad, hænder det ofte, at alt Kvægsølvet sætter sig i Bevægelse, idet der dannes en Boble i den Del af Beholderen, der er øverst. Rejser man det igen op, gaar Kvægsølvet tilbage, og Boblen svinder ind. Vendes Termometret paa ny, vil Boblen i Reglen igen danne sig ud fra det Punkt, hvor den før forsvandt, foranlediget ved det Spor af

Luft, som der blev efterladt. Denne Luft kan man faa arbejdet op i Røret til Hjælp ved Dannelse af Kalibreringstraaden. Rejser man nemlig Termometret hurtig op, stiger Boblen op til hvor Røret begynder, og nu vil man ofte kunne ved et Fremstød med det vandrette Termometer faa Kvægsølvet til at dele sig der; varmer man derpaa Beholderen op, drives Luften frem foran Kvægsølvet i Røret, og rejser man Termometret, vil Luften afsættes i Røret der hvor Kvægsølvet paa ny samles. Afkøler man, trækker Kvægsølvet sig tilbage forbi Luftboblen, som bliver siddende, og ved et Fremstød vil Kvægsølvet derfor i Reglen skilles paa det Sted i Røret, hvor det før blev samlet. Er det sket, kan man ved Opvarmning faa Luften drevet endnu længere frem i Røret. Ved saadanne Manøvrer kan man faa Kvægsølvet til at dele sig, hvor i Røret man ønsker, og saaledes fremstille Traade af forskellige Længder.

Er der forholdsvis megen Luft i Termometerrøret over Kvægsølvet, kan den umuliggøre Kalibreringen, fordi den ved sit Tryk hindrer Flytningen af Traaden. I den Henseende er det en Hjælp, naar der i Toppen af Røret er blæst en lille Udvidelse. Har Røret et Steds en Indsnævring vil Kvægsølvet adskilles der.

For at kunne undersøge de lave Grader maa man enten holde Beholderen stadig afkølet, f. Ex. ved at lægge Vat om den og derpaa hælde Æther, eller bedre flytte noget af Kvægsølvet hen i den øvre Ende af Røret, ved hvilken Lejlighed ovennævnte Udvidelse ligeledes gør Nytte.

Til Maaling af Traadens Længde kan bruges et Sigteapparat som det i Fig. 57 viste. Paa en vandret Skinne sidder to forskydelige Mikroskoper. Termometret bæres nedenunder af to Gafler, der kunne forstilles saaledes, at Termometret kan komme i rette Stilling til Mikroskoperne. Som man ser kan hele Apparatet bringes til at hælde mere eller mindre; det sker forat modvirke den Tilbøjelighed Kvægsølvtraaden kan have til at flytte sig under Paavirkning af et ringe Lufttryk, eller af at Røret indvendig

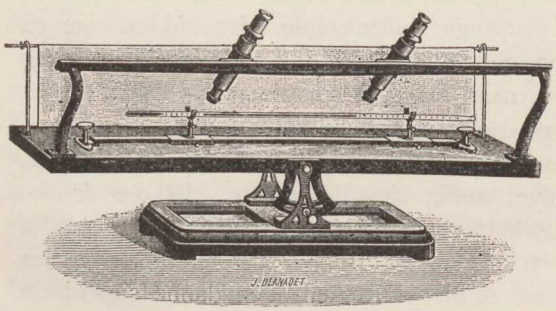


Fig. 57

er konisk ved en af Kvægsølvoverfladerne. Et lyst Gardin hænger ned langs den ene Side forat frembringe en jævn Belysning af Termometret. Ved Anbringelse af Kvægsølvtraaden vil man i Reglen foretrække ikke at have nogen af Overfladerne indstillet paa en Delestreg, da den skjuler Toppen, saa at der bliver en Usikkerhed svarende til Stregens Bredde. Ved lange Traade har de Temperaturforandringer, som Termometerrøret kan faa under Arbejdet, en kendelig Indflydelse paa Længden af Traaden; bl. a. af den Grund gaar man Røret to Gange igennem med hver Kvægsølvtraad.

Trykkets Indflydelse. Et følsomt Termometer vil vise en kendelig forskellig Stand, eftersom det, med uforandret Temperatur, stilles lodret eller lægges vandret, fordi Kvægsølvtraaden i første Tilfælde spiler Beholderen ud ved sit Tryk og derfor nedtrykkes noget. Nedtrykningen er proportional med Overfladens Højde over Beholderen; man maa derfor kende den Konstant, Koefficienten for det indre Tryk, hvormed Højden skal multipliceres forat give Nedtrykningen; den findes bedst ved Kogepunktet, da man saa har en stor Højde og en konstant Temperatur.

Det ydre Tryks Indflydelse er ved følsomme Termometre saa stor, at Variationerne i Barometerstanden faar en kendelig Indflydelse. Efter Vægtykkelsen i Beholderen vil en Forandring paa 1 mm Kvægsølvtryk give Termometerstanden en Forandring paa $0{,}0001^0$ til $0{,}0004^0$. Koefficienten bestemmes ved at bringe Termometret i et Vandbad under Atmosfærens Tryk, iagttage Standen og derpaa forøge eller formindske Trykket, samt iagttage den nye Stand og Trykforandringen. En Trykforandring vil i Reglen forandre en Vædskes Temperatur; ved 18^0 vil Vandets Temperatur dog kun stige noget over $^1/_{1000}{}^0$ ved 1 Atmosfæres Trykforandring. Maa man tage Hensyn ogsaa til denne Indflydelse, kan det ske ved at benytte Vand af 4^0, hvor Varmetoningen er Nul. De to Koefficienter for indre og ydre Tryk er meget nær lige store. Efter ethvert Tryk, der har virket, vil der være en elastisk Eftervirkning, men det har vist sig, at dens Indflydelse i almindelige Termometre er forsvindende.

Af Koefficienten for indre Tryk kan man beregne en Tabel, der for hver Grad giver Korrektionen athængig af den Vinkel, Termometret danner med den vandrette Linie, idet man betragter Standen ved vandret Stilling, hvor man kun har med Temperaturens Indflydelse at gøre, som den rigtige.

For at finde det ydre Tryks Indflydelse, maa man dels iagttage Barometerstanden, dels, hvis Termometret findes i et lukket Rum eller i et Bad, finde Trykoverskuddet over Atmosfæren. Af det samlede Tryk og ved en af Koefficienten beregnet Tabel, finder man Korrektionen for det ydre Tryk; den er alene afhængig af Trykket, idet dettes Indflydelse er ens for alle Temperaturer.

Celsiusgradens Længde, maalt i Termometrets Inddelingsenheder, findes ved at man bestemmer Beliggenheden paa Gradestokken af to bekendte Temperaturer: Vandets Kogepunkt T^0 under bekendt Tryk og Vandets Frysepunkt 0^0. Er Afstanden mellem de to Punkter L Inddelinger, bliver Længden af en Celsiusgrad $l = L/T$. Sædvanlig er Termometret inddelt saaledes, at l er meget nær ved 1, hvorfor man i saa Fald sætter

$$T = L(1 + \Delta)$$

hvor Δ er en lille Brøk. $1 + \Delta$ er een Inddelings Gradværdi.

Af den S. 124 nævnte Grund bestemmer man først Kogepunktet. Man anbringer saa vidt mulig hele Termometret i en Strøm af Damp fra kogende Vand under saadanne Forhold, at man kan maale Dampens Tryk. Da der kan ske Varmestraaling gennem Damplaget fra eller til Kogekarrets Vægge, maa man enten ved Isolation eller ved en Damptrøje sørge for, at ogsaa disse have Dampens Varmegrad. Trykket bestemmes ved Barometret og ved et Manometer, hvis ene Gren er ført ind til i Nærheden af Termometerbeholderen, og som maaler Dampens Overtryk; Dampens Strømning kan give Manometret en Misvisning, hvorfor man maa sørge for, at dens Hastighed er ringe ved Rørets Munding. Som Manometervædske bruges bedst Vand, der holdes ophedet til Kogepunktet, da der ellers kan komme Fejl ved Destillation og Temperaturulighed i Manometret.

Som bekendt har det kogende Vand en Temperatur, der er lidt højere end Kogepunktet; Dampen, som forlader Vandet, maa have dettes Temperatur; den er altsaa lidt overhedet; men Termometret faar dog det virkelige Kogepunkt, fordi Beholderen altid vil være dækket af et Vandlag, som ved sin Fordampning beskytter Termometret mod at overhedes.

Naar Termometret har vist konstant Temperatur i nogen Tid, aflæses Standen og Højderne i Barometer og Manometer.

Derefter sættes Termometret ned i smeltende Is. Som det fremgaar af Exemplet S. 125, kan man komme til forskellige Frysepunkter, eftersom Termometret fra 100^0 afkøles hurtig eller langsomt. For altid at faa Punktet ens bestemt maa man bestemme det hurtig; naar Termometret først er afkølet i Luften til 40^0—50^0, kan man uden Risiko sætte det ned i Isen, hvor det sænkes saa dybt, at alt Kvægsølvet er dækket. Isen maa være findelt, og der tilføres saa meget destilleret Vand, at Luften mellem Iskornene fortrænges. Ligesom før iagttager man Standen, naar denne har holdt sig konstant i nogen Tid.

Naar bortses fra den Is, der udføres fra Norge i store Blokke, giver naturlig Is sædvanlig et lidt lavere Frysepunkt end Is af destilleret Vand. Da fremmede Bestanddele bringer Frysepunktet nedad, viser det, at den naturlige Is sædvanlig indeholder Urenheder. For den kunstige Ises Vedkommende maa man sikre sig mod, at dette endnu ved Brugen kan sidde inde med Kulde fra Ismaskinen.

Frysepunktets Beliggenhed afhænger af Trykket, men da 1 Atmosfæres Trykforandring kun trykker Punktet $^1/_{140}{}^0$ ned, behøver man i Reglen ikke at tage Hensyn dertil. Af lignende Betydning er den Indflydelse, som den i Vandet opløste Luftmængde har paa Frysepunktet. Er Vandet mættet med Luft under 1 Atmosfæres Tryk, ligger Frysepunktet omtr. $^1/_{300}{}^0$ lavere, end naar Isen er i Berøring med luftfrit Vand under Atmosfærens Tryk.

Har man nu efter Indførelse af de før nævnte Korrektioner funden, at Kvægsølvets Stand i Damp fra kogende Vand under Trykket p mm er K, da kan man i omstaaende Tabel over Vandets Kogepunkt ved forskellige Tryk finde den til Standen K svarende Temperatur T. Var den korrigerede Stand i Isen F, da svarer dertil Temperaturen 0^0. Følgelig faar man, idet $L = K - F$, at

$$T = (K - F)\ (1 + \Delta)$$

hvorved Gradens Længde $(K - F)/T$ eller en Inddelings Gradværdi $1 + \Delta$ er bestemt. Gentager man Bestemmelsen, kan man faa andre Værdier for K, F og T, men Kvotienten $1 + \Delta$ vil vise sig konstant.

Vandets Kogepunkt T under Trykket p mm

efter H. F. Wiebe.

p	T	p	T	p	T	p	T	p	T
730	98,88	740	99,26	750	99,63	760	100,00	770	100,37
1	92	1	29	1	67	1	04	1	40
2	95	2	33	2	70	2	07	2	44
3	98,99	3	37	3	74	3	11	3	48
4	99,03	4	41	4	78	4	15	4	51
5	07	5	44	5	82	5	18	5	55
6	10	6	48	6	85	6	22	6	58
7	14	7	52	7	89	7	26	7	62
8	18	8	55	8	93	8	29	8	66
9	22	9	59	9	99,96	9	33	9	69
740	99,26	750	99,63	760	100,00	770	100,37	780	100,73

KVÆGSØLVTERMOMETRETS BRUG. *Termometerstandens Aflæsning.* Aflæser man et Termometer med det blotte Øje maa man søge at holde Øjet saaledes, at Selinien er vinkelret paa Termometret, da man ellers begaar en Fejl, Parallaxefejlen, fordi Kvægsølvoverfladen enten ligger noget bagved eller noget foran Delestregerne. Afviger Selinien en lille Vinkel φ fra den vinkelrette, bliver Fejlen $\pm d\varphi/2nl$ Grader, hvor d er Rørets ydre Diameter, n Glassets Brydningsforhold og l Gradens Længde. Fortegnet er forskelligt efter Afvigelsens Retning og eftersom Stregerne ligger foran eller bagved Røret. Man kan sikre sig mod Parallaxefejlen ved at lægge et lille Spejl mod Bagsiden af Røret og flytte Øjet, til det ser sit Spejlbillede i Højde med Kvægsølvoverfladen.

Indretter man en Lup saaledes, at den kan lægges i en bestemt Stilling mod Røret og i denne Stilling giver et tilstrækkelig skarpt Billede af baade Kvægsølv og Inddelinger, opnaar man paa en Gang Forstørring og Sikkerhed mod Parallaxefejl.

Bedst er det at aflæse med en Kikkert, som stilles vandret i nogen Afstand fra Termometret; stilles dette lodret efter en Lodsnor, undgaar man Parallaxen; tillige opnaar man den i mange Tilfælde vigtige Fordel, at Iagttageren er i Afstand fra Termometret og dets Omgivelser og derved undgaar at tilføre det Varme. Sædvanlig vil Kikkerten endvidere give en Forstørring. Ved et Stangtermometer kan man eliminere Parallaxen ved at indrette det saaledes, at Termometret kan drejes om sin egen Axe; iagttager

man Standen først med Stregerne mod Kikkerten og derpaa efter at disse ere vendte til den modsatte Side, vil Middeltallet være frit for Parallaxefejlen. Ved Aflæsning med Kikkert maa man lægge Vægt paa at skaffe Termometret en god Belysning, sædvanlig ved en jævnt lys Baggrund.

Haarrørstrykket i Termometret er paa Grund af Kvægsølvets stærkt krumme Overflade i det snævre Rør saa betydelig, at de Forandringer, det kan undergaa, kunne forandre Standen kendelig. Ved stigende Temperatur voxer Krumningen og dermed Trykket, hvorfor Termometret viser for lavt; det gaar omvendt ved faldende Temperatur. Denne Virkning bliver des kendeligere, jo større Beholderen, og jo snævrere Røret gøres; derfor er det ved de følsomme Termometre man maa tage Hensyn til Haarrørsvirkningen. Det sker ved at ryste Termometret ved smaa haarde Slag; derved nærmes Overfladen til sin normale Form og Trykket til sin normale Størrelse.

Fremgangsmaaden ved en Temperaturbestemmelse. Naar Termometerbeholderen er anbragt i det Rum, hvis Temperatur søges, er der følgende at tage i Agt. Man maa kunne 1) maale Trykket i Rummet i Højde med Beholderens Midte, 2) bestemme Termometrets Stilling til Lodsnoren, 3) undersøge Indflydelsen af, at den udenfor Rummet værende Kvægsølvmængde i Røret ikke har Rummets Temperatur. Ved 1) og 2) bliver man i Stand til at korrigere for ydre og indre Tryk.

Korrektionen for den *udestaaende Del af Røret* kan udføres, naar man med fornøden Tilnærmelse kender det deri værende Kvægsølvs Middeltemperatur ϑ og kender Forskellen β mellem Kvægsølvets og Glassets Udvidelseskoefficienter. Er Rummets Temperatur t^0, og er den udestaaende Kvægsølvtraad l^0 lang, da vilde den ved at opvarmes fra ϑ^0 til t^0 forlænges med $k = \beta l(t - \vartheta)^0$, der altsaa er den søgte Korrektion. Man kan regne $\beta = {}^1/_{6400}$. Har man i et Forsøg $t = 70^0$, $\vartheta = 30^0$, $l = 40^0$, bliver herefter Korrektionen saa meget som ${}^1/_4{}^0$; heraf fremgaar Nødvendigheden af selv ved ret grove Temperaturbestemmelser at tage Hensyn til Korrektionen. Vanskeligheden bestaar i at faa ϑ nogenlunde rigtig bestemt, idet Hjælpetermometre, anbragte med deres Beholdere i Nærheden af Røret, ofte ville være underkastede andre Opvarmningsforhold end selve Røret.

Guillaume har paavist et simpelt Middel til en sikker Korrektion; det bestaar i, at anbringe et Hjælpetermometer i det Rum,

hvis Temperatur søges, saaledes ved Siden af Hovedtermometret, at den udestaaende Kvægsølvtraad bliver ens i begge. Er de to Termometre forskellige, ville de vise hver sin Temperatur, t_1 og t_2, begge lavere end den søgte t. Bleve Termometrene helt nedsænkede i Rummet med Temperaturen t, vilde de begge stige til t. Da der er samme Kvægsølvhøjde udenfor i dem begge, ville Tilvæxterne $t - t_1$ og $t - t_2$ være lige lange (se Fig. 58). Udtrykker man det i en Ligning, vil den give den søgte Temperatur; kaldes Længderne af 1 Grad i de to Termometre λ_1 og λ_2, bliver Ligningen

$$(t - t_1)\,\lambda_1 = (t - t_2)\,\lambda_2.$$

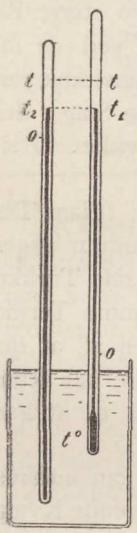


Fig. 58

Heraf findes Korrektionen k paa Hovedtermometrets Angivelse; $k = t - t_1 = \lambda_2\,(t_1 - t_2)/(\lambda_1 - \lambda_2)$. Var Termometrene ens, vilde k faa Formen 0/0. For at faa maalelige Størrelser til Bestemmelse af k maa man indrette Hjælpetermometret saaledes, at der bliver stor Forskel paa Gradlængderne λ_1 og λ_2; derfor indrettede Guillaume sit Hjælpetermometer uden Beholder; det bestaar kun af et delvis med Kvægsølv fyldt Glasrør, helst af samme Slags Glas og samme ydre Tværmaal som Hovedtermometret.

Har man iagttaget Termometerstanden og korrigeret den for Inddelings- og Kaliberfejl, for indre og ydre Tryk og for den udestaaende Del af Røret, kan man finde Temperaturen defineret ved Kvægsølvets og Glassets Udvidelser, naar man tillige kender de korrigerede Steder for Frysepunkt og Kogepunkt. Er de tre korrigerede Værdier henholdsvis x, F og K bliver Temperaturen

$$t = \frac{x - F}{K - F} \cdot 100.$$

I denne Ligning kender man $K - F$ fra den forudgaaende Undersøgelse; men Frysepunktet kan have flyttet sig; derfor maa man bestemme det, idet man, saa hurtig som det kan ske efter Iagttagelsen af Standen x, sætter Termometret ned i Is.

Den Temperatur man faar bestemt efter det ovenstaaende er som sagt defineret ved Udvidelserne af Kvægsølv og Glas. Da to Termometre af forskellige Slags Glas følgelig give forskellige Tal

for den samme Temperatur, kan man ikke blive staaende derved. Man er bleven enig om at definere Temperaturen ved Brinttermometret. Har en Brintmasse ved 0^0 Trykket P_0, og har den ved 100^0 og ved uforandret Rumfang Trykket P_{100}, da finder man enhver anden Temperatur t ved at maale det Tryk P, som den giver samme Brintmasse i samme Rum, idet

$$t = \frac{P - P_0}{P_{100} - P_0} \cdot 100^0.$$

Man har foretaget omhyggelige Sammenligninger mellem Brinttermometret og Kvægsølvtermometre af forskellige Glassorter, hvorfor man med fornøden Sikkerhed kan korrigere de sidstes Angivelser saaledes, at man faar det Tal for Temperaturen, som Brinttermometret vilde have givet, hvis det var bleven brugt. Nedenstaaende Tabel giver det Tal, man skal lægge til en ved et Kvægsølvtermometer iagttagen Temperatur t_K for at faa Temperaturen efter Brinttermometret $t_H = t_K + k$. Jenaglas 16^{III} følger verre dur saa nær, at Korrektionerne for de to Glassorter mellem 0^0 og 100^0 ikke afvige $^1/_{100}{}^0$ fra hinanden. Overensstemmelsen mellem Termometret af Jenaglas 59^{III} og Brinttermometret er paafaldende stor mellem 0^0 og 100^0.

Brint-term.	Termometer af		Brint-term.	Termometer af	
	Verre dur	Jenaglas 59 III		Verre dur	Jenaglas 59 III
t	k_1	k_2	t	k_1	k_2
-35^0	+0,359	+0,23	$+60^0$	−0,090	−0,016
30	290	18	65	082	012
25	226	14	70	072	008
20	168	10	75	062	004
15	117	07	80	050	−0,001
10	072	04	85	038	+0,001
− 5	+0,033	+0,02	90	026	002
0	0,000	0,000	95	−0,013	002
+ 5	−0,028	−0,014	100	0,000	0,000
10	052	024	110	+0 037	0,00
15	070	031	120	063	0,00
20	085	035	130	075	−0,02
25	095	037	140	074	0,05
30	102	038	150	060	0,10
35	106	036	160	+0,034	0,17
40	107	034	170	−0,001	0,26
45	106	030	180	043	0,38
50	103	026	190	083	0,52
$+55^0$	−0,097	−0,021	200	−0,125	−0,70

Man maa have for Øje, at Termometret viser sin egen Temperatur; hvorvidt det tillige viser sine Omgivelsers Temperatur vil afhænge af, om det er kommen i Temperaturligevægt med Omgivelserne, og om denne Ligevægt alene er betinget af Ledning eller alene af Straaling. Et Termometer i tomt Rum vil vise Væggenes Temperatur; anbragt i en uigennemstraalelig Vædske vil det vise Vædskens Temperatur. Men i et luftfyldt Rum, hvor Luft og Vægge har forskellig Temperatur, vil Ligevægten afhænge baade af Ledning til Luften og af Straaling gennem Luften, hvorfor Termometret vil vise en Mellemting mellem Luftens og Væggenes Temperatur. Ledningen faar Overvægten, naar man ved at svinge Termometret, eller ved at sætte Luften i Strømning mod det, hurtig skifter de Luftdele, der omgive Beholderen; saaledes bærer man sig derfor ad, naar man vil bestemme Lufttemperaturen i et Værelse eller i det fri.

Har man Termometret i en Vædske, viser det Temperaturen i Højde med Beholderen; men det maa huskes, at Vædsken meget godt kan have andre Temperaturer over og under denne; af den Grund og tillige for at fremskynde Varmeledningen, vil man i mange Tilfælde, f. Ex. ved Kalorimetret, røre om i Vædsken eller, hvis det ikke kan ske, anbringe Vædskebeholderen i et Bad, hvis Temperatur man ved Omrøring gør ens over det hele (Pyknometermaaling).

Bestemmelse af et fast Legemes Temperatur medfører ingen Vanskelighed, naar Legemets Dimensioner og Varmeledningsevne giver gode Betingelser for Udjævning af Temperaturforskelle, og naar Legemet slutter tæt om Termometerbeholderen. Ellers kan den Omstændighed, at det faste Legeme sædvanlig kun rører Termometret i enkelte Punkter, og at der kan være ukendte Temperaturforskelle i Legemets Indre, volde Vanskelighed. Naar det kan ske lader man Legemet og Termometret opholde sig i et og samme Rum, helst et Vædskebad, hvor Temperaturen holdes konstant i saa lang Tid som behøves forat udjævne Temperaturforskelle (Ex. Bestemmelse af et fast Legemes Varmefylde).

Har man med en foranderlig Temperatur at gøre og skal man iagttage den mens den forandrer sig, kan Betingelsen om Temperaturligevægt ikke opfyldes, og Termometret vil derfor altid være noget tilbage med sin Visning: under Temperaturstigning vil det vise for lavt og under Fald for højt. Man maa i hvert Tilfælde under-

søge, hvor stor Misvisningen kan være; den formindskes ved at bruge et Termometer med lille Beholder og stor Overflade.

Omfanget af de nødvendige Korrektioner. I hvad Omfang man maa følge de i det foregaaende givne Forskrifter for Brugen af Termometret afhænger af den tilsigtede eller opnaaelige Nøjagtighed. Rettelsen for Kaliberfejl kan man ikke fritage sig for, da dens Indflydelse staar i omvendt Forhold til Følsomheden; havde man et Termometer delt i $^1/_{10}{}^0$ og med en Kaliberfejl, der gjorde en enkelt af Graderne $^1/_{10}{}^0$ for lang, da kunde man tænke sig Beholderen fjærnet og til Røret blæst en ny Beholder af saa lille et Rumfang, at Inddelingerne, som før betød $^1/_{10}{}^0$, nu blev til hele Grader; Kaliberfejlen vilde altsaa nu strække sig over 10^0 og gøre denne Strækning næsten en hel Grad for lang.

Afstanden mellem Kogepunkt og Frysepunkt bør man prøve hvor det kan ske. Er Termometret gammelt eller kunstig ældet, og er det forfærdiget af Glas med ringe Eftervirkning, kan man betragte de to Punkter som faste Punkter, naar man nøjes med $^1/_{10}{}^0$ Nøjagtighed, saa at man slipper for den gentagne Frysepunktsbestemmelse; dog bør man af og til prøve Nulpunktet.

Variationen i det ydre Tryk, for saavidt det skyldes Variation i Barometerstanden eller Trykket af en ringe Vædskehøjde i et Bad, kan man i Reglen se bort fra, naar man nøjes med $^1/_{100}{}^0$ Nøjagtighed. Anderledes stiller det sig, hvis Termometret kommer ind i et Rum, hvoraf Luft udpumpes, eller kommer under Tryk af en høj Kvægsølvsøjle, Damp eller fortættet Luft. Koefficienten for indre Tryk kan regnes lig den for det ydre. Den faar ingen Betydning, hvis man altid bruger Termometret i lodret Stilling, og hvis man undlader at korrigere Kogepunkt og Frysepunkt for det indre Tryk. Bruges et i $^1/_{10}{}^0$ inddelt Termometer i forskellige større Afvigelser fra lodret Stilling, er man nødt til at tage Hensyn til det indre Tryk i hvert Fald ved højere Temperaturer; ved 100^0 kan Korrektionen nærme sig til $^1/_{10}{}^0$.

Korrektionen for den udestaaende Del af Røret maa man som nævnt S. 135 selv ved grove Temperaturmaalinger tage med, naar man maaler høje Temperaturer, og naar man ikke kan faa det meste af Kvægsølvet i Røret med ind i det Rum, hvis Temperatur søges. Maaler man Temperaturer omkring 200^0, kan Fejlen beløbe sig til flere Grader.

Nødvendigheden af at reducere til Brinttermometret kan vurderes ved Tabellen S. 137. Reduktionen har samme Betydning

som i andre Tilfælde absolut Maaling (se S. 110), nemlig at gøre Resultater fra forskellige Tider og Steder direkte sammenlignelige. Kender man ikke Glassorten i det brugte Termometer, maa man sammenligne det ved nogle Temperaturer med et *Normaltermometer*, hvorved forstaaes et Kvægsølvtermometer, der er saa nøje kendt og undersøgt, at det med den Nøjagtighed, der er Brug for, kan give Temperaturen efter Brinttermometret.

Ved en stor Mængde Iagttagelser ligger Hovedvægten paa en nøjagtig Bestemmelse af en *Temperaturforskel*, medens Spørgsmaalet om den enkelte Temperaturs Beliggenhed i Forhold til Vandets Frysepunkt og Kogepunkt kommer i anden Række. Exempler herpaa er Kalorimetermaalinger, Bestemmelse af Temperaturkoefficienter, Forandringer i en Vædskes Kogepunkt eller Frysepunkt ved Tilsætning af opløselige Stoffer o. s. v. Naar den søgte Forskel kun omfatter nogle faa Grader, vil man kunne fritage sig for saadanne Korrektioner, der ere saa nær ens ved de to iagttagne Stande, at deres Differens falder indenfor Iagttagelsesfejlenes Grænser; dette kan saaledes gælde Korrektionerne for Frysepunktsforandringerne, for indre og ydre Tryk og for den udestaaende Del af Røret.

I andre Tilfælde gælder det netop om at kende en enkelt Temperaturs Beliggenhed f. Ex. ved Bedømmelse af en Vædskes Renhed grundet paa Iagttagelse af dens Frysepunkt eller Kogepunkt, ved Termometrets Anvendelse naar man skal kende en Størrelse, der varierer med Temperaturen, f. Ex. mættet Damps Tryk, en Maalestoks Længde, Størrelsen af et Rumfang eller en elektrisk Ledningsmodstand o. s. v., ved Højdemaaling grundet paa Kogepunktsbestemmelse og ved Anvendelse af Lægetermometret. Undlader man i saadanne Tilfælde at tage de til Aflæsningsnøjagtigheden svarende Hensyn til Korrektionerne, kan Kvægsølvtermometret give meget vildledende Resultater.

Hvis Termometret af en eller anden Grund ikke kan kalibreres, eller hvis dets Gradestok ikke omfatter Frysepunkt og Kogepunkt, maa man undersøge det ved Sammenligning med et Normaltermometer ved saa mange Grader, som maa anses fornødne forat kunne interpolere til Betydningen af de ikke undersøgte Grader.

LUFTTERMOMETRET. Som omtalt S. 137 er man bleven enig om at definere Temperaturen ved Brinttermometrets Angivelser. Aarsagerne til at man ikke kan definere Temperaturen

ved Kvægsølvtermometret er tidligere nævnte. Disse Aarsager ere ikke tilstede ved Lufttermometret; man er ved dette ikke henvist til Glasset som Beholder, saa at man kan være fri for den termiske Eftervirkning; Luftarternes Udvidelse er mange Gange større end Beholderens; derfor kan dennes Udvidelse elimineres ved Beregningen uden at forringe Nøjagtigheden, saa at Resultatet af Temperaturmaalingen alene kommer til at afhænge af Luftartens Egenskaber, ikke som ved Kvægsølvtermometret tillige af Beholderens. Endelig er forskellige Luftarters Udvidelseskoefficienter saa nær ens, at Vanskelighederne ved at tilvejebringe absolut rene Luftarter ikke kan gøre Temperaturmaalingerne usikre.

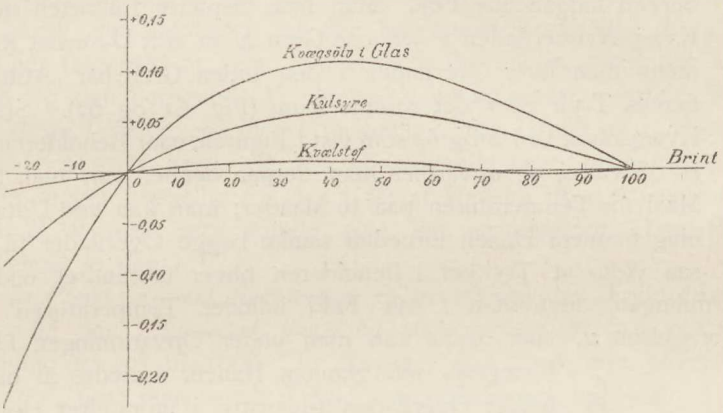


Fig. 59

Den internationale Komité for Maal og Vægt vedtog i 1887 at lægge Brintens Trykforøgelse ved Opvarmning til Grund ved Temperaturmaalinger. Naar Brinten blev valgt, var det fordi den kommer den ideale Luftform nærmest, hvorfor den bestemmer Temperaturen nærmest i Overensstemmelse med den ved Varmeteorien definerede absolute Temperatur; ogsaa Brintens lave kritiske Temperatur taler for dens Anvendelse. Op til 100—200° er der heller ingen Vanskelighed ved Brinttermometret; men ved højere Temperaturer vanskeliggøres Brintens Anvendelse ved dens reducerende Virkning paa Glas og dens Diffusion gennem Metaller. Efter Chappuis' Undersøgelser stemmer Kvælstoftermometrets Gang imidlertid saa nøje sammen med Brinttermometrets ved Temperaturer fra 100°—300°, at man kan fortsætte med det derfra, hvor Brinttermometret vanskelig kan bruges. Fig. 59 viser efter Guillaume Afvigelserne i forskellige Termometres Visning, naar de er inddelte til at

stemme overens ved 0^0 og 100^0. Tallene paa Abscisseaxen betyder Grader efter Brinttermometret.

Luftarternes store Eftergivenhed for Tryk og Nødvendigheden af at afspærre dem med en Vædske gør, at Lufttermometret maa indrettes helt anderledes end Kvægsølvtermometret. Et Termometer af sædvanlig Form som det i Fig. 60 viste, hvor en Luftmasse var afspærret ved en Vædsketraad *a* i Røret, vilde være ganske uanvendeligt; *a*'s Stand vilde variere stærkt med det ydre Lufttryk, og da Røret maatte være snævert for at holde sammen paa Vædsken, vilde Haarrørsvirkningen gøre sig stærkt gældende, uden at man kunde rette den derved indgaaende Fejl. Man maa afspærre Luftarten over Kvægsølvoverfladen i den ene Gren af et vidt U-formet Rør, mens man over Overfladen i den anden Gren har Atmosfærens Tryk eller det tomme Rum (Fig. 61 og 62). Staar Kvægsølvet ved *a* og *b*, som vist i Figuren, naar Beholderen *V* er 0^0 varm, og opvarmer man derpaa denne, kan man faa Maal for Temperaturen paa to Maader; man kan ved Udtapning gennem Hanen forneden sænke begge Overflader til *a'* og *b'* saa vidt, at Trykket i Beholderen bliver uforandret under Opvarmningen, idet man i saa Fald udleder Temperaturen af Rumforøgelsen *u*, eller ogsaa kan man under Opvarmningen føre Kvægsølv ind gennem Hanen, saaledes at man holder Overfladen tilvenstre i uforandret Højde ved *a*, mens den tilhøjre løftes til *b''* gennem Højden *h*, hvilken Højde da tjener til Bestemmelse af Temperaturen.

Fig. 60

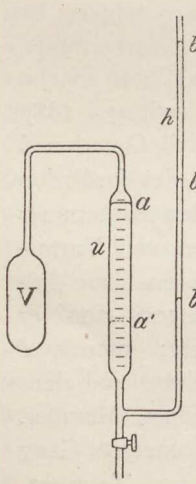


Fig. 61

I første Tilfælde bestemmes Temperaturen *t* ved Luftens Udvidelse u_t under konstant Tryk. u_t er ikke lig *u*; thi hverken ved 0^0 eller ved t^0 har Luften i U-Røret og i største Delen af Forbindelsesrøret Beholderens Temperatur, og Beholderen har selv udvidet sig ved Varmen; men man kan beregne u_t ved *u*. Man faar

$$t = \frac{u_t}{u_{100}} \cdot 100^0.$$

I andet Tilfælde bestemmes Temperaturen ved den fra Opvarmningen hidrørende Trykforøgelse h_t ved konstant Rumfang. Af lignende Grunde som i

første Tilfælde er h ikke nøjagtig lig h_t, men h_t kan beregnes af h. Man faar

$$t = \frac{h_t}{h_{100}} \cdot 100^0.$$

Chappuis har funden, at Brinttermometret giver samme Tal for samme Temperatur, enten denne maales ved konstant Tryk eller ved konstant Rumfang. Derimod viser der sig smaa Forskelle ved Brugen af Kvælstof, atmosfærisk Luft og Kulsyre, betingede af disse Luftarters større Afvigelser fra Mariotte, Gay-Lussacs Lov. Man har valgt at bruge Trykforøgelsen ved konstant Rumfang til Temperaturbestemmelsen, dels fordi det er simplere at udføre, men især fordi den iagttagne og den beregnede Trykhøjde, h og h_t, man her faar med at gøre, kun ere lidt forskellige, mens den iagttagne og den beregnede Udvidelse, u og u_t, under konstant Tryk i de fleste Tilfælde ere meget forskellige, paa Grund af at u er et forholdsvis stort Rum, og det vil sædvanlig have en Temperatur, der er meget forskellig fra den i V; af Hensyn til at kunne maale Rummet u maa man nemlig give det en konstant Temperatur uafhængig af den i V.

Lufttermometrets Følsomhed er given ved den Trykforøgelse h_{100}, som den i konstant Rumfang afspærrede Luft faar ved Opvarmning fra 0^0 til 100^0. Er Trykket ved 0^0 p_0 mm bliver det ved 100^0, naar man sætter Udvidelseskoefficienten lig $^1/_{273}$,

$$p_0 + h_{100} = p_0 \left(1 + \frac{100}{273}\right), \quad h_{100} = \frac{100}{273} \cdot p_0.$$

Følsomheden er altsaa proportional med Begyndelsestrykket; er det 1 Atmosfære, bliver $h_{100} = 278{,}4$ mm, saa at hver Grads Opvarmning giver en Stigning af Kvægsølvet, der er omtrent $2^3/_4$ mm. Det sees heraf, at Lufttermometret ikke bliver meget følsomt, selv om man bruger noget større Begyndelsestryk; af praktiske Grunde kan man ikke gøre dette meget stort.

Beholderens Størrelse maa være betydelig, flere hundrede Kubikcm stor, fordi U-Røret, hvor Luften afspærres ved Kvægsølvet, maa være vidt af Hensyn til Haarrørsvirkningen. Med en lille Beholder forbunden med et vidt Rør vilde den uundgaaelige Fejl i Kvægsølvoverfladens Indstilling i dette Rør medføre en forholdsvis stor Fejl i Rumbestemmelsen.

Trykmaalingen kan udføres saaledes, at U-Røret danner et Manometer (se Fig. 62), der giver Trykforskellen mod Atmosfæren; Trykket findes da ved til Manometerhøjden $ab = h$ at lægge Barometerstanden, som følgelig maa aflæses. Der bliver paa den Maade 4 Kvægsølvflader at iagttage; disse indskrænkes til 2, hvis man lader U-Røret selv være et Barometer, saaledes at den ene Gren er i Forbindelse med Termometerbeholderen, mens den anden er lukket foroven og lufttom. Bl. a. af Hensyn til Indstilling og Aflæsning kan Luften i Trykmaalerøret og i den største Del af Forbindelsesrøret, det skadelige Rum, ikke opvarmes sammen med Beholderen. For at gøre den derved nødvendiggjorte Korrektion saa lille som mulig maa man gøre det skadelige Rum saa lille som mulig ved at lægge Mærket, en nedad visende Glas- eller Metalspids hvorpaa Kvægsølvoverfladen indstilles, tæt op mod Forbindelsesrøret og ved at gøre dette snævert.

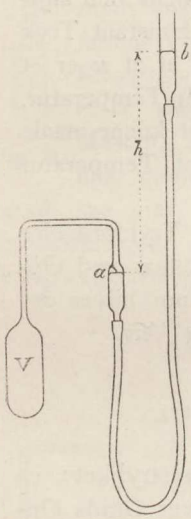


Fig. 62

Lufttermometret forberedes saaledes til Brugen. Beholderen omgives med Is, man indstiller Kvægsølvoverfladen og aflæser Kvægsølvhøjderne og deres Temperaturer samt Temperaturen i det skadelige Rum. Derpaa sendes der Damp fra kogende Vand om Beholderen og den tilsvarende Indstilling og Aflæsning foretages; tillige iagttages Barometerstanden, som giver Dampens Temperatur T (Tabel S. 134). Beholderens Rumfang ved forskellige Temperaturer og Tryk maa i Forvejen være kendt. Ved at danne de to Ligninger, som udtrykker, at den afspærrede Lufts reducerede Rumfang R er det samme i begge Tilfælde, finder man dels R, dels Luftens Udvidelseskoefficient α ved konstant Rum. Beholderens Rumfang henholdsvis ved 0^0 og T^0 kaldes V_0 og V_T, det skadelige Rum kaldes φ og dets Temperatur i de to Forsøg ϑ_1 og ϑ_2; de til 0^0 C og 45^0 Bredde reducerede Kvægsølvhøjder, som i de to Forsøg give den afspærrede Lufts Tryk, kaldes H_1 og H_2. Ligningerne blive

$$760\,R = \left(V_0 + \frac{\varphi}{1 + \alpha\vartheta_1}\right)H_1 = \left(\frac{V_T}{1 + \alpha T} + \frac{\varphi}{1 + \alpha\vartheta_2}\right)H_2$$

Da Rummet φ er meget lille mod V, kan man se bort fra dets Udvidelse. Idet man af den sidste Ligning søger α, kan man uden

Skade sætte $\alpha = {}^1/_{273}$ i de to smaa Led der indeholde φ; Temperaturerne ϑ_1 og ϑ_2 kan, da de kun indgaa i de smaa Led, bestemmes tilstrækkelig nøjagtig ved Kvægsølvtermometret.

Ved Brugen af Termometret giver man Beholderen den søgte Temperatur t og maaler den dertil svarende Trykhøjde H og det skadelige Rums Temperatur ϑ; man faar da til Bestemmelse af t

$$760\,R = \left(\frac{V_t}{1+\alpha t} + \frac{\varphi}{1+\alpha\vartheta}\right)H, \qquad t = \frac{HV_t + \frac{H\varphi}{1+\alpha\vartheta} - 760\,R}{\alpha\left(760\,R - \frac{H\varphi}{1+\alpha\vartheta}\right)}$$

Blev $V_T = V_t = V_0$ og $\varphi = 0$, sees det umiddelbart, at dette Udtryk er identisk med det, der paa S. 137 definerer t.

Det vil af det foregaaende sees, at en Temperaturbestemmelse ved Lufttermometret er ret omstændelig; da tilmed den store Beholder gør det uanvendeligt i mange Tilfælde, og da det er lidet transportabelt, er det en meget begrænset Anvendelse man kan gøre af det. Dets Betydning ligger i, at det giver en sikker Definition af Temperaturen, og det bruges, som før nævnt, til Kontrol for Kvægsølvtermometret, mens det er det sidstnævnte, som finder Anvendelse i Praxis. Brinttermometret finder Anvendelse ved Maaling af de laveste Temperaturer, man hidtil har frembragt, f. Ex. Brintvædskens Kogepunkt (Dewar).

Den absolute Temperatur. Efter Varmeteorien gælder Ligningen

$$\frac{A}{B} = \frac{T_1 - T_2}{T_2} = \frac{T_1}{T_2} - 1,$$

naar der ved en Carnot's Kredsproces udføres Arbejdet A, idet B er den i Arbejdsenheder udtrykte Varmemængde, som under Processen overføres fra et Legeme af Temperaturen T_1 til et koldere Legeme af Temperaturen T_2. Tænker man sig A og B maalte i en given Kredsproces, vil derved Forholdet mellem T_1 og T_2 være givet. Hvis T_1 er Vandets normale Kogepunkt og T_2 dets Frysepunkt, og hvis man vælger Gradenheden saaledes, at $T_1 - T_2 = 100^0$, da vilde en Kredsproces med en ideal Luftart give

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{\frac{1}{\alpha}}{100 + \frac{1}{\alpha}},$$

hvor α er $^1/_{100}$ af Luftens Udvidelse under konstant Tryk ved Opvarmning fra T_2 til T_1. Kendskabet til de virkelige Luftarter giver, at $\frac{I}{\alpha}$ meget nær er lig 273. Da $T_1 - T_2$ er sat lig 100^0, viser ovenstaaende Ligning, at den ved Vandets Frysning givne Temperatur T_2 er udtrykt ved $\frac{I}{\alpha} = 273^0$, og enhver anden Temperatur vil herefter være bestemt ved den almindelige Ligning for Kredsprocessen, naar man i denne lader den ene Temperatur være den søgte, mens den anden er Frysepunktet; man har altsaa her Mulighed for Temperaturmaaling uden Termometer, grundet paa Arbejdsmaalinger. Den herved definerede Temperatur kaldes den absolute; den findes med stor Tilnærmelse ved til Brinttermometrets Angivelse at lægge 273. Det absolute Nulpunkt ligger herefter ved — 273^0 C; det er givet som den Temperatur, ved hvilken en ideal Luftart vilde have Rumfanget Nul.

Fig. 63

SÆRLIGE FORMER FOR KVÆGSØLVTERMOMETRET. *Hundrededelstermometret.* Vil man have Termometret delt i $^1/_{100}{}^0$, synligt for det blotte Øje, maa $^1/_{100}$ Grad være $^1/_8$—$^1/_2$ mm og følgelig en hel Grad 30—50 mm lang. Med en rimelig Længde af Termometret kan dettes Gradestok i saa Fald kun omfatte faa Grader. For dog at kunne bruge Termometret indenfor videre Grænser, f. Ex. mellem — 2^0 og + 102^0, forsyner man Røret med en Pose, der kan optage en Del af Kvægsølvet, naar man vil arbejde ved de højere Temperaturer. Hvis Termometret er indrettet til, med hele Kvægsølvmængden i Brug, at vise Temperaturer omkring 0^0, vil det vise omkring 100^0, naar man har fjærnet $^1/_{60}$—$^1/_{70}$ deraf fra Beholderen. En hyppig brugt Form for et saadant Termometer er Beckmanns (Fig. 63), hvor Posen er anbragt for Enden af Røret, og dette er bøjet om for oven, saa at det overflødige Kvægsølv bliver liggende forneden i Posen.

Man afpasser Termometret til den Temperatur, hvorved det skal bruges, ved at opvarme det nogle Grader derover. Herved vil en Del af Kvægsølvet trænge over i Posen og hænge foroven i denne; ved at man ryster Termometret falder det meste af denne Mængde ned imod Bunden, og ved Afkøling vil det øvrige trække sig tilbage i Røret. Er Termometer-

graden lig 1^0 C, naar hele Kvægsølvmængden er i Brug, vil den være for lang, naar man maaler højere Grader. For at finde Forholdet mellem Gradlængderne i de to Tilfælde sætte vi, at det Punkt paa Gradestokken, der i første Tilfælde betød 0^0, i andet Tilfælde betyder T^0 (Fig. 64). Gradlængderne kaldes l og l^1. Disse maa forholde sig ligefrem som Kvægsølvmængderne i Brug M og $M-m$ (jvf. S. 120)

$$\frac{l^1}{l} = \frac{M-m}{M}$$

Forholdet mellem disse Mængder findes ved i en Ligning at udtrykke, at det Glashulrum, som ved 0^0 fyldes af M, fyldes ved T^0 af $M-m$; idet g_T er Glassets og k_T er Kvægsølvets Udvidelse fra 0^0 til T^0, og ρ_0 er Kvægsølvets Vægtfylde ved 0^0, faar man

$$\frac{M}{\rho_0}(1+g_T) = \frac{M-m}{\rho_0}(1+k_T), \quad \frac{l_1}{l} = \frac{1+g_T}{1+k_T}$$

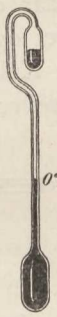


Fig. 64

Er Længden af 1^0 C. f. Ex. 4 cm ved 0^0, vil den, naar T er 100^0, være over $^1/_2$ mm kortere; maaler man et Temperaturinterval omkring 100^0 uden at tage Hensyn hertil, begaar man en Fejl paa over 1 Procent.

Ved en Gradlængde paa flere Centimetre opnaar man næppe større Nøjagtighed end ved 1 cm lange Grader, fordi man kun opnaar de lange Grader ved at bruge enten et meget snævert Rør eller en stor Beholder, og i begge disse Tilfælde forøges Haarrørsvirkningens tilfældige Indflydelse paa Standen (jvfr. S. 135). Naar man dog bruger de lange Grader er det, fordi det er nemmere at aflæse dem med $^1/_{1000}{}^0$ Nøjagtighed end de kortere Grader.

Det sædvanlige *Lægetermometer*, der er bestemt til at aflæse Blodets Temperatur, er et Maximumstermometer. Tæt over Beholderen er Røret stærkt indsnævret, f. Ex. ved at der anbringes i det en kort Glasstift, som er hindret i at flytte sig, og som næsten helt udfylder Røret. Naar Temperaturen stiger, trykkes Kvægsølvet igennem, forbi Glasstiften, men naar den derpaa atter falder, hindrer Stiften Kvægsølvets Tilbagegang, saa at Termometret bagefter vil vise den højeste Temperatur, Termometret har haft; ved at svinge Termometret hurtig med Beholderen fremad og ved

pludselig at rykke det tilbage, tvinges Kvægsølvet igen ned i Beholderen. Lægetermometret er sædvanlig delt i $^1/_{10}{}^0$, men omfatter kun nogle faa Grader over og under 37 ° C.

Termometer til høje Varmegrader. Naar et almindeligt Kvægsølvtermometer opvarmes, kan Kvægsølvets Fordampning gøre sig gældende allerede ved 100°, ved at en ringe Mængde destillerer op og sætter sig som yderst smaa Draaber i den øvre Del af Røret. Ved højere Temperaturer kan Damptrykket blive saa stort, at Kvægsølvet splittes og derved drives helt op i den øvre Ende af Røret. Af den Grund kan Termometret ikke bruges til Temperaturer højere end 300°. Vil man naa højere op, kan man ikke have lufttomt Rum over Kvægsølvet; der maa være en Luftart over det, hvis Tryk er større end mættet Kvægsølvdamps Tryk ved den højeste Temperatur, Termometret skal kunne vise. Man opnaar dette ved at danne en Udvidelse i den øverste Ende af Røret og ved efter Termometrets Fylding med Kvægsølv at indføre Kulsyre af c. 20 Atmosfærers Tryk i den nævnte Udvidelse, hvorefter Termometret tilsmeltes (Fig. 65). Paa den Maade er man

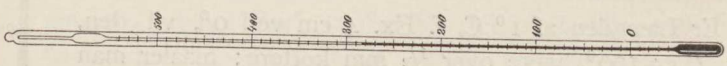


Fig. 65

naaet til over 500° med Kvægsølvtermometret. Beholderen maa have tykke Vægge for at kunne modstaa det høje Tryk, og Termometret maa dannes af tungsmelteligt Glas; hertil egner sig Jenaglas 59 III (se S. 125). Medens det ingen Vanskelighed har at faa løsrevet Kvægsølv i et lufttomt Termometer samlet igen med den øvrige Mængde, kan dette vanskelig lade sig gøre i et Termometer med Kulsyretryk, hvorfor man maa undgaa at give det Stød, der kunne splitte Kvægsølvet.

TERMOMETRE MED ANDRE VÆDSKER. For at naa til højere Temperaturer end det er muligt med Kvægsølv har man erstattet det med mindre flygtige Metaller, som Tin eller en Legering af Kalium og Natrium. A. Dufour har fremstillet Termometre af Kvarts, fyldte med Tin, hvormed man kan naa op til omtrent 1000°.

Ved Maaling af Temperaturer lavere end Kvægsølvets Frysepunkt, omtrent — 39°, er man henvist til at bruge Vædsker, som

væde Rørvæggene. Indtil for faa Aar siden brugtes næsten altid Sprit; det har imidlertid vist sig, at forskellige Sprittermometre ikke stemme overens paa Grund af Vanskeligheden ved at fremstille Vædsken ren; dens lave Kogepunkt hindrer Termometrets Anbringelse i Damp af kogende Vand, og den begynder at stivne ved de meget lave Temperaturer, man nu kan fremstille. Man anvender nu ofte Toluol. Da dets Kogepunkt ligger over 100^0, kan man bestemme baade Frysepunkt og Kogepunkt paa Toluoltermometret; dette kan derfor inddeles uafhængigt af andre Termometre, mens et Sprittermometer maa inddeles ved Sammenligning med et andet Termometer. Toluol kan endvidere fremstilles tilstrækkelig rent; det er mere tyndtflydende end Sprit, saa at det efter et Temperaturfald efterlader mindre Vædske indvendig paa Rørvæggene. Toluol størkner ved -102^0. Til endnu lavere Temperaturer kan man bruge Petroleumsæther, som endnu ikke størkner i draabe-

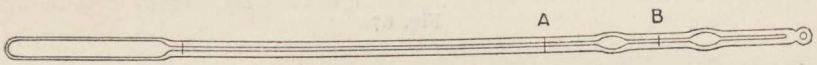


Fig. 66

flydende Luft (-180^0). Fig. 66 viser et Toluoltermometer indrettet til Iagttagelse af Kuldegrader. Nulpunktet er ved *A* og Hundredepunktet ved *B*. Punktet -100^0 er det Punkt, der ligger saa lavt, at Rummet derfra til *A* er lig Rummet mellem *A* og *B*.

TEMPERATURMAALING VED FORSKELLIGE VARMEVIRKNINGER. Fylder man et Bourdonrør (se under Trykmaaling) helt med en Vædske som Sprit eller Toluol, og lukker man derpaa Røret, vil en Opvarmning fremkalde et indvendigt Tryk i Røret; dette vil derfor rette sig noget ud, og da dets Rumfang voxer ved Formforandringen, vil det give Plads for Vædskens Udvidelse trods sin mindre Udvidelseskoefficient. Er den ene Ende af Røret gjort fast, vil den anden flytte sig til den ene eller den anden Side, eftersom Temperaturen stiger eller falder. Man kan paa den Maade indrette Visertermometre og registrerende Termometre; i sidste Tilfælde forbindes den frie Ende af Bourdonrøret *k* i Fig. 67 med den ene Arm af en Vægtstang; dennes anden Arm bærer en Pen, der skriver paa en inddelt Papirflade, som er lagt om en af et Urværk dreven Valse. Forskellen i faste Legemers

Længdeudvidelse kan paa forskellig Maade bruges til Temperaturmaaling (Metaltermometer).

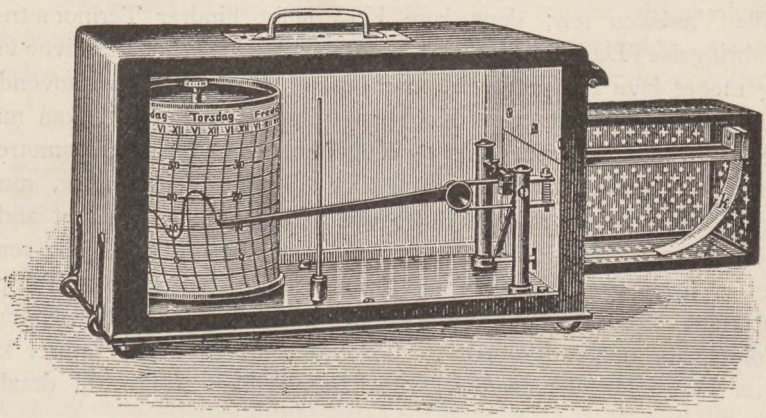


Fig. 67

Elektrisk Temperaturmaaling er grundet paa Temperaturens Indflydelse enten paa et termoelektrisk Elements elektromotoriske Kraft eller paa en Leders elektriske Ledningsmodstand. Den finder Anvendelse, hvor et almindeligt Termometer vilde fylde formeget, eller hvor dets forholdsvis store Masse vilde gøre sig gældende ved et tilsvarende stort Varmeforbrug under Opvarmningen, f. Ex. ved Undersøgelse af Varmestraaler; endelig anvendes den elektriske Temperaturmaaling, hvor Iagttageren af en eller anden Grund er nødt til at være i Afstand fra det Sted, hvor Temperaturen skal maales. Ved meget høje eller meget lave Temperaturer, hvor Vædsketermometret vanskelig kan bruges, anvendes hyppig den elektriske Temperaturmaaling.

Termoelementet giver en Differensmaaling, idet dets Virkning er betinget af Temperaturforskellen paa de to Steder, hvor de to Metaller i Elementet forbindes. Derimod kan Modstandstermometret give en absolut Bestemmelse af Temperaturen, naar man ved Maalingen sammenligner den med Temperaturen varierende Modstand med Modstanden i en Leder af Manganin, hvis Modstand i de fleste Tilfælde vil kunne betragtes som uafhængig af Temperaturen.

Termoelementet bruges saaledes, at man anbringer det ene Forbindelsessted der, hvor Temperaturen skal maales, mens det

andet anbringes i et Rum med en bekendt og konstant Temperatur, f. Ex. i Is. Man maaler den elektromotoriske Kraft enten ved Kompensationsmetoden eller ved at slutte Kredsen gennem et følsomt Galvanometer med stor Modstand, der da tjener som Voltmeter. Man maa i Forvejen have undersøgt Kraftens Afhængighed af Temperaturforskellen. Valget af de to Metaller i Termoelementet bestemmes dels af Størrelsen af den elektromotoriske Kraft dels af Højden af den Temperatur, der skal maales; ogsaa Ledningsevnen kan faa Betydning, hvor det gælder om stor Følsomhed. De omtrentlige Værdier for elektrom. Kraft ved 1^0 Temperaturforskel er i Mikrovolt: for *Bi-Sb* 100, Konstantan-*Fe* 53, Konstantan-*Cu* 40, Patentnikkel-*Fe* 45, Nysølv-*Fe* 25, (*Pt* + 10 % Rhod)-*Pt* 10. En Mikrovolt er en Milliontedel Volt. Det sidstnævnte Element finder særlig Anvendelse ved høje Temperaturer. Elementet Konstantan-*Fe* eller Konstantan-*Cu* anvendes bl. a. ved meget lave Temperaturer, hvor det justeres ved Brinttermometret.

Forbinder man et Termoelement med et Spejlgalvanometer med 10 Ohms Modstand, kan man efter det ovenstaaende for 1 Grads Temperaturforskel gøre Regning paa en Strøm paa 4 Mikroampere. Ved et følsomt Galvanometer kan man iagttage mindre end $^1/_{1000}$ heraf og altsaa mærke en Forskel paa $^1/_{1000}{}^0$.

For smaa Temperaturforskelle kan en termoel. Kraft regnes proportional med Forskellen; for større Forskelle maa man foretage en Sammenligning med et Termometer ved saa mange Grader, at man kan interpolere til de mellemliggende. Efter Rothe gælder en Ligning $t = -a.e + b.e^2$, hvor t er Temperaturen efter Lufttermometret, e den elektrom. Kraft, a og b Konstanter, mellem 0^0 og -190^0 for Konstantan-*Fe* og Konstantan-*Cu* Elementerne. For et *Fe*-Element fandtes $a = 0{,}018341$, $b = 0{,}000\,000943$ og for et *Cu*-Element $a = 0{,}025403$, $b = 0{,}000\,00271$; e er forudsat maalt i Mikrovolt; det ene af Elementets Lodningssteder var anbragt i smeltende Is.

Det elektriske Modstandstermometer dannes af en Leder, hvis Modstand varierer stærkt med Temperaturen. Den anbringes der hvor Temperaturen skal maales, og fra dens Ender føres to Ledningstraade til et Maaleapparat, f. Ex. en Wheatstones Bro med Galvanometer. Maaler man Modstanden først naar Lederen er i Is, og dernæst naar den er i Damp fra kogende Vand, faar man to

Værdier for Modstanden m_0 og m_{100}. Har man ved en ubekendt Temperatur funden Modstanden lig m, vil

$$t = \frac{m - m_0}{m_{100} - m_0} \, 100^0$$

være Temperaturen defineret ved Modstandstermometret. Ved Sammenligning med et Normaltermometer kan man danne en Tabel, hvorved man faar denne Temperatur omsat i den sædvanlige Skala.

Man bruger i Reglen Platin i Modstandstermometret; dets Temperaturkoefficient for Modstanden er ligesom andre ublandede Metallers stor, omtrent $^1/_{250}$; som ædelt Metal modstaar det kemiske Paavirkninger og dermed følgende Forandringer i Modstanden; ved Maaling af høje Temperaturer er dets Tungsmeltelighed af Betydning. Endelig er Platinets forholdsvis store specifiske Modstand et Fortrin; den Leder, der skal maale Temperaturen, ønsker man i Reglen kort; derimod blive Tilledningerne til den fra Maaleapparatet i Regelen lange; alligevel er det nødvendigt at Modstanden i den korte Leder er langt overvejende over Modstanden i Tilledningerne, fordi man ikke kan gøre Regning paa at kende Temperaturen i de sidste nøje; deres Modstand maa derfor være saa ringe, at der kan korrigeres sikkert for de ubekendte Forandringer, der følge med at de delvis opvarmes. Skal imidlertid den korte Leder have den overvejende Modstand uden at blive uhandlelig tynd, maa den have en stor specifisk Modstand.

Efter Undersøgelser af Harker og Chappuis er Forskellen mellem Angivelserne t_k og t_p henholdsvis af Kvælstof- og af Platintermometret mellem -23^0 og $+450^0$ given ved

$$t_k - t_p = \delta \left(\frac{t_k}{100} - 1 \right) \frac{t_k}{100},$$

hvor δ er en Konstant omtrent lig 1,54.

Ved enhver Modstandsmaaling maa der sendes en elektrisk Strøm gennem Lederen, som derfor opvarmes over Omgivelsernes Temperatur; forat undgaa Fejl herved maa man stræbe at holde Strømmen konstant og især indrette sig paa at arbejde med den svagest mulige Strøm ved at gøre Maaleapparatet følsomt. En anden Fejlkilde, der kan opstaa, hidrører fra de termoelektriske Kræfter, der kunne opstaa ved Berøringer indenfor det opvarmede

Rum mellem forskellige Metaller; den imødegaas ved indenfor dette Rum at danne alle Ledningerne af samme Materiale; jo større Modstanden er, des mindre Betydning faa de termoelektriske Kræfter.

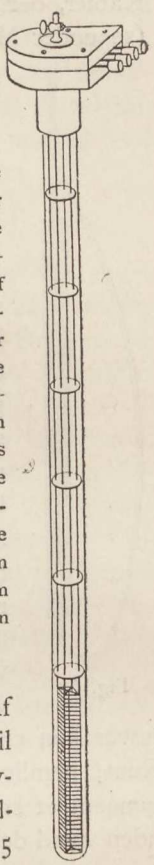


Fig. 68

Fig. 68 viser en Form for Platintermometret. Den tynde Platintraad ses forneden anbragt i et lukket Rør af Glas eller Porcellæn; den er viklet op paa to korslagte lange og smalle Plader af Glimmer; Enderne af den er svejsede til tykkere Platintraade, der som Forbindelsestraade føre op gennem Røret til to af de foroven viste fire Klemmeskruer; disse er fæstede til et Ebonithoved, der lukker Røret foroven. De to andre Klemskruer er forbundne med to Hjælpeplatintraade, der er ganske ens med de ovennævnte Forbindelsestraade, og som er førte ned i Røret parallelt med disse; alle fire Traade støttes ved at være førte gennem Huller i 6 smaa Glimmerskiver. De to Hjælpetraade er indbyrdes forbundne forneden, men isolerede fra de andre Traade; de tjene til ved Modstandssammenligningen at sættes mod Forbindelsestraadene, saa at de ukendte Modstandsforandringer, der fremkomme ved Forbindelsestraadenes Opvarmning, kompenseres. Gennem Hanen i Ebonithovedet kan man fylde Røret med en Luftart, som ikke indsuges ved høj Temperatur af Platinet; ved en saadan Indsugning vilde Modstanden forandres.

Martin Knudsen har benyttet en Leder, dannet af en Saltopløsning (10 % Klorammoniumopløsning) til Maaling af Temperaturen i forskellige Dybder i Havvandet. Opløsninger have meget stor specifisk Modstand og en Temperaturkoefficient, der er omtrent 5 Gange saa stor som Metallernes. Fig. 69 viser Knudsens Modstandstermometer i $^1/_4$ naturlig Størrelse. Et tyndvægget Glasrør er lukket ved begge Ender med Propper. Gennem hver Prop føres der en tyk Kobbertraad, der indadtil fortsættes med en Platintraad, som atter inde i Røret bærer en med Platinsort dækket Platinplade. Rummet mellem Pladerne er udfyldt med Opløsningen. Forat give Lederen stor Modstand og forat faa den til hurtig at antage Omgivelsernes Temperatur bliver der inden i Røret anbragt et smallere, ved den ene Ende lukket Glasrør; herved opnaaes det, at næsten hele Modstanden, omkring 1000 Ohm, findes i det ringformige Rum mellem de to Rør. Det hele faar Stabilitet, ved at Opløsningen gøres stiv ved Tilsætning af Gelatine. De to Kobbertraade fortsættes udenfor Røret med

Kabler, der føre op til Maaleapparatet, en Kohlrausch's Telefonbro (se under Maaling af elektrisk Ledningsmodstand).

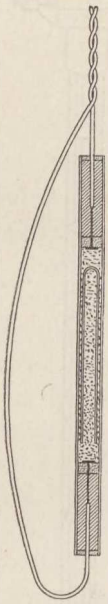


Fig. 69

Naar et Platinmodstandstermometer særlig indrettes til Undersøgelse af Varmestraaler, kaldes det *Bolometer*; Lederen dannes da af Platinfoliestrimler, kun omtrent $^1/_{1000}$ mm tykke, forat forene stor Overflade med ringe Masse; Overfladen sværtes.

PYROMETER kaldes et Termometer, som er skikket til at maale Temperaturer over Glødhede. A. Dufour har som omtalt S. 148 til dette Brug indrettet et med Kvægsølvtermometret overensstemmende Apparat, hvor Glasset er erstattet af Kvarts og Kvægsølvet af Tin. Den efter en Smeltning størknede Kvarts udmærker sig ved at have en yderst ringe Udvidelseskoefficient. Den almindelige Termometerform er dog sædvanlig vanskelig at bruge ved Maaling af meget høje Temperaturer paa Grund af Usikkerheden af Korrektionen for den udestaaende Del af Røret.

I saa Henseende er Lufttermometret meget anvendeligere; da man ved det maaler Temperaturen ved Trykforøgelsen og ikke ved Rumudvidelsen, behøver kun en ringe Del af Luften at være udenfor det opvarmede Rum, nemlig saa meget som maa til for at danne Forbindelse, gennem et snævert Rør, mellem Beholderen og Trykmaaleren foruden hvad der findes i dennes lille skadelige Rum. Lufttermometret har ogsaa været meget anvendt saa højt op, som Beholderens Ildfasthed tillader det. Platinets Anvendelighed i en Ovn begrænses af at dets Vægge i Glødhede blive gennemtrængelige for Luftarter blandt Forbrændingsprodukterne. Dog har man funden, at det, og i særlig Grad en *Pt*-Iridium Legering, er uigennemtrængelig for Kvælstof. Porcellænet er utæt, naar det ikke er glaceret; det kan ikke bruges over 1100°. Anvendeligheden begrænses af Glasurens Smeltning og af, at det ved høje Glødetemperaturer lider varige Rumforandringer.

Lufttermometret bruges i Pyrometrien ligesom ved almindelig Temperaturmaaling i Hovedsagen til ved Sammenligning med andre nemmere Maaleapparater at give Betydningen af disse sidstes Visning; det definerer Temperaturen ogsaa i Glødheden. Nu bruges i Praxis mest et af Le Chatelier indrettet Termoelement dannet af

to Traade, den ene af Platin, den anden af en Legering af Platin og Rhodium (90 Dele Pt + 10 Dele Rh); Traadenderne smeltes sammen i Knaldluftsflammen. I Sammenligning med et Lufttermometer, hvis Beholder af *Pt-Ir* Legering var fyldt med Kvælstof, fandtes Elementets elektromotoriske Kr. E i Mikrovolt udtrykt ved

$$E = -310 + 8{,}048\,t + 0{,}00172\,t^2,$$

hvor t er det ene Forbindelsessteds Temperatur, mens det andet køles til 0^0 i Is. Formlen gælder for det undersøgte Element fra 250^0 til 1100^0 saa nøje, at den største Afvigelse efter Holborn og Day kun er omtrent 1^0. Forskellige Elementer vise ved indbyrdes Sammenligning ikke mere end omtrent 1 Proc. Forskel.

Den Maade, hvorpaa Temperaturen falder henad de to Traade, der danne et Termoelement, kan gøre nogen Forskel i Elementets Visning, fordi et Temperaturfald i en Traad fremkalder en termoelektrisk Kraft, naar Traaden ikke er fuldkommen homogen. Ogsaa i en homogen Traad opstaar der en ringe Virkning af denne Art, Thomsons Virkning, der faar Indflydelse paa Kredsens elektromotoriske Kraft, da den er forskellig for de to Metaller. Om der er nogen kendelig Virkning af den Art kan man prøve ved at opvarme et kortere eller længere Stykke af de fra det varme Lodningssted udgaaende to Traade, mens Lodningsstedet selv holdes ved uforandret Temperatur. Af den Forandring, som det giver den termoelektriske Kraft, kan man slutte sig til Virkningens Størrelse.

Ved meget høje Temperaturer kan Platinet eller Rhodium-Legeringen paavirkes af omgivende Luftarter, saa det termoelektriske Forhold kan lide en lille varig Forandring, og Traadene kan blive skøre; Termoelementet beskyttes herimod ved at anbringes i et snævert og tyndvægget Porcellænsrør.

Platinmodstandstermometret anvendes ogsaa som Pyrometer; det maa beskyttes under Brugen mod mekaniske Paavirkninger og kemiske Forandringer (se Fig. 68), der kunne faa en betydelig Indflydelse paa Modstanden; det er en Vanskelighed ved Brugen, at man næppe har nogen Isolator, som bevarer sin Isolationsevne i de meget høje Temperaturer.

Ved Sammenligningen mellem Pyrometre benyttes nu oftest et Rum, som hedes ved en elektrisk Strøm. Holborn og Day brugte en Cylinder af ildfast Ler, der var 35 cm lang, 5 cm vid og med

en Vægtykkelse paa 3 mm. Den blev omviklet med en Spiral, dannet af en 2 mm tyk Nikkeltraad. Nikkelvindingerne blev overtrukne med udblødt Chamottepulver og udenom blev lagt en eller to Chamottecylindre med Luftmellemrum. Den inderste Cylinder lukkes for begge Ender med Proppe af Chamotte. Ved 1400 Watt kan der i Cylindrens Indre vedligeholdes omtrent 1000^0.

Man kan faa Termoelementer *Pt-Pt,Rh* undersøgt i den før omtalte tyske fys.-tekn. Rigsanstalt; vil man selv bestemme dets Konstanter, kan det ske ved at tilvejebringe i Forvejen kendte Temperaturer og prøve Elementet deri. Nedenstaaende Tabel giver en Række af saadanne.

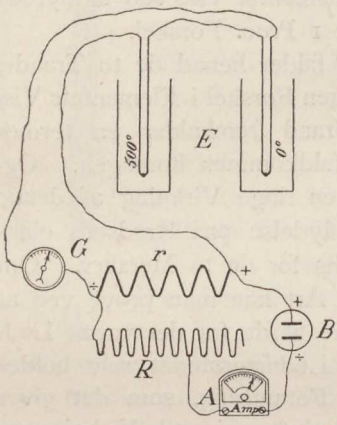


Fig. 70

	Smeltepunkt	Kogepunkt
Cadmium	321,7°	
Bly	326,9	
Zink	419,0	
Svovl		445,2°
Antimon	630,6	
Aluminium	657	
Cadmium	omtr. 750	
Zink	omtr. 940	
Sølv i Luften	955	
Rent Sølv	961,5	
Guld	1064,0	
Kobber i Luften	1064,9	
Rent Kobber	1084,1	

Et bekvemt Kompensationsapparat til Maaling af de smaa termoelektriske Kræfter er vist i Fig. 70. *B* er en Akkumulator, der sender Strøm gennem en variabel Modstand *R* og en konstant lille Modstand *r* samt gennem et rigtig visende Amperemeter *A*. Skal man f. Ex. maale omkring 500^0 med et *Pt-Pt,Rh* Element *E*, da er dettes elektromotoriske Kraft efter Formlen omtrent 4000 Mikrovolt = 0,004 Volt. Denne Kraft skal holdes i Ligevægt af Strømspændingen i Modstanden *r*, hvorfor Termoelementets Poler forbindes med Enderne af *r* som vist i Figuren, og i dets Kreds indskydes der et følsomt Galvanoskop *G*. Under Maalingen varierer man Strømmen fra Akkumulatoren ved den variable Modstand *R*, til Galvanoskopet viser, at Strømmen er Nul i Termoelementet. Viser i det Tilfælde Amperemetret *i* Amp., da er der en Strømspænding *ir* i Modstanden *r*, og saa stor maa den termoelektriske

Kraft være. I det forudsatte Tilfælde skal altsaa $ir = 0{,}004$ Volt. Kan Amperemetret vise Strømme fra 0 og indtil 0,15 Amp., kan man passende arbejde med en Strøm $i = 0{,}12$ Amp., og i saa Fald skal man have $0{,}12.r = 0{,}004$, altsaa $r = 1/30$ Ohm. Da Akkumulatorens elektromotoriske Kraft er omtrent 2 Volt, skal R være 16—17 Ohm.

Følsomheden af et Maaleapparat, som det i Fig. 70 viste, kan findes saaledes. Efter Formlen vil den termoelektriske Kraft stige omtrent 8 Mikrovolt eller omtrent $1/500$ af sin Værdi for hver Grad t stiger over de 500^0. Forat kompensere en saadan Stigning maa Strømmen i r ogsaa forøges med $1/500$ af sin Værdi, altsaa med $1/500 \cdot 0{,}12$ Amp. $= 0{,}00024$ Amp; er der 150 Inddelinger paa Amperemetrets Kreds, svarer hver Inddeling til 0,001 Amp., og man vil kunne se en Forandring paa 0,0001 Amp. En Grads Forandring i Temperaturen vil altsaa kunne iagttages, forudsat, at Galvanoskopet G er følsomt nok; det skal kunne gøre et synligt Udslag for 8 Mikrovolt; hvis Modstanden i Termoelementet og Galvanoskopet er f. Ex. 10 Ohm tilsammen, skal Galvanoskopet gøre et synligt Udslag for 0,8 Mikroampere $= 8 \cdot 10^{-7}$ Ampere, hvad man let kan opnaa med et Spejlgalvanometer.

Forat faa konstante Resultater af et Termoelement maa man iforvejen ophede de Traade, hvoraf Elementet dannes, til Anløbning eller til Glødning efter Materialets Art. Ophedningen sker bedst ved at sende en stærk elektrisk Strøm igennem Traaden.

KONSTANTE TEMPERATURER. Skal et Legeme, som er udsat for Varmetab, fordi det er varmere end sine Omgivelser, dog holde konstant Temperatur, maa man tilvejebringe en Varmetilførsel, som til enhver Tid opvejer Varmetabet; omvendt hvis Legemet er koldere end Omgivelserne. En saadan Opvejning kan foregaa af sig selv, naar man har med Smeltning eller Kogning at gøre. I et Kar, som er fyldt med en ligelig Blanding af findelt Is og Vand, holdes Temperaturen 0^0 konstant vedlige, selv om Karret staar i varm Luft. Dette forklares saaledes: indenfor enhver lille Del af det Rum, som optages af Blandingen, er der saavel Is som Vand tilstede. Hvert Iskorn er i Berøring med Vand, og enhver Vanddel har Is i sin umiddelbare Nærhed; trods begges ringe Varmeledningsevne vil derfor Temperaturforskelle mellem Is og Vand hurtig udjævnes; den hele Masse faar altsaa samme Temperatur; men den eneste Temperatur, som Is og Vand kan have

fælles, naar de er i Berøring med hinanden, er 0° C. Vandet ved Karvæggene modtager Varme fra disse; men denne Varme bruges til Smeltning af de nærmeste Iskorn og kan derfor ikke fremkalde nogen Temperaturstigning indenfor, saalænge Vandet ikke ved Smeltning af Is er blevet det overvejende. Isens store Smeltevarme og Vandets store Varmefylde bidrager i høj Grad til, at Temperaturen kan holdes meget længe konstant, selv om man ikke har isoleret Karret mod Varmetilførsel; det er ogsaa af Betydning, at Iskornene ikke klumpe sig sammen, hvad der ofte ellers er Tilfældet naar man har med en Blanding af fast og smeltet at gøre.

I kogende Vand er Temperaturen tilnærmelsesvis konstant, fordi Overskuddet af tilført Varme forbruges til Dampdannelsen, og naar Vand og Damp bestaa ved Siden af hinanden, maa begge have den til det tilstedeværende Tryk svarende Temperatur for mættet Damp. Dette Tryk er imidlertid ikke helt konstant ved Dannelse af en Dampboble, idet Haarrørstrykket, der er stort i en lille Boble, aftager idet Boblen voxer. Temperaturen svinger derfor i det kogende Vand med et Spillerum, der voxer efterhaanden som Luften koges ud. Anderledes er det i et Rum, hvor den af en kogende Vædske udviklede Damp strømmer ind; er Væggene udsatte for Afkøling udefra, vil en Del af Dampen fortætte sig til Vædske, der sidder som et tyndt Lag indvendig paa Væggene og paa de Ting, der findes i Rummet; dette tynde Lag Vædske har gode Betingelser for at komme i Temperaturligevægt med Dampen, naar Varmeafledningen ikke er for stor, idet begge vil antage den Temperatur, der hører til mættet Damp under det forhaandenværende Tryk; holdes dette konstant, vil ogsaa Temperaturen være konstant.

Naar man ved Kogning vil holde konstant Temperatur i ubegrænset Tid, maa man sørge for, at Vædskemængden ikke koger bort; det kan opnaaes ved at fortætte den udtjente Damp og lede den derved dannede Vædske tilbage til Kedlen, hvor Kogningen foregaar. Fig. 71 viser en Metalkedel og Fig. 72 en Glaskolbe indrettet til Kogepunktsbestemmelser. I Fig. 71 danner Røret *r* en Forbindelse mellem de af henholdsvis Vædske og Damp fyldte Rum; det er omgivet af et Svalerør, hvorigennem der ledes koldt Vand fra neden opad. Gennem et Siderør *s* føres det konstante Tryk ind i Kedlen, som foroven er lukket med et paaskruet Laag. Termometer eller hvad der ellers skal anbringes i Dampen kan fæstes i en Prop, som sidder i en Tubus i Laaget.

Karret er med Undtagelse af den nederste Del omgivet med et Lag Filt til Varmeisolation. Ved Glaskolben i Fig. 72 nøjes man med en i et Siderør anbragt Glasrørsspiral forat frembringe Dampfortætningen; Kogningen maa ikke være stærkere, end at Afkølingen til Luften kan fortætte Dampen. Den nedløbende kolde Vædske maa ikke løbe ned langs Indersiden af Kolbens Hals for ikke at fortætte Damp der; den føres ned til i Nærheden af Vædskeoverfladen gennem Siderøret *r*, hvis Bugt tjener som Vandlaas til at hindre, at Dampen gaar den Vej.

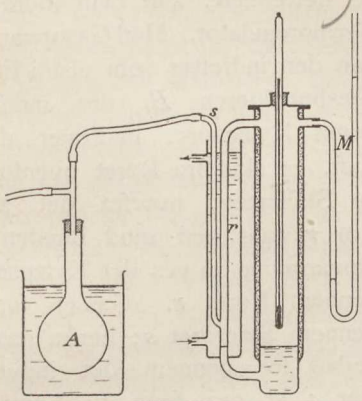


Fig. 71

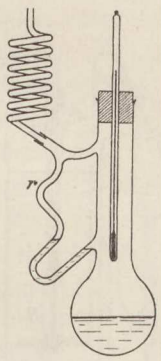


Fig. 72

I et Kogekar, som har Forbindelse med den fri Luft, faar man den Temperatur, der svarer til den øjeblikkelige Barometerstand. Andre Temperaturer kan man indenfor visse Grændser faa frem ved at variere Trykket i Kedlen. Dette kan ske ved en Kedel, som den i Fig. 71 viste, naar man forbinder Røret *s* med en tilpas stor, lukket Luftbeholder, hvor Temperaturen og derfor ogsaa Trykket holdes konstant, ved at Beholderen omgives med Vand af Stuetemperaturen. Luftbeholderen maa være stor, for at Uregelmæssigheder i Dampudviklingen i Kedlen ikke skal faa kendelig Indflydelse paa Luftens Tryk; gør man ved en Pumpe dette større eller mindre end Atmosfærens, faar man Temperaturer over eller under Kogepunktet. Man kan dog ikke gaa meget langt ned med Trykket, da Kogningen saa bliver for uregelmæssig. Vil man nøjes med at forandre Kogepunktet 1—2°, kan man nøjes med de i Fig. 71 viste Tilføjelser til Kogekarret; *A* er en Kolbe, f. Ex. 1 Liter stor; den er fyldt med Luft og staar ned i en Skaal med Vand. I Proppen er anbragt et T Rør; fra dets ene Gren fører

en Kautsjukslange til Røret *s*. Gennem den anden Gren, der er forsynet med en Slange med Klemhane, kan man puste Luft ind, til man faar den Temperatur, man ønsker. Et Vandmanometer *M* viser Trykket og tjener tillige som Sikkerhedsventil.

Kan man ikke bruge Kogning af en Vædske til Tilvejebringelse af den konstante Temperatur, hjælper man sig sædvanlig med et Vædskebad, et Kar med en Vædske, som man søger at opvarme under saadanne Forhold, at den afgivne og den modtagne Varmemængde blive lige store, naar den søgte Temperatur er naaet. Vil man ikke overvaage dette selv, kan man indrette en Termoregulator. Med Gasopvarmning kan den indrettes som vist i Fig. 73. Glasbeholderen *B*, der indeholder noget Kvægsølv, hvorover der er Luft, er skilt fra Røret ovenfor ved en Skillevæg, hvorfra det snævre Rør *r* gaar ned mod Bunden; ved Opvarmning drives der Kvægsølv op gennem Røret *r*. Gassen føres til gennem Siderøret *s*; herfra gaar den nedad for gennem det indvendige Rør *i* at naa frem til Lampen; i Væggen paa dette sidste Rør er der boret et fint Hul *h*. Saalænge Kvægsølvet staar lavt, gaar Gassen gennem den nederste Munding af Røret *i*, Lampen brænder fuldt, men stiger det, saa at Mundingen spærres, er der ingen anden Vej for Gassen end det snævre Hul *h*, og Lampen brænder lavt. Hvis det lave Blus ikke kan vedligeholde den Temperatur, der maa til for at spærre Rørmundingen, afkøles nu Badet; men herved trækker Kvægsølvet sig tilbage, og Flammen stiger atter; paa den Maade svinger Badets Temperatur med et Spillerum paa omtrent $^1/_4{}^0$; nogen egenlig konstant Temperatur faaes altsaa ikke. For at udjævne Temperaturforskelle i Badet og fremme Varmebevægelsen fra og til Beholderen *B*, røres Vædsken rundt, f. Ex. som vist i Fig. ved en Ring, der ved Forbindelse med en paa en langsomt gaaende Axe *O* anbragt Krumtap føres op og ned i Karret. Man bruger ogsaa ofte en paa en Axe anbragt Skruevinge, som ved at gaa rundt i Vædsken holder denne i Strømning (se Fig. 74)

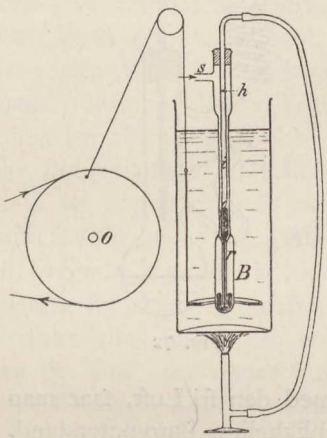


Fig. 73

Spillerummet for Temperatursvingningerne er betinget af den Tid det varer, før den ved Blussets Stigen tilførte Varmemængde naar frem til Beholderen; der vil altid være tilført for megen Varme, inden Modvirkningen indtræder; i et Metalkar reguleres der finere end i et Glaskar. Man formindsker Spillerummet ved at forøge Regulatorens Følsomhed for Temperaturforandringer; dette kan ske ved i Beholderen *B* istedenfor Luft at have en ringe Mængde af en Vædske, som har sit Kogepunkt i Nærheden af den Temperatur, der skal holdes konstant.

En Temperatur, der holder sig uforandret, fordi Tilførsel og Tab af Varme er lige store, kaldes stationær. For saa nær som mulig at naa den stationære Tilstand maa man søge efter en konstant Varmekilde og uforandrede Afkølingsforhold. Jo bedre Karret er isoleret, des mindre bliver den nødvendige Varmetilførsel, og des mindre bliver i Reglen ogsaa dermed Variationerne. Opvarmning ved Gas er ikke meget konstant, blandt andet fordi Varmen tilføres udefra, saa at varierende Luftstrømninger kan gøre sig gældende. Langt bedre er i saa Henseende Opvarmning ved den elektriske Strøm. Da Strømlederen har en ringe Masse, og da den kan anbringes midt inde i den Vædske, hvis Temperatur skal holdes stationær, udbreder Varmen sig meget hurtig i Vædsken. De to Forhold, hvoraf den udviklede Varmemængde afhænger, nemlig Strømstyrke og Ledningsmodstand, kunne med Lethed holdes konstante. Fig. 74 viser Hoveddelene af et Bad for stationær Temperatur, som benyttes i den tyske fysisk-tekniske Rigsanstalt. Det er konstrueret af Rothe til Sammenligning af Termometre ved Temperaturer mellem 100° og 500° og bestaar af et Bægerglas, hvis nederste Del er isoleret ved Omvikling med Asbestsnor og der udenom ved et dobbeltvægget Kobberkar. Inde i Bægerglasset er en hul Lercylinder *E* anbragt; den hænger ned fra et Aluminiumslaag, som lukker Bægerglasset foroven. Lercylinderen er omviklet med en $^3/_4$ mm tyk Konstantantraad, som fortsættes med Kobberledninger op gennem Laaget. Paa en Akse, som fører fra det nederste af Cylinderen op over Aluminiumslaaget, er der anbragt to Skruevinger, som ved at drejes rundt bringer Vædsken i Bægerglasset i Cirkulation. Sendes en elektrisk Strøm med Styrke

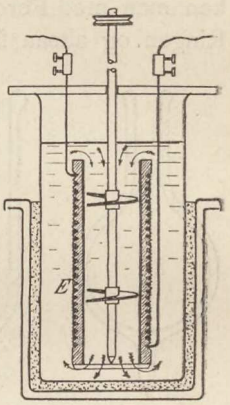


Fig. 74

fra 2 til omtrent 5 Amperer gennem Konstantantraaden, kan man vedligeholde stationære Temperaturer varierende fra 100° til omtrent 300°. Vædsken maa være ikkeledende, man kan bruge Olivenolie eller Palmin (størkner ved + 30°). Ved højere Temperaturer maa man nøjes med Luftbad. Med dette Apparat har man i Løbet af 10 Minuter kunnet holde en Temperatur paa 150° uforandret paa $^1/_{100}$° nær. Naar man ikke bruger elektrisk Opvarmning kan man bruge smeltede Salte (f. Ex. Salpeter) som Vædske ved de høje Temperaturer. Tilvejebringelse af konstante Glødetemperaturer er omtalt S. 155—156.

Elektrisk Opvarmning i Forbindelse med en Ringrører (Fig. 73) kan man med Fordel bruge saaledes, at Strømlederen opvikles paa Ringen og altsaa føres med op og ned i Vædsken.

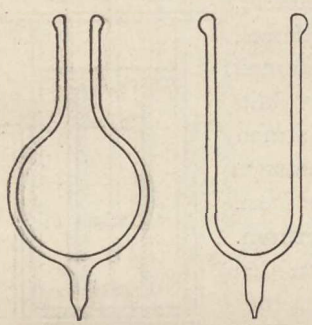


Fig. 75

Konstante Kuldegrader kan for enkelte Temperaturers Vedkommende faaes ved Kuldeblandinger: Mættet Kogsaltopløsning og Is — 21°, Chlorcalcium og Is — 42°, fast Kulsyre og Vinaand — 79°, eller ved Frysepunkter: Ammoniak — 79°, Toluol — 102°, Svovlkulstof — 113° og Æther — 118°. Draabeflydende Luft vedligeholder en næsten konstant Temperatur ved omtrent — 190°; da Kvælstofvædskens Kogepunkt ligger lavere end Iltvædskens, stiger Temperaturen 4 til 5°, mens Vædsken staar hen. Arbejdet med de lave Temperaturer lettes i høj Grad ved Brugen af de saakaldte *Dewarske Kar*: Kolber eller Bægerglas med dobbelte Glasvægge, hvor Mellemrummet mellem Væggene er pumpet tomt ved Kvægsølvluftpumpen og derpaa tilsmeltet (Fig. 75). Varmeledningen gennem Væggene er derved næsten hævet. For at formindske Tilførslen af Varme ved Straaling forsølver man ofte Glasvæggene paa de mod det tomme Rum vendende Sider.

Bestemmelse af Smeltepunkter. Den bedste Maade at bestemme et Stofs Smeltepunkt paa er den, der ovenfor, S. 157, er omtalt for Isens Vedkommende: at tilvejebringe en ligelig Blanding af det smeltede Stof og af det faste i findelt Tilstand; vedligeholdes den tilstrækkelig længe, vil et Termometer i Blandingen vise Smeltepunktet som en i rum Tid konstant Temperatur. Det er dog ofte vanskeligt at tilvejebringe nævnte Blanding, dels fordi

Stoffets Art ikke egner sig dertil, dels fordi det er vanskeligt at varmeisolere Karret, som rummer Stoffet; er Smeltevarmen ikke stor, vil der kunne størkne eller smelte større Mængder af Stoffet, før Temperaturudjævningen kan finde Sted. I mange Tilfælde vil man foretrække at smelte hele Stofmængden, anbringe Termometret deri og derpaa sørge for en langsom Afkøling dels ved Isolation, f. Ex. ved en Luftkappe, idet man sætter Karret ned i et andet, tomt og lidt videre Kar, dels ved at holde Omgivelsernes Temperatur kun lidt lavere end Smeltepunktet; det sidste opnaaes bedst ved Varmen fra en elektrisk Strøm, der føres gennem Vindinger lagte udenom Smeltekarret. Iagttager man Termometret med konstante Tidsmellemrum, mens man rører rundt i Stoffet, vil man først finde et nogenlunde jævnt Temperaturfald; men naar Størkningen begynder, bliver der Smeltevarme fri, saa at Varmetabet til Omgivelserne delvis opvejes, hvorfor Faldet bliver langsommere; er der dannet en tilstrækkelig Mængde fast Stof, kan det ske, at Temperaturen holder sig uforandret i længere Tid, og er det meste størknet, vil Temperaturen atter falde jævnt. Temperaturfaldet i et saadant Forsøg kan forløbe paa den i Fig. 76 viste Maade, hvor Abscissen X er Tiden, Ordinaten T Temperaturen. Smeltepunktet vil være fremstillet ved Ordinaten til den vandrette Del af Kurven med des større Sikkerhed, jo længere dette Stykke er, d. v. s. jo længere Tid Temperaturen har holdt sig konstant.

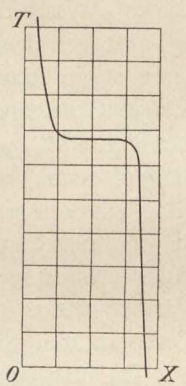


Fig. 76

Har man faaet det smeltede Stof *underafkølet*, og indleder man derpaa Størkningen ved at indføre en Krystal af det faste, vil Temperaturen stige op mod Smeltepunktet, samtidig med at en til Underafkølingens Størrelse svarende Stofmængde størkner; herved kan man faa en god Bestemmelse af Smeltepunktet.

Man kan bestemme Smeltepunktet saaledes, at man anbringer en ringe Mængde af det faste Stof i Omgivelser, hvis Temperatur man lader stige langsomt, idet man iagttager Temperaturen i det Øjeblik, da man enten ser eller paa anden Maade skaffer sig at vide, at Smeltningen indtræder. Denne Fremgangsmaade kan især med Fordel bruges overfor Metallerne, hvis store Varmeledningsevne gør, at hele Mængden smelter paa een Gang. Hvis man ikke kan se, naar Smeltningen indtræder, kan man indrette det saaledes, at en elektrisk Strøm, som er sluttet gennem det faste Metal, brydes, naar

Metallet smelter og af den Grund løber fra sin Plads; et Galvanoskop giver Smeltningen tilkende.

En Opløsnings Frysepunkt er den for Opløsningsmidlet i fast Form og for Opløsningen fælles Temperatur, ved hvilken de to Dele kunne bringes sammen, uden at der finder enten Frysning eller Smeltning Sted, idet det forudsættes, at der hverken gaar Varme til eller fra Stofferne. Da Frysepunktet afhænger af Opløsningens Styrke, er der Vanskeligheder forbunden med dets Bestemmelse. Denne grundes sædvanlig paa Underafkøling; man anbringer Opløsningen i et Kar med et Termometer og en Omrører og afkøler den ved en Kuldeblanding til lidt under Frysepunktet. Herefter indleder man Frysningen ved at indbringe et Iskorn i Vædsken (under Forudsætning af en vandig Opløsning), og iagttager derefter Termometret under livlig Omrøring; Temperaturen stiger hurtig til et Maximum, hvorefter den langsomt falder. Kunde Opløsningen varmeisoleres fuldstændig, efter at Frysningen var indtraadt, vilde Temperaturen holde sig konstant efter Stigningen, naar Omrøringen var ophørt; den konstante Temperatur vilde være Frysepunktet, ikke for den oprindelige Opløsning, men for den noget stærkere, der bliver tilbage efter Isdannelsen. Fortsattes Omrøringen, vilde det til den anvendte Arbejde frembringe Varme, altsaa indlede en Smeltning af den dannede Is, hvorfor Temperaturen vilde stige langsomt.

Da man ikke kan faa fuldstændig Varmeisolation, og da Opløsningen staar i koldere Omgivelser, vil Frysningen fortsættes ogsaa efter at Underafkølingen er hævet, og Temperaturen vil falde, fordi Opløsningens Styrke tiltager. Maximumstemperaturen kan ikke paaregnes at være det nøjagtige Frysepunkt, fordi den ringe Mængde Is ikke kan beherske Temperaturen i den forholdsvis store Mængde Opløsning; Temperaturen vil samtidig være betinget af Varmetabet til Omgivelserne og af Varmeudviklingen fra Omrøringen; denne maa være livlig for at sikre ens Temperatur overalt i Vædsken. Hertil kommer, at Opløsningens Styrke forandres ved Isdannelsen. Jeg har benyttet den gode Varmeisolation i et Dewars Kar til Bestemmelse af en Opløsnings Frysepunkt som en i ubegrænset lang Tid konstant Temperatur. Karret, Fig. 77, stoppes fuldt af findelt Is; gennem et Spiralrør af Metal med mange Vindinger, som i Forvejen er anbragt i Karret, og som omslutter Termometret, føres Opløsningen til Isen ved Karrets Bund. Herved vil der strax smelte en ringe Mængde Is, samtidig

med at Temperaturen falder; Opløsningen fortyndes, men den ny Opløsning, som derefter føres til, vil forud være afkølet i Vindingerne til den lavere Temperatur; den vil fortrænge den fortyndede Opløsning og ved Berøring med Isen fremkalde en yderligere Afkøling. Is og Opløsning ville derfor begge stadig nærme sig til den Temperatur, som er Opløsningens Frysepunkt; naar det praktisk talt er naaet, holder Temperaturen sig konstant, saa længe Opløsningen yderligere føres til; denne passerer, før den naar Spiralrøret i Dewars Kar, et Bad, hvor den afkøles til i Nærheden af sit Frysepunkt.

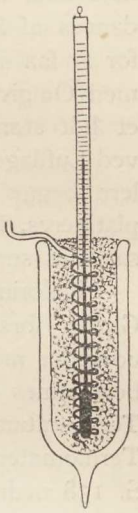


Fig. 77

MAALING AF VARMEMÆNGDER. Enheden for Varmemængder, Varmeenheden eller *Kalorien*, er den Varmemængde man maa tilføre 1 gr Vand for at opvarme det 1^0; denne Enhed er dog ikke ganske konstant, da den er forskellig efter Vandets Temperatur. Man har bestemt den nærmere ved at vælge Opvarmningen $0^0 — 1^0$ (kal_0, Regnault) eller ved at bruge Middelkalorien kal_m, der er $^1/_{100}$ af Varmemængden ved Opvarmningen $0^0 — 100^0$; nu bruges sædvanlig kal_{15} svarende til Opvarmningen $14{,}5^0 — 15{,}5^0$. Forskellen mellem de forskellige Enheder er omtrent $^1/_2$ Procent, men den er ikke nøje kendt; dette har ikke synderlig praktisk Betydning, da man ved de hidtil brugte Kalorimetermetoder vanskelig naar en Nøjagtighed, overfor hvilken den tilstedeværende Usikkerhed faar nogen Betydning. Man sætter

$$1\ kal_0 = 1{,}006\ kal_{15}, \qquad 1\ kal_m = 1{,}003\ kal_{15},$$
$$1\ kal_{15} = 4{,}19 \cdot 10^7\ Erg = 4{,}19\ Joule.$$

Isens Smeltevarme sættes til 80,1 kal_{15}. 1 gr Is af 0^0 rummer 1,0908 cm^3; heraf følger, at der maa tilføres en Blanding af Vand og Is 884 kal_{15}, forat dens Rumfang skal formindskes med 1 cm^3.

Blandingskalorimetret bestaar af et Metalkar med Omrører og Termometer og mulig andet Tilbehør. Karret hældes omtrent fuldt af Vand eller anden Vædske. Tilføres der Kalorimetret en Varmemængde Q, vil Termometret vise en med Varmemængden proportional Temperaturstigning t, saa at $Q = V.t$. Konstanten V kaldes Kalorimetrets Vandværdi, d. v. s. den Vandmængde, som til 1

Grads Opvarmning kræver lige saa megen Varme som hele Kalorimetret, Vædsken indbefattet, kræver. Vejer Kalorimetrets enkelte Dele m_1, m_2, m_3 . . ., og er deres Varmefylder c_1, c_2, c_3 . . ., bliver

$$V = m_1 c_1 + m_2 c_2 + m_3 c_3 \ldots$$

For de Tings Vedkommende, hvoraf kun en Del er nedsænket, maa man kun regne med denne Dels Masse. Karret maa helst dannes af Metal, da Vægge af slet ledende Materiale er udsatte for at faa en fra Vandets afvigende Temperatur. Varmeudvexlingen med Omgivelserne formindskes ved at Kalorimetret stilles indeni et lidt større Metalkar, hvorfra det varmeisoleres sædvanlig kun ved Luftlaget; Straalingens Indflydelse formindsker man ved at polere begge Kar blanke (uden Lakovertræk), i hvilken Hensigt de platineres, forgyldes eller fornikles. Omrøreren indrettes sædvanlig saaledes som det er vist i Fig. 73.

Kalorimetrets Temperatur maa under Forsøget kun være faa Grader forskellig fra Luftens, forat den Varmemængde, som det udvexler med Omgivelserne, ikke skal blive for stor til at kunne bestemmes godt; man faar af den Grund kun nogle faa Graders Temperaturstigning at maale, hvorfor man maa anvende et følsomt Termometer. Termometrets Beholder maa helst være lille af den S. 138 nederst nævnte Grund. Man maa ved metalklædte Skærme beskytte Kalorimetret mod Straaler fra Omgivelserne.

Ved et Kalorimeterforsøg maa man kende Kalorimetrets Temperatur, Begyndelsestemperaturen t_1, i det Øjeblik, da Varmetilførslen begynder; der forløber nogen Tid, inden Varmetilførslen og Temperaturudjævningen er færdige, og i denne Tid taber Kalorimetret Varme. Opgaven ved Forsøget er at finde den Temperatur, Slutningstemperaturen t_2, som Kalorimetret vilde faa, hvis den tabte Varme blev ført tilbage til det igen. Forsøget udføres saaledes: Man fylder Kalorimeterkarret til 1 eller 2 cm fra Randen med en afvejet Vandmængde, som man helst giver en Temperatur noget lavere end Luftens, hvis Varmetilførslen er positiv. Efter at der er rørt nogen Tid, iagttager man Temperaturen med lige store Tidsmellemrum, f. Ex. hvert Minut; til Tiderne 0, 1, 2 . . . $n-1$ iagttages Temperaturene ϑ_0, ϑ_1, ϑ_2 . . . ϑ_{n-1} (se Exemplet S. 168). I det næste Minut forbereder man Varmetilførslen saaledes, at den begynder til Tiden n, til hvilken Tid man sædvanlig undlader at iagttage Temperaturen. Idet Omrøringen stadig fortsættes,

vedbliver man med Temperaturiagttagelserne: til Tiderne $n + 1, n + 2, \ldots n + p$ iagttages Temperaturene $\vartheta'_1, \vartheta'_2 \ldots \vartheta'_p$. Man fortsætter Iagttagelserne saa længe, at man faaer et konstant Temperaturfald i de sidste Minutter; idet dette indtræder i Minuttet $n + q$, vedvarer det i $p - q$ Minutter. Man sørger for, at $p - q$ bliver omtr. lig n, eventuelt ved at stryge de sidste Iagttagelser.

Iagttagelserne kan man behandle efter følgende Regel (se Exemplet). Vandværdierne V_1 og V_2 før og efter Varmetilførslen forudsættes kendte. V_2 vil være forskellig fra V_1 i de Tilfælde, hvor Varmemængden medføres af et Legeme, som bliver i Kalorimetret. Man beregner Temperaturfaldet pr. Minut τ før Varmetilførslen og det konstante Fald τ' i de sidste $p - q$ Minuter samt Middeltallene ϑ_M og ϑ'_M:

$$\tau = \frac{\vartheta_0 - \vartheta_{n-1}}{n - 1}, \quad \tau' = \frac{\vartheta'_q - \vartheta'_p}{p - q}, \quad \vartheta_M = {}^1/_2 (\vartheta_0 + \vartheta_{n-1}),$$

$$\vartheta'_M = {}^1/_2 (\vartheta'_q + \vartheta'_p).$$

Man faar nu Begyndelsestemperaturen

$$t_1 = \vartheta_{n-1} - \tau$$

Slutningstemperaturen t_2 finder man ved at gaa tilbage fra den sidst iagttagne Temperatur ϑ'_p. Er der i de sidste p Minuter tabt Varmemængden X, vil man have $V_2 t_2 = V_2 \vartheta_p + X$, $t_2 = \vartheta_p + X/V_2$. Forat finde den i de p Minuter tabte Varmemængde beregner man Middeltemperaturen t'_M for disse Minutter.

$$t'_M = {}^1/_p (\vartheta'_1 + \vartheta'_2 + \ldots \vartheta'_p - {}^1/_2 (\vartheta'_p - t_1)).$$

Man vil da have

$$X = p \left(\tau' - \frac{\vartheta'_M - t'_M}{\vartheta'_M - \vartheta_M} \left(\tau' - \frac{V_1}{V_2} \tau \right) \right) V_2,$$

$$t_2 = \vartheta_p + p \left(\tau' - \frac{\vartheta'_M - t'_M}{\vartheta'_M - \vartheta_M} \left(\tau' - \frac{V_1}{V_2} \tau \right) \right).$$

Vandværdien beregner man, hvis man kender de enkelte Deles Masser og Varmefylder. Termometrets Vandværdi findes lig 0,46 u, hvor u er den nedsænkede Dels samlede Rum af Glas og Kvægsølv, hvilke Stoffer begge have Vandværdien 0,46 for 1 cm^3. Kan

man ikke regne sig til Vandværdien, finder man den ved at gøre et Kalorimeterforsøg, hvor man tilfører en bekendt Varmemængde, f. Ex. ved at tilsætte varmt Vand eller udvikle elektrisk Strømvarme i Kalorimetret.

Exempel. 72,5 gr Svovl blev smeltet og opvarmet til 129,5° og med denne Temperatur hældt ned i et Kalorimeter. Vandværdierne vare $V_1 = 520$ $V_2 = 520 + 72{,}5 \cdot 0{,}163 = 532$. Nedenfor findes opført Temperaturiagttagelserne og de Udregninger, som føre til de to søgte Temperaturer t_1 og t_2.

Tid	Temper.	
0	$\vartheta_0 = 16{,}155$	$\tau = \frac{\vartheta_0 - \vartheta_{n-1}}{n-1}$, $\vartheta_M = {}^1/_2(\vartheta_0 + \vartheta_{n-1})$, $t_1 = \vartheta_{n-1} - \tau$.
1	155	
2	16	
3	16	
4	16	$\tau = \frac{16{,}155 - 16{,}17}{10} = -0{,}0015$
5	16	$t_1 = \mathbf{16{,}172^0}$.
6	165	$\vartheta_M = \frac{1}{2}(16{,}155 + 16{,}17) = 16{,}16$
7	165	
8	165	
9	17	
$n-1=10$	$\vartheta_{n-1} = 16{,}17$	$\tau' = \frac{\vartheta'_q - \vartheta'_p}{p-q}$ $\vartheta'_M = \frac{1}{2}(\vartheta'_q + \vartheta'_p)$,
$n=11$	$t_1 = 16{,}172$	$t'_M = {}^1/_p(\vartheta'_1 + \vartheta'_2 + \ldots \vartheta'_p - \frac{1}{2}(\vartheta'_p - t_1))$
$n+1=12$	$\vartheta'_1 = 19{,}70$	$t_2 = \vartheta_p + p\left(\tau' - \frac{\vartheta'_M - t'_M}{\vartheta'_M - \vartheta_M}\left(\tau' - \frac{V_1}{V_2}\tau\right)\right)$
13	20,10	
14	20,17	
15	20,18	
$n+q=16$	$\vartheta'_q = 20{,}15$	$\tau' = \frac{20{,}15 - 19{,}79}{10} = +0{,}036$
17	20,11	$\vartheta'_M = \frac{1}{2}(20{,}15 + 19{,}79) = 19{,}97$
18	20,07	$t'_M = \frac{1}{15}(299{,}77 - 1{,}81) = 19{,}864$
19	20,03	$V_1 = 520$, $V_2 = 532$
20	20,00	$t_2 = 19{,}79 + 15(0{,}036 - \frac{0{,}11}{3{,}81}0{,}0345)$
21	19,97	$= 19{,}79 + 0{,}525$
22	19,93	$t_2 = \mathbf{20{,}315^0}$.
23	19,89	
24	19,86	
25	19,82	
$n+p=26$	$\vartheta'_p = 19{,}79$	

Det smeltede Svovl har ved at afkøles til 20,315° afgivet $V_1(t_2 - t_1) = 2160$ Varmeenheder.

Rigtigheden af ovenstaaende Udtryk for den tabte Varmemængde X godtgøres saaledes. Kalorimetrets Varmetab pr. Minut afhænger af dets Temperatur. Det gennemsnitlige Varmetab pr. Minut ξ i de p Minuter efter Varmetilførslens

Begyndelse svarer til den ovenfor beregnede Middeltemperatur t'_M; dette Varmetab kan findes ved Interpolation, fordi man kender Varmetabene pr. Minut i de første n og i de sidste q Minuter; de er nemlig $V_1\tau$ og $V_2\tau'$ svarende henholdsvis til Middeltemperaturerne ϑ_M og ϑ'_M. Interpolationen giver

$$\frac{V_2\tau' - \xi}{V_2\tau' - V_1\tau} = \frac{\vartheta'_M - t'_M}{\vartheta'_M - \vartheta_M}, \qquad \xi = V_2\tau' - \frac{\vartheta'_M - t'_M}{\vartheta'_M - \vartheta_M}(V_2\tau' - V_1\tau).$$

I samtlige p Minuter er der tabt $p\xi$ Varmeenheder, saa at $X = p\xi$.

Vil man bestemme *Varmefylden* c for et Legeme af Masse m, opvarmer man det til en passende høj Temperatur T og bringer det uden Afkøling ned i Kalorimetret. Man har da $V_1(t_2 - t_1) = mc(T - t_2)$. Vil man bestemme et Stofs *Smeltevarme* eller *Fordampningsvarme* bringer man Stoffet i henholdsvis flydende eller dampformig Tilstand ind i Kalorimetret. Den søgte bundne Varme er L, Stofmængden m, Varmefylderne i de to Tilstandsformer, Stoffet har før og efter Afgivelsen af L, c_1 og c_2; Stoffet indføres ved Temperaturen T, og Overgangstemperaturen mellem de to Tilstandsformer er T_1. Man faar da $V_1(t_2 - t_1) = mc_1(T - T_1) + mL + mc_2(T_1 - t_2)$. Vil man bestemme *Opløsningsvarmen* ved en given Temperatur t for 1 gr Salt i M gr Vand, maa det erindres, at man herved forstaar den Varmemængde G man maatte føre til under Opløsningen af Saltet i Vandet, begge tagne ved t^0, forat Temperaturen skulde holde sig konstant. Indeholder Kalorimetret U gr Vand, tilsætter man $U/M = m$ gr Salt, efter at man først har givet begge Dele Temperaturen t, som altsaa bliver Kalorimetrets Begyndelsestemperatur; man faar $mG = V_2(t - t_2)$.

Varmetabet skyldes dels Ledning og Straaling, dels Fordampning; de to første Virkninger give et Tab, som er proportionalt med Temperaturforskellen mellem Omgivelserne og Kalorimetret; dette gælder derimod ikke Fordampningen. Kan man dække Kalorimetret med et Laag af blankt Metal, mindskes Straaling og Fordampning betydeligt; i det Tilfælde kan man regne Varmetabet proportionalt med Temperaturforskellen mod Luften, og derfor eliminere dets Indflydelse næsten fuldstændig ved saadanne Forsøg, hvor den undersøgte Varmemængde føres til i en jævn Strøm (f. Ex. elektrisk Strømvarme og Fordampningsvarme), idet man vælger en Begyndelsestemperatur et Par Grader lavere end Luftens og afbryder Varmetilførslen, naar man har naaet en Temperatur, der er lige saa meget højere end Luftens.

Hovedvanskeligheden ved Kalorimetermaalinger som de ovennævnte ligger i, at man maa arbejde med variabel Temperatur, som dels i sig selv er vanskelig at faa godt bestemt, dels medfører, at man faar Varmeudvexling med Omgivelserne; det sidste undgaaes i Hovedsagen ved Bunsens Iskalorimeter, og det kan undgaaes ved Blandingskalorimetret, naar man maaler et Varmeforbrug, idet man da ved Varmetilførsel fra en elektrisk Strøm i en i Kalorimetret anbragt Leder kompenserer Varmeforbruget, saa at Temperaturen holder sig konstant; Varmeforbruget er lig Strømvarmen, som kan findes ved Joules Lov, idet man maaler Strømstyrke og Modstand eller Strømstyrke og Spændingsforskel i Lederen.

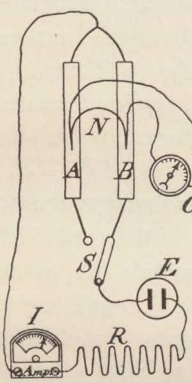


Fig. 78.

Varmestraaling. Søger man den Varmemængde, som givne Varmestraaler tilfører 1 cm^2 ved Indfaldsvinkelen Nul i hvert sek, kan den findes ved almindelig Kalorimetermaaling, idet man lader et Kalorimeter af passende Konstruktion opfange Straalerne i en afmaalt Tid og maaler Temperaturforhøjelsen. Da man imidlertid ofte faar med meget smaa Varmemængder at gøre, kunne saadanne Maalinger blive vanskelige. K. Ångström har udarbejdet en Kompensationsmetode til Maaling af ved Straaling tilførte Varmemængder, hvor Vanskelighederne er undgaaede. *A* og *B* (Fig. 78) er to tynde Strimler af Metalfolie, hvoraf den ene *A* modtager Varmestraalerne, mens den anden *B* er skærmet derimod. *B* opvarmes ved Strømmen fra et galvanisk Element *E*, hvis Strømstyrke kan varieres ved Rheostaten *R* og maales ved et Amperemeter *J*. Strimlerne ere saa vidt mulig ens, og de ere sværtede med Sod paa den mod Straalekilden vendte Side. Et med et følsomt Galvanoskop *Q* forbundet Termoelement *N* har sine to Lodningssteder anbragte hvert tæt opad Bagsiden af sin Strimmel, dog elektrisk isoleret derfra. Paa Grund af Strimlernes ringe Masse vil hver af dem efter kort Tids Forløb antage en stationær Temperatur, betinget af, at den i sek tilførte Varmemængde er lig den til Omgivelserne afgivne. Men varieres nu Strømmen i Strimlen *B*, indtil Galvanoskopet viser, at Termoelementet ingen Strøm giver, da har de to Strimler samme Temperatur, og hvis de er stillede fuldstændig ens, hvad Varmeudvexling med Omgivelserne angaar, maa de og-

saa faa tilført lige megen Varme i sek. Maaler man en Strømstyrke i Amperer i Strimlen B og en Spændingsforskel e Volt ved dens Endepunkter, bliver altsaa den i sek ved Straaling tilførte Varmemængde

$$Q = \frac{ei}{4{,}19} \text{ Gramkalorier.}$$

Divideres Q med Strimlens Areal, faar man den søgte Varmemængde. Forat udjævne mulige Forskelle i de to Strimler er det indrettet saaledes, at man ved Skifteren S hurtig kan føre Strømmen over i A, samtidig med at man udsætter B for Straalerne; faar man herved en lidt afvigende Værdi for Q, tager man Middeltallet af de to Værdier. Overfor mulige Forandringer i Straalingens Styrke er det en stor Fordel, at Apparatet paa Grund af Strimlernes ringe Masse hurtig kommer i Temperaturligevægt.

VIII. Maaling af Lufttryk og Damptryk.

BAROMETRET. Trykket p i et flydende Legeme finder man, naar man kender den Kraft k, som virker paa en lille plan Flade, der er anbragt i Fluidet; er Fladens Areal lig s, har man nemlig

$$p = \frac{k}{s}$$

Fladen maa være saa lille, at Trykket kan regnes for at være ens i alle dens Punkter. Da Kraftens Dimension ifølge S. 108 er ml/t^2, bliver Trykkets Dimension m/lt^2.

Et Lufttryk kan findes ud fra den bekendte Sætning, at der i to Punkter af en Vædskemasse, som er i Ligevægt, og hvis Vægtfylde er ens overalt, er en Trykforskel $p - p_0 = h\rho g$, hvor h er de to Punkters Højdeforskel, ρ Vædskens Vægtfylde og g Tyngdeakcelerationen. Kender man p_0, ρ og g, og maaler man h, finder man

$$p = p_0 + h\rho g.$$

Det eneste paa Forhaand givne Tryk er Trykket Nul, som man har i det tomme Rum. Derfor maa man i en Trykmaaler tilvejebringe et saavidt muligt tomt Rum, saa at man har $p_0 = o$ og $p = h\rho g$.

I Henhold til det ovennævnte bestaar Barometret af et lodret, foroven lukket Glasrør, der indeholder Kvægsølv. Røret maa være saa højt, at Kvægsølvet kan faa den fornødne Højde h til at holde Ligevægt mod det søgte Tryk p. Kvægsølvet faar to frie Overflader; over den øverste findes det tomme Rum, og over den nederste indfører man det Lufttryk, hvis Størrelse søges. Højden h faaes som Højdeforskellen mellem de to Overflader. Forat finde

Vægtfylden ρ maa man kende Kvægsølvets Temperatur. Endvidere maa man kende Tyngdeakcelerationen g paa det Sted, hvor man maaler Trykket.

Kvægsølvet er selvskrevet til Brug som Barometervædske; dets Damps Tryk er saa ringe ved almindelig Temperatur, at man kan se bort derfra i det lufttomme Rum, og dets Vægtfylde er saa stor, at man kan faa maalt Atmosfærens Tryk ved en Højde omkring $^3/_4$ m. Paa Grund af Overfladernes udbuede Form kan deres Højdeforskel aflæses med stor Nøjagtighed, og da Kvægsølvet kan fremstilles meget rent, kan Vægtfylden forudsættes kendt med en Nøjagtighed, som kun afhænger af den Nøjagtighed, hvormed Temperaturen bestemmes. Haarrørsvirkningen vil faa Indflydelse paa Barometerhøjden, hvis den er forskellig i de to Overflader. Man imødegaar den ved at gøre de to Overflader lige store (Hævertbarometret) uden dog dermed at ophæve dens Virkning helt, fordi Overfladespænding og Anlægsvinkel for den ydre Overflade vil forandres noget ved uundgaaelig Paavirkning fra Luftens Ilt og Fugtighed. Man undgaar Haarrørsvirkningens Indflydelse helt ved at gøre Røret saa vidt begge Steder, at den midterste Del af hver Overflade bliver plan.

Et *Normalbarometer* er et Barometer, hvorved man kan bestemme Atmosfærens Tryk med den Nøjagtighed, hvormed Højden kan maales ved Kikkertaflæsning, man kan sige med $^1/_{100}$ mm Nøjagtighed. Hertil fordres Temperaturen af Kvægsølvet bestemt med $^1/_{20}{}^0$ Nøjagtighed; en Fejl paa $^1/_{100}$ mm i en Højde, der er 760 mm, giver nemlig en relativ Fejl (se S. 13), der er noget større end $^1/_{100\,000}$; Temperaturbestemmelsen maa derfor ikke indføre større relativ Fejl end $^1/_{100\,000}$; da Vægtfylden forandres omtrent med $^1/_{5000}$ af sin Værdi ved 1^0 Opvarmning, vil den forandres med $^1/_{100\,000}$ ved $^1/_{20}{}^0$.

Hvad der iøvrigt maa fordres af et Normalbarometer vil fremgaa ved Undersøgelse af Fejlkilderne ved Maalingen. Af uvedkommende Kræfter, som kunne faa Indflydelse paa Kvægsølvets Højde, kan nævnes Haarrørsvirkningen; dens Indflydelse bliver uden Betydning, naar Rørets indvendige Tværmaal er omkring 3 cm. I Rummet over den øverste Overflade findes Kvægsølvdamp og maaske en ringe Luftrest. Den førstes Tryk er ved almindelig Temperatur forsvindende, og Luftrestens Tryk bør være det; kan det iagttages, ved at en Forandring af Rummets Størrelse har Indflydelse paa Højden, bør Barometret udkoges paa ny. Kvægsølvet

i Røret er under forskelligt Tryk i de forskellige Højder; herved forandres Vægtfylden, men Indflydelsen derfra er uden Betydning.

Indstillingen af Kikkerten paa Kvægsølvoverfladen kan medføre Fejl paa Grund af Lysbrydningen i Glasvæggene; saafremt disse have forskellig Tykkelse i forskellig Højde; Glasset vil nemlig i saa Fald virke som et Prisme til enten at løfte eller sænke Billedet af Kvægsølvoverfladen. Herved kan der let opstaa en Fejl større end $^1/_{100}$ mm. Man kan iforvejen undersøge og derefter vælge Røret, eller man kan rette Fejlen efter en Undersøgelse af det færdige Barometer.

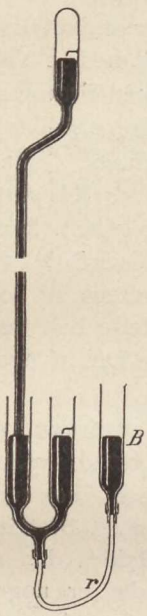


Fig. 79

Man kan ikke umiddelbart indstille en Kikkerts vandrette Traad paa en plan, vandret Overflade, fordi Billederne af Traad og Overflade ville falde sammen. Man finder derfor Kvægsølvoverfladens Højde saaledes, at man iagttager et Punkt, som ligger tæt oven over Overfladen og som derfor spejler sig i denne; indstiller man Kikkerten med vandret Axe paa Midtpunktet mellem Punktet og dets Spejlbillede, vil Axen være i Højde med Overfladen. Man anbringer med det for Øje en fin Spids af mørkt Glas eller Platintraad, som gaar fra Rørets Inderside, hvor den er fastsmeltet, ned mod Kvægsølvfladen. For at kunne maale Højden maa man hver Gang bringe Kvægsølvoverfladen op til i Nærheden af Spidsen; det opnaaes ved, som vist i Fig. 79, at forsyne Barometret med et Forraadskar *B* med Kvægsølv, som er i Forbindelse med Barometret gennem et bøjeligt Staalrør *r*, og ved at selve Barometerrøret kan løftes eller sænkes.

Kvægsølvets Temperatur findes ved at anbringe flere Termometre langs Barometerrøret; hvert Termometers Beholder er anbragt i et Stykke Rør, udstyret i Lighed med det nærmeste Stykke af Barometret, for at det kan blive underkastet de samme Opvarmningsbetingelser som Kvægsølvet i Barometret.

Laboratoriebarometer. Vil man nøjes med en Nøjagtighed af $^1/_{10}$ — $^1/_5$ mm, kan man indrette Barometret betydelig simplere. Røret kan man tage 1 cm vidt. Ligesom det er vist i Fig. 79 foretrækker man at bøje Røret saaledes, at den ene Overflade kommer til at ligge lodret under den anden, hvad der giver de bedste Betingelser for Maaling af Højdeforskellen. Af Hensyn til

at gøre Haarrørsvirkningen ens ved alle Aflæsninger er det heldigt at kunne løfte begge Kvægsølvoverflader lidt og derved toppe dem forud for hver Aflæsning; det kan ske ved den i Fig. 79 viste Form og ligeledes ved Karbarometret Fig. 80; dette bestaar af et Barometerrør, der dypper ned i en Glaskop med Kvægsølv. Koppen er foroven kantet med en indvendig skrueskaaren Staalring og Røret bærer forneden en deri passende, udvendig skrueskaaren Ring; under denne er Røret bøjet til Siden, saa at der bliver Plads for en til Røret smeltet Glasspids *s*, der ligger i Røraxens Forlængelse. Ved at dreje paa Beholderen faar man Kvægsølvet til, efter en opadgaaende Bevægelse, at røre ved Spidsen. Luftforbindelse med Atmosfæren faaes langs Skruegængerne. Et i hele Grader inddelt Termometer *T* er anbragt med sin Beholder ud for Midten af Barometerrøret. Fejlen paa Grund af Haarrørsvirkningen i et Laboratoriebarometer undgaar man bedst ved, efter en Løftning af Overfladerne, at sammenligne dets Visning med et Normalbarometers og indføre den deraf fremgaaende Forskel som en Korrektion ved alle følgende Aflæsninger af Barometret. En mulig Nulpunktsfejl hos Maalestokken elimineres ved samme Lejlighed.

Fig. 80

Iagttagelse af en Kvægsølvoverflades Højde i et Glasrør sker hyppig ved Kikkert, idet man, naar Overfladen er krum over det hele, faar Billedet af Fladen til at tangere den vandrette Traad i Kikkerten. Man indretter det helst saaledes, at man ser Overfladen mørk paa lys Grund, da man ellers let faar vildledende Spejlinger. Man maa afblænde den lyse Grund saaledes, at der ikke falder skraa Straaler fra oven ned paa Fladen, da saadanne ved at kastes vandret ud mod Kikkerten viser den øverste Del af Kvægsølvet lige saa lys i Kikkerten som Baggrunden, fra hvilken den derfor ikke kan skælnes, hvorfor man kommer til at sigte for lavt (Fig. 81). Man anbringer derfor bagved Røret en Skærm med vandret afskaaren Underkant, som fra oven føres saa tæt ned mod Overfladen, at man kun ser et meget smalt lyst Mellemrum derimellem; man kan f. Ex. bruge et kort Stykke sortfarvet Rør, som fastholdes ved en let Fjedring uden om Glasrøret (Fig. 82). Man bestemmer hyppig, som i Lufttermometret og i Barometret Fig. 80 en Kvægsølvoverflades Højde ved at bringe

den til at røre Spidsen af en nedadvendende fin Stift. Berøringen kendes paa, at Spidsen netop møder sit Spejlbillede.

Har man en Maalestok staaende tæt op ad Røret kan man ved forskellige simple Midler finde Overfladens Højde henført til Maalestokkens Streger. En Gaffel, som omslutter Røret, og som udgaar fra et Maalestokken omsluttende Hylster (Fig. 83), kan indstilles paa Kvægsølvoverfladen, saaledes, at dens plane og vandrette Underkant sees i Flugt med Overfladens Top. Man kan med Fordel bruge en spejlende Maalestok *M*, Fig. 84, af Glas, hvor Delestreger og Tal findes paa den metalklædte Side indenfor Metallet; Røret med Kvægsølvet stilles tæt foran den lodrette Maalestok, saa at man ser baade Overfladen *o* og dens Spejlbillede *o'*, hvorimod Stregerne sees enkelte; man holder sit Øje saaledes, at man ser Overfladens Top og dens Billede under et; den derved bestemte Selinie er vinkelret paa Maalestokken og altsaa vandret, og det Punkt af Maalestokken, som den træffer, viser Overfladens Højde uden Parallaxefejl.

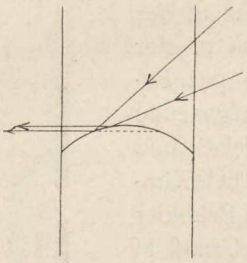


Fig. 81

Fig. 82

Barometret egner sig ikke til Maaling af Tryk meget større end Atmosfærens, da Tilvejebringelsen af det tomme Rum vanskelig kan forenes med en stor Højde. Ved Maaling af meget smaa Tryk bliver Kvægsølvhøjden saa lille, at man i Reglen ikke kan faa den maalt med fornøden procentisk Nøjagtighed.

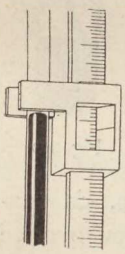


Fig. 83

Fig. 84

KVÆGSØLVMANOMETRET. Ved de fleste forefaldende Trykmaalinger er det nemmest at dele Maalingen saaledes, at man maaler Forskellen mellem det søgte Tryk og Atmosfærens Tryk ved Manometer og derpaa maaler sidstnævnte ved et Barometer. Kvægsølvmanometret indrettes i Lighed med Barometret, kun at man har Atmosfærens Tryk over den ene Overflade istedenfor det tomme Rum, mens det søgte Tryk virker over den anden Overflade.

Manometret kan dannes simpelthen som et med Maalestok forsynet U-Rør, hvis Grene er fyldte omtrent halvvejs med Kvæg-

sølv. Har U-Røret Barometerhøjden, kan man ved samtidig Brug af Barometret maale Tryk mellem 0 og 2 Atmosfærer. Smaa Tryk maales dog ikke godt ad denne Vej, da Værdien fremkommer som en Differens mellem to Kvægsølvhøjder, hver paa omtr. $^3/_4$ m.

Skal man maale flere Atmosfærers Tryk, faar man Brug for et tilsvarende højt Stigrør for Kvægsølvet. Manometret indrettes da saaledes, at man holder den nederste Overflade i uforandret Højde i det Rør, hvor det søgte Tryk føres ind. Dette Rør er i Forbindelse med Stigrøret og med en Forraadsbeholder, hvorfra man ved Luft- eller Vandtryk driver Kvægsølv op til den fornødne Højde. Ligesom ved Barometret maa man finde Kvægsølvets Middeltemperatur gennem hele Højden, og man maa kende Barometerstanden som den er i Højde med Overfladen i Stigrøret.

Korrektioner ved en Trykmaaling. Sædvanlig angiver man Trykkets Størrelse ikke i den før nævnte absolute Enhed, men i mm, cm eller m af Kvægsølvhøjde. Da imidlertid en Kvægsølvhøjdes Tryk er forskelligt efter Temperaturen og Tyngdeakcelerationen i Henhold til Udtrykket $p = h\rho_1 g$, angiver man *den reducerede Højde*, hvorved man forstaar den Højde h_0 af Kvægsølv ved 0^0 C, som under 45^0 Bredde og ved Havets Overflade vil øve samme Tryk, som den iagttagne Kvægsølvhøjde øver. Man finder altsaa h_0 af h ved Ligningen

$$p = h_0\rho_0 g_{45} = h\rho_1 g = \frac{h\rho_0 g}{1+kt}, \quad h_0 = \frac{h}{1+kt}\,\frac{g}{g_{45}}$$

idet k er Kvægsølvets Udvidelseskoefficient. Har man til Bestemmelse af Højden h foretaget to Aflæsninger a og b paa en Maalestok, der er rigtig ved t_0, faar man $h = (a-b)\,(1+\lambda(t-t_0))$, hvor λ er Maalestokkens Udvidelseskoefficient. Den reducerede Højde vil være $h_0 = (a-b)\,(1+\lambda(t-t_0))\,g/g_{45}\,(1+kt)$.

Omstaaende Tabel indeholder Differensen $h_0 - h$ for $g = 981{,}6$, idet $g_{45} = 980{,}6$ og $k = 0{,}000182$, beregnet for Kvægsølvhøjder fra 100 til 1000 mm og for Temperaturer fra 10^0 til 25^0.

Man finder ved Tabellen den til en given observeret Kvægsølvhøjde h svarende reducerede Højde ved at lægge det tilhørende Tal til h. Er f. Ex. $h = 629{,}4$ og $t = 17^0$ finder man Korrektionen lig $-(1{,}24 + 0{,}04 + 0{,}02) = -1{,}30$; de tre Led svare til de tre hele Cifre i h og er fundne henholdsvis under $h = 600$, 200 og 900 mm. Den reducerede Højde bliver $h_0 = 628{,}1$ mm.

Reduktion af Kvægsølvhøjder til 0° C og 45° Bredde.

	Den iagttagne Kvægsølvhøjde i mm										
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	750
t	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
10°	−0,08	−0,16	−0,24	−0,32	−0,40	−0,48	−0,56	−0,64	−0,72	−0,80	−0,60
11	0,10	0,20	0,30	0,39	0,49	0,59	0,69	0,79	0,88	0,98	0,74
12	0,12	0,23	0,35	0,47	0,58	0,70	0,81	0,93	1,05	1,16	0,87
13	0,13	0,27	0,40	0,54	0,67	0,81	0,94	1,08	1,21	1,35	1,01
14	0,15	0,31	0,46	0,61	0,76	0,92	1,07	1,22	1,37	1,53	1,14
15	0,17	0,34	0,51	0,68	0,86	1,03	1,20	1,37	1,54	1,71	1,28
16	0,19	0,38	0,57	0,76	0,95	1,13	1,32	1,51	1,70	1,89	1,42
17	0,21	0,41	0,62	0,83	1,04	1,24	1,45	1,66	1,87	2,07	1,55
18	0,23	0,45	0,68	0,90	1,13	1,35	1,58	1,80	2,03	2,26	1,69
19	0,24	0,49	0,73	0,97	1,22	1,46	1,71	1,95	2,19	2,44	1,83
20	0,26	0,52	0,79	1,05	1,31	1,57	1,83	2,10	2,36	2,62	1,96
21	0,28	0,56	0,84	1,12	1,40	1,68	1,96	2,24	2,52	2,80	2,10
22	0,30	0,60	0,90	1,19	1,49	1,79	2,09	2,39	2,69	2,98	2,24
23	0,32	0,63	0,95	1,27	1,58	1,90	2,22	2,53	2,85	3,17	2,37
24	0,33	0,67	1,00	1,34	1,67	2,01	2,34	2,68	3,01	3,35	2,51
25	−0,35	−0,71	−1,06	−1,41	−1,76	−2,12	−2,47	−2,82	−3,18	−3,53	2,65
$10\lambda_m h$	+0,02	+0,04	+0,05	+0,07	+0,09	+0,11	+0,13	+0,14	+0,16	+0,18	
$20\lambda_m h$	0,04	0,07	0,11	0,14	0,18	0,22	0,25	0,29	0,32	0,36	
$10\lambda_g h$	+0,01	+0,02	+0,02	+0,03	+0,04	+0,05	+0,06	+0,06	+0,07	+0,08	
$20\lambda_g h$	0,02	0,03	0,05	0,06	0,08	0,10	0,11	0,13	0,14	0,16	
$\frac{1}{g_{45}} h$	+0,10	0,20	0,31	0,41	0,51	0,61	0,71	0,82	0,92	1,02	

Betegnes Korrektionen $h - h_0$ svarende til en Temperatur t med δ_t, har man $\delta_{t+\vartheta} - \delta_t = \delta_t - \delta_{t-\vartheta}$. Herved kan man let udvide Tabellen over 25° og under 10°. Den med $10\,\lambda_m$ betegnede vandrette Talrække giver Korrektionen for en med en Messingmaalestok maalt Højde, naar Maalestokkens Temperatur afviger 10° fra den, ved hvilken den er rigtig; den paafølgende Række giver det samme, naar Afvigelsen er 20°. De to følgende Rækker give det tilsvarende for en Glasmaalestok. For hver Enhed Tyngdeakcelerationen bliver større end $g_{45} = 980{,}6$, forøges hver iagttagen Højde med Tallene i den sidste, med h/g_{45} betegnede Række Tal.

Hvis det Barometer, man bruger, har sin ydre Overflade i en Højde H m over det Sted, hvor man søger Lufttrykket, maa man til Kvægsølvhøjdens Tryk addere det Tryk, som den mellemliggende Lufthøjde udøver paa Grund af Tyngden. Regnes Luftens Vægtfylde lig 0,0012, og Kvægsølvets lig 13,6, bliver dette sidste Tryk, omsat i Kvægsølvhøjde, H . 0,0012/13,6 m = H . 0,088 mm; med denne Størrelse maa altsaa Barometerstanden forøges.

Naar man ikke faar elimineret Haarrørstrykket paa anden Maade, maa det ske ved at man, eftersom Overfladen er konvex eller konkav, forøger eller formindsker hver iagttagen Overfladehøjde med den Vædskehøjde, der tjener som Maal for Haarrørstrykket; dettes Størrelse π retter sig efter Rørets Vidde d og Højden η af den krumme Overflade, Kuplen. Nedenstaaende Tabel giver Trykket π for Kvægsølv.

Haarrørstrykket fra en Kvægsølvoverflade.

d	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	mm
η	0,4 1,2	0,4 1,4	0,4 1,6	0,4 1,8	0,6 1,8	0,6 1,8	0,8 1,8	0,8 1,8	0,8 1,8	0,8 1,8	mm
π	0,8 2,4	0,5 1,8	0,3 1,4	0,2 1,1	0,2 0,8	0,2 0,5	0,15 0,37	0,10 0,27	0,07 0,19	0,04 0,14	mm *Hg*

Ved Maaling af mindre Trykforskelle bruger man hyppig andre Vædsker end Kvægsølv i Manometret. Man omsætter da ofte den Vædskehøjde, der bestemmer Trykket, til Kvægsølvhøjde ved at multiplicere den med et Tal lig Forholdet mellem Vægtfylden ρ af Vædsken ved Manometrets Temperatur og Vægtfylden af Kvægsølv ved 0°, altsaa med ρ_t/13,596. For Vand og Kvægsølv er Forholdet mellem Vægtfylderne *tagne ved samme Temperatur* konstant paa $^1/_{10000}$ nær og lig 0,07369 (se S. 188) mellem 14° og 22°. Indenfor disse Temperaturer kan man derfor bruge nedenstaaende lille Tabel forat omsætte en Vandhøjde til Kvægsølvhøjde. Reduktionen af denne til 0° C og 45° Bredde sker dernæst ved Tabellen S. 178.

Vandhøjde omsat til Kvægsølvhøjde.

Temperaturen ens (14° — 22°).

100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	mm H_2O
7,37	14,47	22,11	29,48	36,84	44,21	51,58	58,95	66,32	73,69	mm *Hg*

MAALING AF MEGET STORE OG MEGET SMAA TRYK. Paa enkelte Steder hvor Forholdene tillade det, saaledes i Eiffel-

taarnet i Paris, har man indrettet Kvægsølvmanometre af tilstrækkelig Højde til at kunne maale over hundrede Atm. Tryk. De bruges i Hovedsagen til Justering af Metalmanometre. Ved absolut Maaling af endnu større Tryk er man henvist til at bruge Trykkets Virkning gennem en Vædske paa et *Stempel* af lille Tværsnit. Stemplet skal gaa med ringe Gnidning og dog slutte tæt; man kan derfor ikke bruge Pakning som i et Luftpumpestempel. Man anvender et Metalstempel, der gaar i en Cylinder af samme Metal, forat Varmeudvidelsen kan være ens for begge. Ved at forme Cylinder og Stempel nøjagtig efter hinanden og ved at bruge en meget sej Vædske som Ricinusolie eller Sirup kan den fornødne Tæthed opnaaes. Den Vanskelighed, at Stemplet kan kile sig fast ved at komme i en skraa Stilling til Cylindren, kan man, som Amagat har funden, komme over ved under Brugen at holde Stemplet i langsom, men stadig Omdrejning om sin egen Axe.

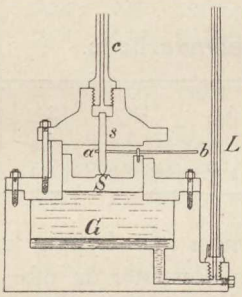


Fig. 85

Stempelmanometret kan indrettes saaledes, at man ved Lodder, hvis Vægt virker direkte eller gennem en Vægtstang paa Stemplet, finder den Kraft der kan holde Trykkets Virkning i Ligevægt. Veje Lodderne m gr, og er Stempelarealet s cm^2, bliver Trykket $p = mg/s + b\rho g$, hvor g er Tyngdeakcelerationen og $b\rho g$ Atmosfæretrykket. Fig. 85 viser Amagats Stempelmanometer, hvormed der har været maalt indtil 3000 Atmosfærers Tryk. Det søgte Tryk p føres gennem Røret c til Vædsken over det lille Stempel med Areal s. Dette drives derved ned mod et meget større Stempel med Areal S, som fremkalder et Tryk p' i Kammeret G, der indeholder foroven en Olie, forneden Kvægsølv. Ved Kvægsølvets Stigen i Røret L maales Trykket p', og man faar derved $p = p'S/s$. Ved Vægtstangsarmen ab kan man meddele begge Stempler de Drejninger, der holder dem bevægelige. Med en Diameter 1 cm for det lille og 10 cm for det store Stempel vil et Tryk $p = 1000$ Atm. maales ved en Kvægsølvhøjde paa 7,6 m.

Meget maa Trykforskelle kunne findes ved et Manometer, der dannes af et svagt buet, ret snævert Glasrør (Fig. 86), som indeholder en Traad af en passende Vædske, f. Ex. Petroleum. Herved kan man f. Ex. finde de Trykforskelle, der er tilstede i et Rør, som fører en Luftstrøm (Ventilationsrør, Skorsten).

Det yderst ringe Tryk, der bliver tilbage efter en stærk Udpumpning med en Kvægsølvluftpumpe, maales ved Mc. Leods Manometer, der er vist i Fig. 87 i en af Rossander given Form. Glasrøret *m* er i Forbindelse med Luftpumpen, saa at det svage Tryk findes i Beholderen *V*. Forat finde Trykket løfter man Kvægsølvbeholderen *B*, hvorved Kvægsølvet stiger op og fylder *V* indtil Mærket *e* paa det snævre Rør *u*; samtidig stiger det højt op i det inddelte Rør *m*, hvor man vedblivende har det svage Tryk. Ved Højdeforskellen finder man Trykket af den i *u* sammenpressede Luft; da Rummene i *V* og *u* er udmaalte, kan man ved Mariottes Lov regne sig tilbage til det Tryk Luften havde, da den fyldte baade *V* og *u*.

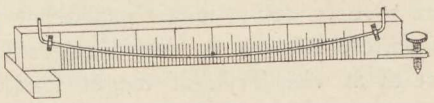


Fig. 86

METALMANOMETER, ANEROIDBAROMETER. Et Bourdons Rør er et bøjet Metalrør med fladt elliptisk Gennemsnit; det er bøjet i et paa Ellipsens store Axe vinkelret Plan (Fig. 88). Lukker man Røret ved den ene Ende og fører et Tryk større end Atmosfærens ind ved den anden Ende, vil Tværsnitsformen forandres, idet den lille Axe voxer, den store aftager. Herved nærmes Delene i den indadvendende Side af det bøjede Rør ind mod Bøjningscentret, hvad der har en Sammentrykning til Følge; da der af tilsvarende Grund opstaar en Strækning i Rørets Yderside, bliver Følgen, at Røret retter sig lidt ud, naar det indvendige Tryk voxer; Rørets Form retter sig efter Trykforskellen inde og ude. Gøres dets ene Ende fast, og forbindes dets anden Ende ved et eller flere Mellemled med en Viser, vil denne paa en Gradbue vise Forskellen mellem det Tryk, man fører ind i Røret, og Atmosfærens Tryk, naar man har foretaget den fornødne Sammenligning med en absolut Trykmaaler. Dødgangen i Mekanismen og den elastiske Eftervirkning i Røret bevirker, at Metalmanometret viser en lille Forskel ved samme Tryk, eftersom dette naaes med voxende eller aftagende Tryk. Temperaturen har en lille Indflydelse paa Visningen. Der vil i Reglen ogsaa i Tidens Løb ind-

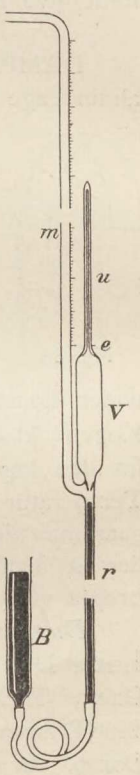


Fig. 87

træde varige Forandringer i Apparatet, saa at det af og til maa omjusteres. Indenfor den Nøjagtighedsgrænse Metalmanometret kan give er det et meget paalideligt og nemt Maaleapparat, og ved at variere Rørets og dets Vægges Dimensioner kan man indrette det til at vise Tryk af meget forskellig Størrelse, fra en Brøkdel af en Atmosfære til flere hundrede Atmosfærers Tryk.

Pumper man Bourdonrøret lufttomt og lodder det til, bliver Apparatet et Aneroidbarometer, idet dets Stand da vil afhænge af det ydre Tryk alene. I Reglen erstatter man dog i Aneroidbarometret Bourdonrøret med en Kapsel, hvis Bund og Laag er dannet af en tynd Metalplade, hvori der er trykket Bølgeringe forat give Pladen større Bøjelighed.

DAMPES MAXIMUMSTRYK kan, som det er kendt fra den almindelige Fysik, maales *statisk*, idet man tilvejebringer Betingelserne for Dannelsen af mættet Damp i Ligevægt ved at give Damprummet konstant Temperatur og ved at sørge for, at Rummet indeholder baade Damp og Vædske; efter Omstændighederne maa man da paa forskellig Maade sørge for at faa maalt de sammenhørende Værdier af Dampens Tryk og Temperatur. I mange Tilfælde kan man med Fordel bestemme Damptrykket »dynamisk«, idet man bringer Vædsken i Kog under konstant Tryk og maaler de sammenhørende Værdier af Kogepunkt og Tryk; som omtalt S. 158 vil Termometret i Dampen fra den kogende Vædske vise den til det givne Tryk svarende Temperatur for mættet Damp. Ved den dynamiske Metode undgaar man de store Vanskeligheder det kan volde ved statisk Maaling at skaffe konstant Temperatur tilveje; men Metoden kan ikke bruges ved smaa Tryk, da Kogningen der er for uregelmæssig.

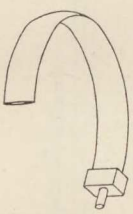


Fig. 88

Dugpunktet. Kendskabet til de sammenhørende Værdier for mættet Damps Tryk og Temperatur kan tjene til Maaling af umættet Damps Tryk, derved at man finder Rummets Dugpunkt, d. v. s. den Temperatur et Legeme i Rummet maa afkøles til, forat den Damp, der rører Legemet, skal blive mættet under det tilstedeværende Tryk. At Legemet har Dugpunktet skulde kendes paa, at en Dugmængde, som er bleven afsat, hverken aftager eller forøges; paa Grund af smaa Variationer i Tryk og Temperatur vil det dog gaa saaledes, at Duggen kommer og forsvinder med korte Mellemrum. Til Maaling af Vanddampens Tryk i Atmosfæren ad

den Vej maa man have et Legeme, som kan holdes afkølet under Lufttemperaturen, og hvis Temperatur i Overfladen man kan bestemme sikkert. Dufours Dugpunktsapparat bestaar af en Kobberblok *CC*, Fig. 89, som danner den ene Side af en prismatisk Blikbeholder *BB*; denne indeholder Æther, der kan holdes afkølet ved en Luftstrøm; Blokkens Forside er forsølvet og blankt poleret for at vise Bedugningen; denne fremhæves, ved at der tværs over Forsiden er lagt et forsølvet Metalbaand *b*, som er varmeisoleret fra Blokken, og som derfor holder sig blankt. I en Udboring sidder Termometret, om hvis Beholder der er pakket fine Kobberspaaner. Kobberets store Varmeledningsevne gør, at det, trods Varmeledningen igennem det, praktisk talt har samme Temperatur i Overfladen som i det indre, hvor Termometret sidder.

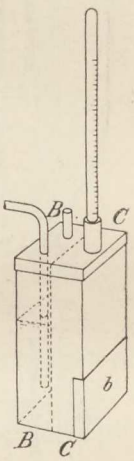


Fig. 89

Maximumstrykket over en Opløsning er lavere end over den rene Vædske. Det kan bestemmes statisk paa samme Maade som Damptrykket over den rene Vædske; kun maa Vædskemængden i Damprummet være saa stor, at Opløsningens Styrke ikke kendelig forandres ved Afgivelse af Dampen, og man maa kunne frembringe saa livlig Strømning i Opløsningen, at man sikrer sig mod, at dennes øverste Lag paa Grund af Fordampningen har en forandret Styrke, idet Ligevægten mellem Vædske og Damp alene afhænger af det øverste Vædskelag. Den i Vædsken opløste Luft vil efterhaanden udskille sig, saa at man af den Grund kan finde en for stor Værdi for Trykket.

Raoult har indrettet sig paa den i Fig. 90 viste Maade for at maale Opløsningers Damptryk statisk. I et Fodstykke *jj* af Jærn er der anbragt tre lodrette Rør, der staa i indbyrdes Forbindelse forneden ved en Kanal i Fodstykket. De to Rør tilvenstre have foroven en Indsnævring. De lukkes lufttæt ved en »Kvægsølvlaas«, idet man stikker en svagt konisk Glaspind ned i Indsnævringen og hælder noget Kvægsølv i Røret udenom Glaspinden. Det tredie Rør staar foroven i Forbindelse med en stor Luftbeholder med bekendt og konstant Lufttryk. Fra Kvægsølvbeholderen *B* kan man drive Kvægsølv op i alle tre Rør; disse er anbragte i et Dampbad lukket for og bag ved Planglas, saa at man kan maale Kvægsølvhøjderne med Katetometer. I det ene af de to førstnævnte Rør indbringer man fra oven den Opløsning, hvis Damp-

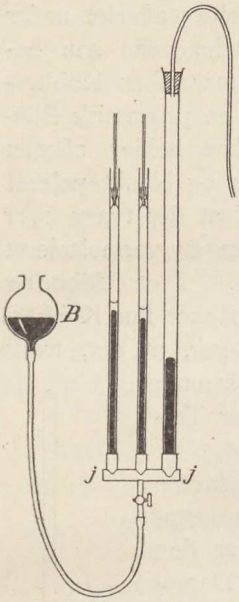


Fig. 90

tryk skal maales, i det andet anbringes Opløsningsmidlet. Man jager Luften ud ved at drive Kvægsølvet saa højt op, at Vædsken kommer til at staa over Indsnævringen; derpaa sættes Glasstiften i, og Kvægsølv hældes udenom. Sænkes *B*, dannes der Damp i begge Rør, og ved Maaling af Højdeforskellene findes Damptrykkene. Er Arbejdet færdigt, løftes Glaspinden op, Kvægsølvet om den falder ned i Røret, hvorefter man ved Paahælding fra oven og ved skiftevis at løfte og sænke *B* kan skylle Røret rent til et følgende Forsøg.

Jeg har udført det i Fig. 91 viste Forsøg. Den ene Gren af U-Røret *R* fortsættes opad med et Haarrør, som er forlænget et lille Stykke ned i det videre Rør. I Røret hældes Vand. Gennem en Slange, som fortsætter det snævre Rør suger man Luft ud af U-Røret, indtil Vandets Overflade naar den nederste Spids af det snævre Rør; omkring denne Spids vil der blive holdt en lille Luftrest tilbage. Idet Slangen lukkes lige over Haarrøret, anbringes U-Røret i en Strøm af Damp fra Vand, som koger under et Tryk lidt større end Atmosfærens (jvfr. S. 159). I U-Røret vil der dannes Damp af samme Temperatur og Tryk som udenfor, hvorfor Overfladerne stille sig i ulige Højde. Luften i Damprummet i *R* kan fjærnes ved Sugning gennem Haarrøret, den lille tilbageblivende Rest foranlediger, at Dampen dannes paany efter hver Sugning, hvad der ikke vilde ske uden en Overhedning, hvis al Luft og Damp blev fjærnet. Erstatter man Vandet i U-Røret med en Opløsning, vil man se at Damptrykket over den er mindre end over Vandet. Formindskelsen kan maales ved at anbringe to U-Rør i Dampstrømmen, det ene med Opløsningen, det andet med rent Vand; Højdeforskellen vil være størst i det sidste. Ved Udførelse af Forsøget vil man

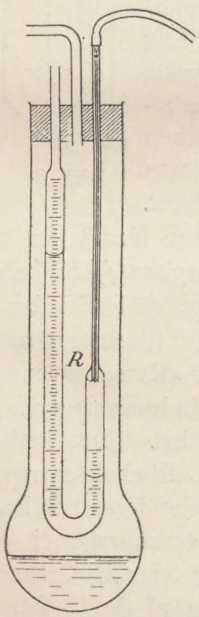


Fig. 91

finde, at Gendannelsen af Dampen efter en Udsugning foregaar hurtigere over Vandet end over Opløsningen, fordi dennes Overfladelag paa Grund af Fordampningen dannes af en stærkere Opløsning.

Vil man bestemme Maximumstrykket over en Opløsning ved Kogning, maa man sætte Termometrets Beholder i Vædsken, da det, anbragt i Dampen, nærmest vil give den rene Vædskes Kogepunkt. Men dette medfører Vanskeligheder, da som nævnt S. 158 den kogende Vædskes Temperatur er underkastet Svingninger. Man kan sætte disses Størrelse ned ved at koge i et Metalkar, eller, naar man koger i et Glas, da efter Beckmann indsmelte en Platintraad i Glassets Bund. Endvidere lægger man, ligeledes efter Beckmann, et tykt Lag af Glasperler eller Tarergranater i Bunden af Kogekarret. Varmetilledning til den kogende Vædske gennem Metal giver en jævnere Dampudvikling end gennem Glas. Perlerne eller Granaterne virke, ved at de tvinge den ved Bunden dannede Damp til at gennemløbe en lang Vej i Vædsken, før den naar op til Termometret. Herved faar den overhedede Damp Lejlighed til at afgive sin overskydende Varme. Kogekarret anbringes som vist i Fig. 92 i det indre Rum af en ringformet Kedel, hvor Opløsningsmidlet holdes i Kog; herved bliver Varmetabet til Omgivelserne ringe.

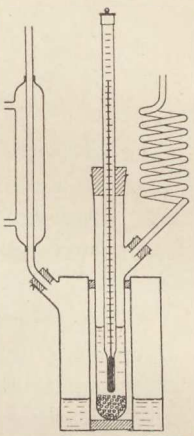


Fig. 92

Kogningen indledes ved den Luft, som Vædsken oprindelig indeholder; efterhaanden fjærnes Luften; men Kogningen kan dog holdes jævnt vedlige, fordi hver opstigende Dampboble efterlader en lille Rest af Damp, som giver Anledning til, at der strax efter dannes en ny Boble. Standser Kogningen, vil ethvert Spor af Damp forsvinde, og den kan da ikke begynde igen uden efter en Overhedning. Man maa derfor helst undgaa at afbryde Kogningen.

Nogen fuldt paalidelig Bestemmelse af Kogepunktet faar man næppe ved den ovenfor beskrevne Fremgangsmaade, fordi den forholdsvis ringe Masse af den opstigende Damp ikke kan beherske Vædskens Temperatur; men det man fortrinsvis søger er Forskellen mellem den rene Vædskes og Opløsningens Koge-

punktstemperaturer; naar man derfor bestemmer begge Kogepunkter i det samme Apparat og under de samme ydre Omstændigheder, kan man gøre Regning paa, at Fejlene gaa i samme Retning og ere nogenlunde ens, saa at de for største Delen elimineres, naar man søger Forskellen. En lignende Betragtning kan gøres gældende overfor den S. 164 omtalte, paa Underafkøling grundede Bestemmelse af Opløsningers Frysepunkt.

IX. Maaling af Rumfang.

FASTE LEGEMERS RUMFANG. Det ydre Rumfang af et fast Legeme eller et Hulrum i et saadant kan i visse Tilfælde findes ved Udmaaling af Dimensionerne (jvfr. S. 65—66). Sædvanlig sker dog Rummaalingen, ved at man vejer den Vædskemasse, som enten udfylder eller fortrænges af det søgte Rum. Kender man Vædskens Vægtfylde d, og er m dens Vægt i gr, faar man Rumfanget $v = m/d$ udtrykt i cm^3 eller rettere, efter S. 65—66, i Milliliter. Enhver nøjagtig Rummaaling maa være ledsaget af en Temperaturbestemmelse, fordi baade det søgte Legemes Rumfang og den benyttede Vædskes Vægtfylde afhænger af Temperaturen. Rumfanget afhænger af det Tryk, Legemet er underkastet; men naar bortsees fra de luftformige Legemer, har Trykket saa ringe Indflydelse paa Rumfanget, at man i de fleste Tilfælde kan se bort derfra. Den Vædske man bruger er sædvanlig Vand eller Kvægsølv, fordi man kan fremstille enhver af disse to Vædsker saa ren, at man kan gøre Regning paa, at den altid har samme Vægtfylde ved samme Temperatur, og fordi der er udført Undersøgelser over deres Vægtfylder ved forskellige Temperaturer med en Nøjagtighed, som svarer til den, hvormed man kan veje dem (se Tabellen S. 188).

Bestemmelse af et fast Legemes Vægtfylde. Idet man ved Vægtfylden d forstaar Vægten i gr af 1 cm^3, rettere 1 ml, faar man $d = m/v$, hvor m er Legemets Vægt, v dets Rumfang. Vægtfyldebestemmelsen er altsaa betinget af en Vejning og en Rummaaling. Naar det kan lade sig gøre at sænke Legemet i Vand, finder man dets Rumfang ved at veje det Vand Legemet fortrænger og samtidig bestemme den for Legemet og Vandet fælles Temperatur. Man kan udføre denne Bestemmelse paa den hydrostatiske Vægt. Man lægger Legemet paa den ene Vægtskaal og fæster en Traad, indrettet til at kunne bære Legemet, under Skaalen. Idet Traaden

Vægtfylde og Rumfang for Vand og Kvægsølv.

	Vægt af 1 cm^3		Rumfang af 1 gr		Relativ Vægtfylde	
t	H_2O f_1	Hg f_2	H_2O v_1	Hg v_2	$\varphi_1 = \frac{f_1}{f_2}$	$\varphi_2 = \frac{f_2}{f_1}$
0°	0,99987	13,5956	1,00013	0,073553	0,07354	13,598
2	0,99997	13,5907	1,00003	73580	7358	13,591
4	1,00000	13,5857	1,00000	73607	7361	13,586
6	0,99997	13,5808	1,00003	73633	7363	13,581
8	0,99988	13,5759	1,00012	73660	7365	13,578
10	0,99973	13,5709	1,00026	73687	7367	13,575
12	0,99952	13,5660	1,00048	73714	7368	13,572
14	0,99927	13,5611	1,00073	73740	7369	13,571
16	0,99897	13,5562	1,00103	73767	7369	13,570
18	0,99862	13,5513	1,00138	73794	7369	13,570
20	0,99823	13,5463	1,00177	73821	7369	13,570
22	0,99780	13,5414	1,00221	73847	7369	13,571
24	0,99732	13,5365	1,00268	73874	7368	13,573

hænger ned i Vand til en passende Dybde, frembringer man Ligevægt ved Tarering og noterer Tungens Ligevægtsstilling. Derpaa arreteres Vægten, Vandet fjærnes, Legemet tages fra Vægtskaalen og hænges op i Traaden. Et Kar med Vand skydes nu op om Legemet, hvorved det maa passes, at Traaden kommer ligesaa dybt ned som før. Vandet omrøres, og naar det og Legemet kan antages at være i Temperaturligevægt, aflæses Vandets Temperatur t. Derpaa frigør man Vægten og lægger Lodder paa, til Vægtskaalen faar samme Ligevægtsstilling som før. De paalagte Messinglodders Vægt q formindsket med deres Opdrift i Luften holdes nu i Ligevægt ved en Kraft lig Forskellen mellem Legemets Opdrift i Vand og i Luft. Forholdet er altsaa, som om det uddrevne Vand og de sidst paalagte Lodder var afvejede mod hinanden hver paa sin Vægtskaal, hvorfor det uddrevne Vands sande Vægt x findes ved Tabellen S. 63, med den til $d_1 = 1{,}0$ svarende Værdi af k; $x = q + kq$. Vandets Vægtfylde f_t ved den iagttagne Temperatur t findes af ovenstaaende Tabel, saa at Legemets Rumfang ved t^0 bliver

$$v_t = \frac{q + kq}{f_t}.$$

Har man ved Vejning af Legemet vejet dette op med Messing-

lodder af Vægt p, finder man dets sande Vægt $m = p + k'p$, hvor k' er Korrektionstallet svarende til Legemets Vægtfylde; denne kan man ved Opsøgning af k' i Tabellen S. 63 sætte lig p/q. Man faar nu Legemets Vægtfylde

$$d = \frac{m}{v_t} = \frac{p + k'p}{q + kq} f_t$$

Exempel. For en Metalcylinder fandtes $p = 126{,}9945$ gr, $q = 15{,}9935$, $t = 17^0{,}3$; Ophængningstraaden var $^1/_5$ mm tyk. Tabellerne S. 63 og 188 give $k'p = +0{,}0010$, $kp = +0{,}0169$ og $f_t = 0{,}99875$, hvorved faaes Vægtfylden $d = 7{,}9221$.

Af Vanskeligheder og Fejlkilder ved denne Bestemmelse skal nævnes følgende. Der kan ved Vejningen i Vandet hænge Luftbobler ved Legemet og Traaden; saadanne Bobler maa omhyggelig opspores og fjærnes. Der hænger Vand ved den Del af Traaden, som ved Vægtens Svingninger forbigaaende dyppes ned, og Haarrørsvirkningen løfter Vand op om Traaden; det gælder om at gøre denne Vandmængde ringe og ens ved begge Afvejninger; derfor tages Traaden saa tynd som Forholdene tillade, og dens Overflade renses for Fedt; den maa ikke være dobbelt (snoet eller sammenlagt), hvor den gaar gennem Overfladen. Kohlrausch har funden, at en platineret og derpaa udglødet Platintraad giver en meget ensartet Vedhængen af Vand. Er der ikke konstant Temperatur, hvor man vejer, faar man vanskelig Temperaturen godt bestemt, da man ikke kan omrøre Vandet under Vejningen. Vægtens Svingninger dæmpes stærkt af Vandet; en hydrostatisk Vægt maa derfor, i Modsætning til, hvad man ellers ønsker, helst have stort Inertiemoment.

Et smaadelt Legemes Rumfang findes, ved at det indbringes i et Pyknometer, som forøvrigt fyldes med Vand eller, om fornødent, med en anden Vædske af bekendt Vægtfylde. Man vejer Legemet, det vejes op ved p gr. Pyknometret fyldt alene med Vand vejes op ved Q_1 gr. Pyknometret fyldt ved samme Temperatur, dels med Legemet dels med Vand, vejes op ved Q_2 gr. For at se hvorledes man heraf kan finde den af Legemet fortrængte Vandmængde x, tænke man sig Legemet og det vandfyldte Pyknometer anbragte ved Siden af hinanden paa samme Vægtskaal; de vejes da op ved $p + Q_1$. Dernæst bringes Legemet ned i Pyknometret, og det uddrevne Vand bliver paa Vægtskaalen; herved forandres Ligevægten ikke; der vejes nu op ved $Q_2 + u$, hvor u

er de Lodder, der kunne veje op mod det uddrevne Vand alene. Man har følgelig

$$Q_2 + u = Q_1 + p, \quad u = Q_1 - Q_2 + p.$$

Det uddrevne Vands sande Vægt x findes altsaa ved

$$x = Q_1 - Q_2 + p + k(Q_1 - Q_2 + p),$$

hvor k findes i Tabellen S. 63 svarende til $d_1 = 1{,}0$. Har Pyknometret haft forskellige Temperaturer t_1 og t_2 ved de to Vejninger, maa man til de Lodder, der bestemme x, føje et Led, som, naar Vædsken er Vand, med Tilnærmelse kan skrives som $\varphi = (f_2 - f_1 + \gamma(t_2 - t_1))V$, hvor V er en afrundet Værdi for Pyknometrets Rumfang, der kan findes ved fra Q_1 at trække det tomme Pyknometers Vægt; f_1 og f_2 er Vandets Vægtfylder ved ${t_1}^0$ og ${t_2}^0$ og $\gamma = {}^1/_{40000}$ er Glassets Udvidelseskoefficient. Legemets Rumfang ved ${t_2}^0$ bliver

$$v = (Q_1 - Q_2 + p + k(Q_1 - Q_2 + p) + \varphi)/f_2.$$

Er Pyknometrets Rumfang stort i Sammenligning med Legemets, bliver Metoden usikker, da Fejlene ved de to Temperaturbestemmelser i saa Fald gøre sig stærkt gældende paa Grund af det forholdsvis store Rumfang Vands Varmeudvidelse.

Et meget lille fast Legemes Vægtfylde kan findes, naar man kan tilvejebringe en Vædske, hvori det netop svæver, og som altsaa har samme Vægtfylde som Legemet; bestemmes Vædskens Vægtfylde, faar man ogsaa Legemets.

Maaling af Hulrum. Rumfanget af en Beholder til Afmaaling af en Vædske kan være givet enten ved et Mærke, hvorefter Vædskeoverfladen indstilles, eller ved Lukning med en indsleben Prop, Plade eller Hane, hvorunder Rummet helt udfyldes. Et Rum defineres desto bedre ved et Mærke, jo snævrere det er ud for Mærket. Vædskeoverfladen er sædvanlig buet ved Karvæggen; man indstiller i Reglen bedst efter Midten af Overfladen, ikke efter det Sted, hvor den støder til Væggen. Paa en Maalekolbe fører man i Reglen Mærket helt rundt om Halsen; man afpasser Vædskemængden saaledes, at Overfladen tangerer Mærkets Plan. Man vil faa forskelligt Rum, eftersom den Vædske, hvis Rum man maaler, har indbuet eller udbuet Overflade. Er Overfladen stor som i et Maaleglas holder man Øjet i en saadan Højde, at den plane Del af Overfladen viser sig som en ret Linie.

Kender man ikke Beholderens Udvidelseskoefficient tilstrækkelig nøje, maa man maale Rumfanget ved mindst 2 Temperaturer tilstrækkelig forskellige til at give Udvidelsen med en Nøjagtighed, der svarer til den, hvormed Afmaalingen kan finde Sted. Hulrummet udvider sig med samme Koefficient som Beholderens Materiale. Rummet maaler man ved at fylde det med Vand eller Kvægsølv, bestemme Temperaturen og derpaa finde den sande Vægt af Vædsken. Ved Temperaturbestemmelsen maa man, som omtalt S. 138, sikre sig ens Temperatur i hele Vædskemængden. Er der Forskel i Tryk indvendig og udvendig, maa man i mange Tilfælde tage Hensyn til den derved fremkaldte Rumforandring.

Afmaaler man Vædsken ved at afhælde den fra Maalekarret, maa man huske at der, naar det ikke er Kvægsølv, bliver hængende Vædske ved Væggene; ved ensartet Afhældning kan man, naar Karret er rent, gøre Regning paa, at den vedhængende Vædskemængde hver Gang bliver ens, saa at denne Mængde kan bestemmes en Gang for alle. Det kan for en Maalekolbes Vedkommende ske ved at man afsætter to Mærker paa Halsen, det nederste svarende til Paafyldning, det øverste til Afhældning.

Hvis man af en eller anden Grund ikke kan maale en Beholders Rumfang ved Fyldning med en Vædske, kan det undertiden ske, om end ikke med nogen stor Nøjagtighed, ved Indbringelse af Luft. Beholderen forbindes med et Maalerør for Luft, som det i Fig. 97 viste, saa at Luften i begge Rum har samme Tryk p, f. Ex. Atmosfærens Tryk. Luftrummet i Maalerøret til Mærket m kaldes u, og Rummet i Beholderen og Forbindelsesrøret til Mærket m kaldes V. Ved at føre Kvægsølv til Maalerøret driver man Luft over i Beholderen, saa at Rummet u formindskes til u_1, samtidig med at det fælles Tryk stiger til p_1. Er Temperaturen i Beholderen T og i Maalerøret t, finder man V ved at opstille den Ligning, der udtrykker, at Luftens reducerede Rumfang er ens før og efter Sammentrykningen. Man faar, idet $a = {}^1/_{273}$

$$\frac{pV}{1+aT} + \frac{pu}{1+at} = \frac{p_1 V}{1+aT} + \frac{p_1 u_1}{1+at}$$

Man vil tilstræbe at holde Temperaturen ens før og efter Sammentrykningen. Lykkes det ikke, saa at man faar T_1 og t_1 efter Sammentrykningen, maa de indføres for T og t paa højre Side af Lighedstegnet.

Er Beholderen en Luftpumpeklokke, kan man ad den Vej

finde et fast Legemes Rumfang uden at sænke det i en Vædske, idet man først efter det ovenstaaende bestemmer Klokkens Rumfang V. Derpaa indfører man Legemet under Klokken og gør et nyt Forsøg til Bestemmelse af det formindskede Rumfang V_1. Legemets Rumfang vil være $V - V_1$ (Volumenometer).

VÆDSKERS VÆGTFYLDE. *Pyknometret* er i sin simpleste Form en Flaske med godt indsleben Glasprop. Af Hensyn til Temperaturudjævningen gør man Væggene tynde, dog ikke saa tynde, at mulige Trykforskelle indvendig og udvendig kan forandre Rumfanget kendelig. Ved en Vægtfyldebestemmelse vejer man først det tomme Pyknometer og bestemmer derpaa dets Rumfang ved to forskellige Temperaturer, den laveste lidt højere end Stuetemperaturen. For at hindre Udskillelsen af Luft i Pyknometret, udkoger man det Vand, der bruges ved Rummaalingen. Man tilbereder et Vandbad med en stor Mængde Vand t^0 varmt. Beholdningen af udkogt Vand giver man samme Temperatur; Pyknometret sættes ned i Badet, og mens det staar der, fylder man det med Vand; da alle Dele paa den Maade i Forvejen have nær samme Temperatur, vil den fuldstændige Temperaturudjævning ske forholdsvis hurtig. Man omrører Badet og iagttager efter nogen Tids Forløb dets Temperatur t; denne antages som Pyknometrets Temperatur. Nu sættes Proppen i Pyknometret, som vil blive helt udfyldt, idet Overskuddet af Vand drives ud. Pyknometret indeholder nu $V_t f_t$ gr Vand, hvor V_t er Pyknometrets Rumfang ved t^0, f_t Vandets Vægtfylde; det er denne Vægt der skal findes ved den paafølgende Vejning. Man maa aftørre alt udvendigt Vand hurtigt og uden at varme Pyknometret med den aftørrende Haand, hvorefter Vejningen finder Sted.

Har det tomme Pyknometer været vejet op ved p gr og det fyldte med P gr, da vil Differensen $P - p$ gr være de Lodder, hvormed Vandet alene vilde vejes op, idet Glasmassens og Lodderne p's Vægttab falde bort ved Subtraktionen; ved Tabellen S. 63 faar man derfor Vandets sande Vægt lig $P - p + k(P - p)$, hvor k svarer til $d_1 = 1{,}0$, og Pyknometrets Rumfang bliver

$$V_t = \frac{P - p + k(P - p)}{f_t}$$

Foretager man derpaa en Bestemmelse ved den højere Temperatur

t_1, faaes V_{t_1}; derpaa findes Glassets Udvidelseskoefficient γ ved $V_{t_1} = V_t(1 + \gamma(t_1 - t))$.

Nu fyldes Pyknometret med den Vædske, hvis Vægtfylde d søges, og man gaar frem som før med Vandet. Er det fyldte Pyknometers Vægt nu Q, Temperaturen ϑ og Korrektionstallet for Vægttabet k', faar man $Q - p + k'(Q - p) = V_\vartheta d_\vartheta$

$$d_\vartheta = \frac{Q - p + k'(Q - p)}{V_\vartheta}$$

Er ϑ kun lidt forskellig fra t, behøver man ikke at bestemme Glassets Udvidelseskoefficient men kan regne den lig $^1/_{40000}$.

Det er vanskeligt ved det omtalte Pyknometer at sikre sig mod, at der før eller under Vejningen ved Opvarmning og dermed følgende Udvidelse undviger noget af den afmaalte Vædske. Man bruger derfor oftest andre Former (Fig. 93a og b), hvor Pyknometret dannes af en Beholder, som udmunder i to snævre Rør; der er to Rør af Hensyn til Fyldning og Tømning. I Fig. 93b er det ene Rør trukket ud i en Spids, mens det andet har et Mærke. Man fylder det ved Sugning gennem det tilspidsede Rør, idet det andet Rør stikkes ned i Vædsken; derpaa lader man det hænge ned i Vandbadet som vist i Figuren. Vædsken vil paa Grund af Haarrørsvirkningen fylde det tilspidsede Rør helt. Naar Overfladen i det andet Rør ikke længere flytter sig, er Temperaturudjævningen færdig, og man lægger da et Stykke Filtrerpapir mod Mundingen af det spidse Rør; herved suges der Vædske ud, indtil Overfladen i det andet Rør standser ved det der anbragte Mærke. Efterfølgende Fordampning kan undgaaes ved at anbringe smaa Hætter over Rørmundingerne (se Fig. 93a).

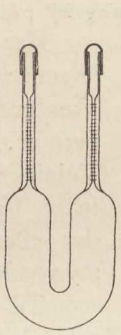


Fig. 93a

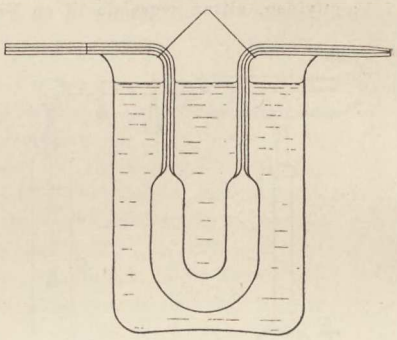


Fig. 93b

En Glasbeholder kan forandre Vægt, dels ved at Overfladen optager Vanddamp fra Luften, dels ved at Vand i Berøring med Glasset optager Bestanddele derfra. Behandling med kogende Vand

formindsker Glassets Paavirkelighed; denne er ringe ved de S. 125 omtalte Jenaglassorter.)

Exempel. Et Pyknometer af den i Fig. 93b viste Form blev tomt vejet op ved 26,6468 gr; fyldt med Vand af 18,25° vejedes det op ved 52,0512 gr og fyldt med Methylalkohol af 18,25° ved 46,8750 gr. Heraf og ved Tabellerne S. 63 og 188 faaes Vandets Vægt $P - p + k(P - p) = 25{,}4044 + 0{,}0269 = 25{,}4313$ og Pyknometrets Rumfang ved 18,25° $V = 25{,}4313/0{,}99857 = 25{,}4677$ cm³. Methylalkoholens Vægt $Q - p + k_1(Q - p) = 20{,}2282 + 0{,}0301 = 20{,}2583$; dens Rumfang er lig det ovenfor fundne, da Temperaturene var ens. Vægtfylden ved 18,25° bliver altsaa $d = 20{,}2583/25{,}4677 = 0{,}79545$. En Fejl paa 1° i Vandets Temperatur vil give 0,2 ‰ og i Methylalkoholens 1,2 ‰ Fejl i Vægtfylden. En Vejningsfejl paa 1 mg vil give henholdsvis 0,04 ‰ 0,05 ‰ Fejl i Vægtfylden. Undlod man at korrigere for Vægttabet i Luften, vilde det give 0,4 ‰ Fejl, altsaa lige saa meget som en Vejningsfejl paa 10 mg. En Indstillingsfejl paa 1 mm af Vandet i Røret, hvis Tværsnitsareal var 0,006 cm², vilde give 0,02 ‰ Fejl i Vægtfylden, altsaa svarende til en Vejningsfejl paa ½ mg.

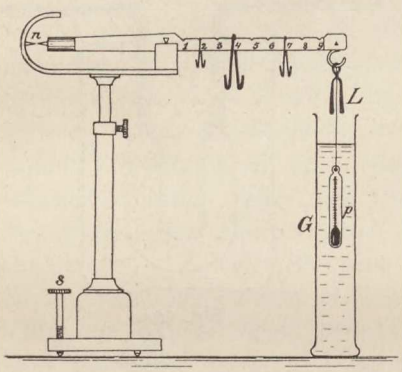


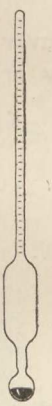
Fig. 94

Har man foretaget Afmaalingen af Vædsken ved en fra Vægtens meget forskellig Temperatur, maa man vente med Vejningen, til Pyknometret har faaet Vægtens Temperatur, da der ellers vil fremkomme forstyrrende Luftstrømninger.

Til Bestemmelse af Kvægsølvs Vægtfylde bruges Pyknometret, af Hensyn til en ensartet Afmaaling af Rumfanget forud for de to Vejninger, bedst saaledes som det er omtalt for faste Legemers Vedkommende, idet man fylder det næsten helt med Kvægsølv og derpaa fylder efter med Vand.

Naar Fordampningen eller Berøringen med Luften ikke medfører Ulæmpe, kan man bestemme en Vædskes Vægtfylde ved et fast Legemes Opdrift deri. Det finder Sted ved Mohrs (Westphals) Vægt (Fig. 94), som giver en hurtig Bestemmelse med ikke ringe Nøjagtighed. Apparatet bestaar af en Vægtstang, hvis ene Arm ved en Knivophængning bærer i en tynd Platintraad et Glaslegeme p, der sædvanlig indeholder et lille Termometer, mens den anden Arm er gjort saa tung, at den vejer Glaslegemet op. Ved Stilleskruen s bringes en paa Vægtstangen siddende Spids n i Højde med en fast Spids, naar p hænger i Luften i det tomme Cylinder-

glas G. Nu hælder man Vand i G, og i Krogen, der bærer Glaslegemet, hænger man et Lod af Vægt L, der er afpasset til ved en passende Stuetemperatur t at holde Opdriften i Ligevægt. Man giver Vandet Temperaturen t. Derpaa fjærnes Vandet, og Vædsken, som man ogsaa gør t^0 varm, bringes i Stedet. Nu tilvejebringer man Ligevægten ved Ryttervægte, hvis Størrelse er henholdsvis L $^1/_{10}\,L$ og $^1/_{100}\,L$. Vægtstangen er inddelt i 10 Dele ved Hak i Overkanten; faar man Ligevægt f. Ex. ved L i Afstand 0,4, $^1/_{10}\,L$ i Afstand 0,7 og $^1/_{100}\,L$ i Afstand 0,2 foruden ved det før paahængte Lod L i Afstanden 1 (der er altsaa forudsat en Vægtfylde > 1), da er den ukorrigerede Værdi for Vægttabet $1 \times L$ i Vand og $1{,}4720 \times L$ i Vædsken. Tallet 1,4720 bliver en ukorrigeret Værdi for Vædskens Vægtfylde ved t^0 i Forhold til Vand af samme Temperatur. Vægtfylden i sædvanlig Forstand faaes, efter Udtrykket S. 189, ved at multiplicere det fundne Tal med Vandets Vægtfylde ved t^0.



Man kan korrigere for Glaslegemets Vægttab i Luften, saaledes som sket ovenfor; det vil, naar Vægtfylden nærmer sig til 2 eller til $\frac{1}{2}$, gøre en Forskel paa henholdsvis omtrent 0,6 og 1 Promille i Vægtfylden. Man faar Fejlen fra Opdriften i Luften elimineret, hvis man anbringer et Lod $^1/_{100}\,L$ paa Armen 0,12, før man indstiller de to Spidser mod hinanden. Ved de følgende Vejninger er Loddet fjærnet. Er Vandets Temperatur bestemt 1^0 fejl, giver det ved 18^0 en Fejl i Vægtfylden paa omtrent 0,2 Promille; da vistnok alle Vædsker udvide sig stærkere end Vandet, faar en Temperaturfejl paa 1^0 i dem større Indflydelse; i Vinaand er Indflydelsen større end 1 Promille.

Aræometret (Fig. 95) giver en endnu hurtigere Bestemmelse af Vægtfylden. Det ydre Volumen af Udvidelsen indtil Nulstregen kaldes V, og Volumen af hver Inddeling paa Stilken u; naar Aræometret synker i Vand af t^0 til Nulstregen og i en given Vædske, der ogsaa er t^0 varm, til den r^{te} Streg, har man Fig. 95

$$P = Vf_t = (V + ru)\,d_t, \quad d_t = \frac{Vf_t}{V+ru} = \frac{f_t}{1 + ru/V}$$

hvor P er Aræometrets Vægt, f_t Vandets og d_t Vædskens Vægtfylde. En Tilvæxt δ til Vægtfylden vil give Opdriften paa V en Forøgelse $V\delta$; altsaa voxer Følsomheden med Størrelsen af Rumfanget V. Følsomheden staar i omvendt Forhold til Stilkens ydre Tværsnitsareal. Aræometrets Stand paavirkes af den Vædskemængde, der ved Haarrørsvirkningen løftes op om Stilken; da denne Mængde er forskellig for forskellige Vædsker, og for samme Vædske kun

er ens, naar Stilkens Overflade er meget ren, kan Aræometret kun bruges til grovere Bestemmelser af Vægtfylden.

AFMAALING AF LUFTARTER. Samtidig med at man maaler en Luftmasses Rumfang maa man nødvendigvis foruden Temperaturen ogsaa bestemme Trykket. Man beregner ofte det reducerede Rumfang, det Rum den afmaalte Luftmængde vilde indtage ved 0^0 C og 760 mm Tryk under den Forudsætning, at Mariottes og Gay-Lussacs Love gælder. Er det iagttagne Rum V, Temperaturen t og Trykket p mm, bliver det reducerede Rumfang

$$R = \frac{pv}{760(1 + at)}$$

hvor $a = 1/273$. Luftmassens Vægt Q er lig $0{,}001293\,\varphi R$ gr, idet φ er Luftartens Vægtfylde i Forhold til atmosfærisk Luft, begge Luftarter tagne ved samme Tryk og Temperatur. Kaldes Vægtfylden i Forhold til Brint φ_1, faaes $Q = 0{,}0000895\,\varphi_1 R$ gr.

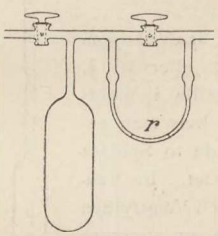


Fig. 96

Den nøjagtigste Afmaaling af en Luftmængde faar man ved at afspærre den i en Kolbe, som lukkes med en Hane eller ved Tilsmeltning af et snævert Glasrør; af Hensyn til Temperaturbestemmelsen anbringes Kolben i et Bad, hvis Temperatur maales samtidig med at Kolben lukkes; til samme Tid findes ogsaa Trykket i Kolben lig Trykket i det Rum, hvormed den staar i Forbindelse. Vil man have Atmosfærens Tryk i Kolben, indretter man det bedst saaledes, at man først giver Luftarten et lille Trykoverskud over Atmosfæren; Afmaalingen sluttes da med at man aabner fri Forbindelse til Atmosfæren saa længe som fornødent til Udjævning af Trykforskellen. Man maa huske, at en Trykforandring altid ledsages af en Temperaturforandring, hvilken altsaa ogsaa skal have Tid til at udjævnes. Er den afmaalte Lufts Tryk meget forskelligt fra Atmosfærens, kan man være nødt til at tage Hensyn til Trykforskellens Indflydelse paa Kolbens Rumfang; en af Rayleigh benyttet Kolbe, der rummede 1800 cm^3 blev $1/4$ cm^3 mindre ved at udpumpes.

I de mange Tilfælde, hvor man som ved Lufttermometret S. 142 maa afspærre den Luftmængde, hvis Rumfang søges, ved en Kvægsølvoverflade, bliver Nøjagtigheden betydelig forringet, fordi

Vædskeafspærringen skal kunne forenes med en god Bestemmelse af Trykket; hertil kræves nemlig, at den afspærrende Overflade er saa stor, at Haarrørstrykket bliver uden Betydning; men ved den store Overflade formindskes Rummaalingens Nøjagtighed. Da Haarrørstrykket i andre Vædsker er meget mindre end i Kvægsølv, kan man ofte med Fordel afspærre Luften ved en Vædskedraabe i et snævert, svagt buet Rør *r* som vist i Fig. 96, naar der ikke er Fare for, at Vædsken ved kemisk Virkning, Absorption eller Fordampning forandrer Luftmængden. Ved Afmaalingen varierer man det indre eller ydre Tryk, indtil Draabens to Overflader staa i lige Højde.

Fig. 97 viser et Apparat egnet til Bestemmelse af det reducerede Rumfang af en foreliggende Mængde af en Luftart, der tænkes afspærret over Kvægsølv i en Glasklokke. Apparatet bestaar af et Maalerør, der er inddelt i cm^3 fra et Mærke *m* paa det snævre Rør tæt ved Hanen *H*. Det ene af de to Rør tilvenstre for Hanen danner hvad man kalder en Lufthævert, et omtrent 1 mm vidt U-Rør, der ved den frie Ende er trukken ud til en Spids. Maalerøret og det dermed forbundne Siderør er sammen med et Termometer indesluttet i et vidt Glasrør, hvorigennem man fører en Vandstrøm. Forneden staar Maalerøret ved en Slange i Forbindelse med en Kvægsølvbeholder, der ikke er vist i Fig. Hanen *H* stilles til Forbindelse med Lufthæverten, og Hanen *h* paa Siderøret aabnes; man løfter Kvægsølvforraadet, saa at Maalerøret og derefter Lufthæverten fyldes derfra; i Siderøret stiger Kvægsølvet op over Hanen *h*; herefter lukkes begge Haner. Lufthæverten bringes nu ind under Glasklokken, Hanen *H* aabnes, og ved at sænke Kvægsølvforraadet trækker man Luften over i Maalerøret; naar Glasklokken er tømt for Luften, følger der Kvægsølv efter, og naar det har naaet Mærket ved Hanen *H*, lukkes denne. Nu aabnes Hanen paa Siderøret, og man løfter Kvægsølvet, indtil det staar lige højt i Maalerør og Siderør; Luften i Maalerøret har da (bortset fra Haarrørs-

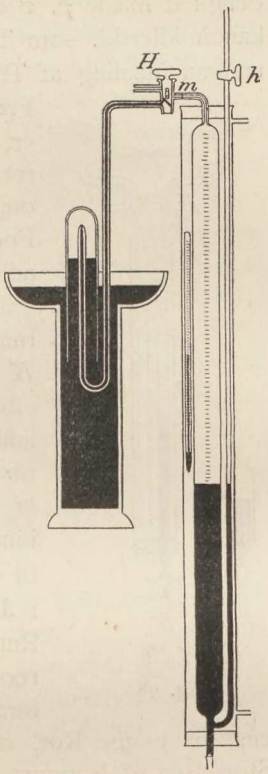


Fig. 97

virkningen i Siderøret) Atmosfæretrykket p; dens Rumfang og Temperatur aflæses direkte. Haarrørstrykket kan findes ved den Højdeforskel man har, naar begge Haner er aabne til den fri Luft.

Naar man som ved en Luftanalyse skal finde den Forandring, der f. Ex. ved Absorption af en af Bestanddelene i en Luftblanding er foregaaet med det reducerede Rumfang, maa man i Almindelighed maale p, v og t baade før og efter Forandringen. Man kan imidlertid, som Tilfældet er i Petterssons Luftanalyseapparat, undgaa Maaling af Tryk og Temperatur ved den i Fig. 98 viste Fremgangsmaade. Ved Siden af Maalerøret M er der stillet et lignende Rør, Kompensationsrøret K, der er lukket forneden; begge Rør er omgivne af samme Vandbad. De to Rør have Forbindelse hvert til sin Ende af det svagt nedadbuede snævre Rør I, som indeholder en Oliedraabe. Før Absorptionen forandrer man Luftrummet i M, til Oliedraaben viser lige Tryk i K og M, og Luftrummet v_1 i M aflæses. Derefter foretages Absorptionen, idet Hanen H lukkes, og Luftblandingen drives gennem Siderøret r over i et Absorptionskar; efter at den er trukken tilbage derfra, gives der atter Forbindelse til I, og man forandrer paany Rummet, til der er lige Tryk i K og M. Er Luftrummet i M nu v_2, vil det betyde, at det reducerede Rumfang af den absorberede Bestanddel var $100\,(v_1 - v_2)/v_1$ Procent af Blandingens; er der foregaaet Temperaturforandringer, vil de være ens for begge Rør, og de vil derfor være uden Indflydelse paa Størrelsen af Rummet v_2.

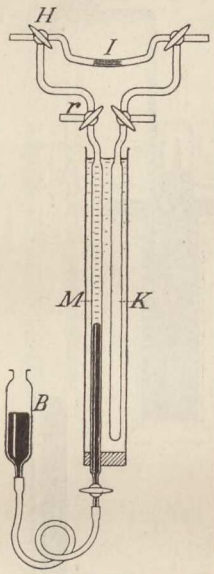


Fig. 98

Luftformige Legemers Vægtfylde. En Luftarts Vægtfylde kan findes ved Regnaults Metode. Der benyttes en Kolbe med en tilblæst Glashane; Kolben maa helst være saa stor, at den ved Atmosfæretryk rummer $^1/_2$ til 1 gr af Luftarten. Til Brug ved Vejningen indretter man en anden, tilsmeltet Kolbe af nær samme ydre Rumfang som den første og af samme Slags Glas. Ved hver Vejning hænges de op hver paa sin Vægtarm, hvorefter man tarerer eller vejer færdig paa sædvanlig Maade. Har man først funden den Tara, der maa til for at give Ligevægt med Hanekolben fuldstændig lufttom, finder man ved paafølgende Vejning Vægtmængden

af den Luft, som senere er bleven ført ind i den, uafhængig af Luftens Opdrift paa Kolberne, fordi denne Opdrift vedbliver at være lige stor for begge Kolber og derfor holdes i Ligevægt uanset de Forandringer i Atmosfærens Tryk og Temperatur, der maatte indtræde efter Tareringen, og som ellers vilde gøre sig stærkt gæ dende overfor den ringe Vægt af Luften i Kolben.

Tara q_0 svarende til tom Kolbe findes umiddelbart, hvis man udpumper Kolben stærkt med en Kvægsølvluftpumpe. Bruges Vandluftpumpe eller Stempelpumpe, bliver der en Luftrest tilbage med maaleligt Tryk. Man finder i det Tilfælde den nævnte Tara saaledes: Kolben fyldes med tør atmosfærisk Luft ved Atmosfæretryk B og Temperatur t, og den tareres ved den tilsmeltede Kolbe og Lodderne q_1. Dernæst udpumpes Kolben til det lille Tryk b; Temperaturen er t_2; den tareres nu ved Lodderne q_2, mens den helt tom vilde tareres ved Lodderne q_0. Ved Bestemmelse af den lille Størrelse $q_2 - q_0$ kan man regne Kolbens Rumfang konstant; har man, idet b ikke er større end 20—30 mm, sørget for at Temperaturene t_1 og t_2 er nogenlunde ens, (ikke mere end 1^0 forskellige), kan man sætte Luftmængderne i Kolben proportionale med Trykkene. Altsaa bliver

$$\frac{q_2 - q_0}{q_1 - q_0} = \frac{b}{B}, \qquad q_0 = q_2 - \frac{b}{B - b}(q_1 - q_2).$$

Er der en større Temperaturforskel, maa man regne med $b(1 + a(t_1 - t_2))$ istedenfor med b, idet $a = {}^1/_{273}$.

Ved Fyldning af Kolben med den Luftart, som skal vejes, maa man være forberedt paa, at Glassets Inderside indeholder Vand, som kan afgive Damp til Luftarten. Dels af den Grund og dels for at udskylle den Luft, som Kolben forud indeholdt, pumper man Kolben stærkt ud og indsender Luftarten, omhyggelig tørret, omtrent til Atmosfæretryk, og dette gentages flere Gange. Til Fjærnelse af Vandet i Glasset bidrager en samtidig Opvarmning af Kolben meget. Den endelige Fyldning af Kolben med dertil hørende Bestemmelse af Tryk p og Temperatur t sker nu som omtalt S. 196. Herefter hænges Ballonen paa Vægtskaalen, idet den tareres ved den tilsmeltede Kolbe og ved paalagte Lodder, hvis Vægt er q. Den afmaalte Lufts Vægt er da lig Vægten m i Luften af Lodderne $q - q_0$. Luftens Vægtfylde φ i Forhold til atmosfærisk Luft af samme Tryk og Temperatur faaes nu ved at dividere

m med den Vægt af atmosfærisk Luft $m_1 = 0{,}001293\, pv/760\,(1 + at)$, som vilde fylde Kolben ved t^0 og Trykket p.

$$\varphi = \frac{m}{m_1} = \frac{m\,760(1+at)}{0{,}001293\, pv}.$$

Kolbens Rumfang v findes ved Vejning af det Vand, som fylder den op til Hanen. Rumfanget kan ogsaa findes, om end mindre nøjagtigt, ved at man gør et Forsøg som det ovenfor beskrevne, med atmosfærisk Luft; idet m, p og t iagttages, og idet $\varphi = 1$, findes v af ovenstaaende Ligning.

Damptæthed. Et luftformigt Stofs Vægtfylde i Forhold til atmosfærisk Luft eller Brint af samme Tryk og Temperatur som Stoffet kaldes Damptæthed, naar Stoffet er fast eller draabeflydende ved almindelig Temperatur. De tre velkendte Metoder til Damptæthedsbestemmelse, Dumas', Meyers og Gay-Lussacs, finde Anvendelse under forskellige Forhold. Stoffet maa undersøges ved en saadan Kombination af Tryk og Temperatur, at Dampen er umættet, fjærnet saa langt fra Mætningspunktet, at man kan være sikker paa at have hele den undersøgte Mængde i Dampform. Hensigten med Damptæthedsbestemmelsen er i Reglen at faa Stoffets Molekyltal bestemt. Ved Gay-Lussacs Metode maaler man det Rumfang, som Dampen fra en afvejet Mængde af Stoffet indtager, idet den er afspærret over Kvægsølv i et lodret, foroven lukket Glasrør; dette varmes ved et omgivende Vædske- eller Dampbad; Metoden egner sig til Undersøgelse af Damptætheden ved forskellige Tryk lavere end Atmosfærens. Man kan ikke gaa meget højt op med Temperaturen, hvorfor Metoden ikke egner sig for Stoffer med højt Kogepunkt. Dumas' Metode er analog med Regnault's Metode til Maaling af en Luftarts Vægtfylde, idet man vejer den Dampmængde, som fylder en Kolbe af givet Rumfang ved givet Tryk og Temperatur. Ved den og ved Meyers Methode er man henvist til at arbejde ved Atmosfærens Tryk, mens man kan variere Temperaturen indenfor vide Grænser; især med den sidstnævnte Metode kan man gaa til meget høje Temperaturer.

Apparatet til Meyers Metode kan indrettes som det er vist i Fig. 99. AB er et omtrent 1 m højt Glasrør, Damprøret, der forneden er udvidet til en Beholder B. Foroven har Røret en Udvidelse, hvori en Hane H med stor Gennemboring kan anbringes ved en Kautsjukprop; gennem Siderøret r forbindes Damprøret med et Maalerør M. Damprøret sidder ved en gennemskaaren

Korkprop i Mundingen *C* af en høj Blikkedel, hvor man holder en Vædske i Kog, hvis Kogepunkt ligger højere end den undersøgte Vædskes.

Vil man foretage en Damptæthedsbestemmelse, lader man Vædsken i Kedlen koge saa længe, at Apparatets Temperaturer blive stationære. Den undersøgte Vædske anbringes i en lille afvejet Glasbeholder, som er vist i naturlig Størrelse tilhøjre i Fig. 99. Vædskemængden maa afpasses efter Maalerørets Størrelse. Ved Opvarmning udjager man største Delen af Luften i Beholderen, som derpaa lukkes ved Tilsmeltning, hvorefter den vejes. Maalerøret *M* er aabent forneden og ender foroven i et snævert Rør med en Hane *L*; det er anbragt i et Vandbad, hvoraf Vandet kan tappes ud gennem et Rør forneden. Idet begge Haner *L* og *H* aabnes og Badet fyldes til Randen med Vand, fylder ogsaa Maalerøret sig til op i det snævre Rør. Damprøret udtørres ved at man, mens det hedes af Dampen i Kedlen, fører en Strøm af tør Luft til ved dets Bund, hvorefter Hanen *H* lukkes. Nu skal Vædskebeholderen bringes ned i Damprøret, men i Forvejen skal den tilsmeltede Spids knækkes af; skulde der sidde Vædske oppe i denne Spids, maa man ved Opvarmning destillere den bort, før Spidsen knækkes af. Man aabner nu Hanen *H* og lader Beholderen falde ned i Damprøret, i hvis Bund der er lidt Kvægsølv til at tage mod Stødet, hvorefter man hurtig lukker Hanen *H*. Vædsken fordamper i Damprøret, og idet det forudsættes at den har større Vægtfylde end Luften deri, vil den i nogen Tid holde sig ved Bunden, hvor den dannes; samtidig driver den et Rumfang Luft gennem Hanen *L* over i Maalerøret. Her sænker man ved Udtapning Vandspejlet i Vandbadet, saaledes at det stadig holdes i Højde med den synkende Vandflade i Maalerøret. Naar denne Vandflade standser, er Dampudviklingen færdig, og man lukker Hanen *L*. Man maa vente saa længe hermed, at man er sikker paa, at den sidste Vædskemængde er fordampet, men dog ikke saa længe, at der kan være Fare for, at der skal gaa Damp ved

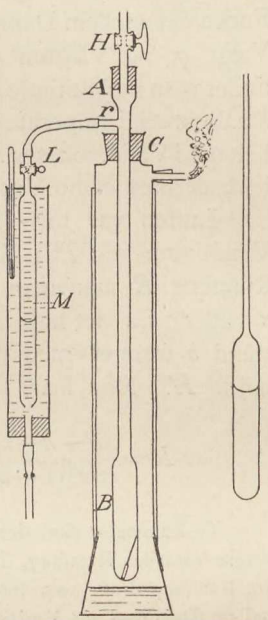


Fig. 99

Diffusion over i Maalerøret; Damprøret er gjort langt forat forhale Diffusionen. Herefter har man faaet et Rumfang Luft over i Maalerøret, som er uddreven af Dampen; denne er dannet ved Atmosfæretryk, eftersom den indre og ydre Vandoverflade endte med at staa lige højt. Da Luftmængden overalt i Damprøret undtagen i det af Dampen optagne Rum er den samme som før, indser man, at den uddrevne Luft vilde fylde samme Rum som Dampen, hvis den fik samme Temperatur som den. Damptætheden φ er derfor Forholdet mellem Dampens Vægt, som er lig den indbragte Vædskes Vægt q, og Vægten af den uddrevne Luft. Denne sidste Vægt finder man ved at finde Luftmængdens reducerede Rumfang. Forat faa Maalerørets Temperatur godt bestemt fylder man nu igen Vandbadet helt med Vand, aflæser Rumfanget v og Vandhøjden H over Overfladen i Maalerøret samt Vandets Temperatur t og Barometerstanden.

Luften var tør i Damprøret, mens den har mættet sig med Vanddamp ved t^0 i Maalerøret. Ved Beregning af det reducerede Rumfang R maa man derfor subtrahere mættet Vanddamps Tryk π ved t^0 fra det hele Tryk; dette er lig den reducerede Barometerstand b forøget med den til Kvægsølvhøjden h reducerede Vandhøjde H. Man faar

$$R = \frac{(b+h-\pi)v}{760(1+at)}, \qquad \varphi = \frac{q}{0{,}001293\,R} = \frac{760q(1+at)}{(b+h-\pi)v}$$

Til Rummet v skal der egentlig lægges $u/(1+a(T-t))$, hvor u er den indbragte Vædskes Rumfang, T Temperaturen i Damprøret. Det er grundet paa, at det Rumfang Luft, som fortrænges i Bunden af Damprøret, er lig Differensen mellem Dampens og Vædskens Rumfang. I Reglen vil u være saa lille mod v, at man ikke behøver at tage Hensyn dertil, saa meget mere som den Luft, der strømmer ind i Vædskebeholderen, ved at Spidsen brækkes af, ved sin Udvidelse giver en Fejl i modsat Retning.

Det er, især overfor høje Temperaturer i Damprøret, et meget stort Fortrin ved Meyers Metode, at man ikke har Brug for et nøjagtigt Kendskab til Dampens Temperatur; man maa kun være sikker paa, at den ikke varierer kendeligt under Forsøget; Dumas' Metode kræver en nøjagtig Temperaturbestemmelse. Det er af største Vigtighed at sørge for, at Temperaturen ikke forandres i nogen Del af Damprøret under Forsøget; det er særlig den Del af Røret, som staar udenfor Kedlen, der er udsat for Temperaturforandringer. Undersøger man en Damp, hvis Vægtfylde er mindre end atmosfærisk Lufts, maa man fylde Damprøret med en Luftart

som Belysningsgas eller Brint, der har lille Vægtfylde og kun absorberes i ringe Grad af Vand.

KALIBRERING AF MAALERØR kan for Haarrørs Vedkommende foretages som det er omtalt S. 127 for Termometerrøret. En Inddelings absolute Rumværdi kan findes ved efter Kalibreringen at indføre en Kvægsølvmængde i Røret, maale det Antal Inddelinger den fylder, og derpaa veje den. Da Kvægsølvtraaden i Røret ender med to krumme Overflader, indkommer der en Fejl, hvis man beregner en Inddelings Rum ved at dividere Kvægsølvets Rum med Antallet af Inddelinger, som det spændte over. Man retter Fejlen ved fra det iagttagne Antal Inddelinger at trække $^2/_3$ af Rørets Radius maalt i 1 Inddelings Længde som Længdeenhed.

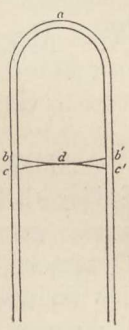


Fig. 100

Et Maalerør som det i Fig. 97 viste kan man kalibrere ved i flere Gange at udtappe Kvægsølvet, som fylder det, og ved hver Gang at iagttage Kvægsølvhøjden og veje det udtappede Kvægsølv. Et ved den ene Ende lukket, vidt Rør (Fig. 100) kalibreres, ved at man stiller det med Mundingen opad og fylder det efterhaanden ved den ene Gang efter den anden at tilsætte hver Gang ligestore Mængder af Kvægsølv. Ved denne Fylding har Overfladen Formen bdb'; ved Luftmaaling over tørt Kvægsølv har Overfladen derimod Formen cdc'. Hvis man ved Kalibreringen har funden Rummet op til en Delestreg ved d lig med v, vil man ved Luftmaalingen over tørt Kvægsølv have et Rumfang $v + \delta_1 v$ over Delestregen ved d, idet $\delta_1 v = bb'c'c$. Findes Luften derimod afspærret over en Vædske, som fugter Rørvæggene, bliver Rummet over d lig med $v + \delta_1 v - \delta_2 v$. Efter Bunsens Opgivelser er nedenstaaende Værdier for $\delta_1 v$ og $\delta_2 v$, svarende til Rørvidder mellem 14 og 21 mm, beregnede.

Rørdiameter	14	15	16	17	18	19	20	21 mm
Kvægsølv $\delta_1 v$	0,175	0,187	0,193	0,200	0,193	0,181	0,163	0,139 cm^3
Vand $\delta_2 v$	0,257	0,276	0,292	0,306	0,318	0,329	0,339	0,346 cm^3
7,5 % Natropl. $\delta_2 v$	0,195	0,205	0,211	0,216	0,216	0,216	0,214	0,208 cm^3

X. Maaling af elektrisk Strømstyrke, Spændingsforskel og Ledningsmodstand.

AMPEREMETRET er et Maaleapparat, som ved en Visers Stilling til Inddelinger giver Styrken i Amperer af den Strøm, som sendes gennem Apparatet. Det skal kunne bruges i Nærheden af Dynamoer og Stærkstrømsledninger uden at paavirkes kendelig af den fra disse udgaaende Magnetkraft. Man kan derfor ikke bruge Virkningen af Strømmen paa en om en Axe drejelig Magnet (*Kompasgalvanometer*). Sædvanlig benytter man den omvendte Ordning: en fast Magnet, i hvis Felt en af Strømlederen dannet Ramme er anbragt drejelig om en fast Axe (Deprez-d'Arsonvals Galvanometer eller *Rammegalvanometret*). *NS* i Fig. 101 er Polskoene for en kraftig Staalmagnet; de er udhulede saa de danne hver sin Del af en Cylinderflade; Rummet indenfor denne er næsten udfyldt af en fastsiddende Cylinder *C* af blødt Jærn; i det snævre Rum mellem de to Cylinderflader dannes der et intensivt magnetisk Felt, hvis Magnetkraft i den største Del af Rummet er konstant og rettet ind mod Cylinderaxen. Lederen for Strømmen dannes af Vindinger af tynd, isoleret Kobbertraad, der vikles paa en let, rektangulær Ramme, hvis Overside ses i Figuren; Rammen er med meget ringe Gnidningsmodstand (Pinoler i Stenlejer), bevægelig om en Axe, som falder sammen med Cylinderaxen, saaledes at Rammens lange Sider (jfr. Fig. 102) bevæge sig i det cylindriske Magnetfelt; Axen er saa nær som mulig lagt gennem Traadrammens Tyngdepunkt, hvorved Apparatets Visning bliver uafhængig af dets Stilling. Strømmen føres til ved to fine Spiralfjedre, hvoraf den ene sees i Fig. 101; hver Fjeder er indad

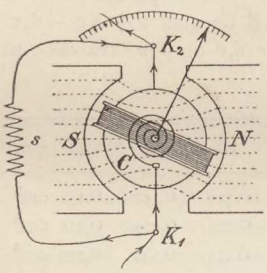


Fig. 101

forbunden med en Ende af Ledningstraaden, mens den udad er isoleret og fastgjort til Apparatets Stativ og ledende forbunden med en af dets to Klemskruer K_1 og K_2. Ved Forbindelsen med Fjedrene bliver Rammen til en Snovægt, som vil drejes ud fra sin Ligevægtsstilling en Vinkel proportional med Momentet for de Kræfter, der virke paa Traadrammen. Er den Del af Traaden, som findes i Magnetfeltet, l cm lang, og er Feltkraften F, vil Rammen paavirkes af et Moment $^1/_{20}$ *Fila*, hvor a er Rammens Bredde, i Strømstyrken i Amperer; Momentet og derfor ogsaa Udslaget er proportionalt med Strømstyrken, saalænge Rammen bevæger sig i det konstante Felt; man kan af den Grund afsætte Amperestregerne med lige store indbyrdes Afstande over en Vinkel større end 90^0.

Er Vindingerne opviklede paa en Metalramme, faar man en meget virksom Dæmpning af Rammens Svingninger ved de Induktionsstrømme, som Bevægelsen i det kraftige Felt frembringer i den; Bevægelsen bliver derfor uden Vanskelighed aperiodisk (se S. 88), saa at Viseren strax viser Udslaget uden at gøre Svingninger om den ny Ligevægtsstilling.

Som ovenfor nævnt føres Strømmen til Rammen gennem de to spiralformede Fjedre; disse maa være tynde for ved deres Bøjelighed at gøre Rammen let bevægelig; af den Grund kan man kun sende en svag Strøm gennem Rammens Vindinger. Vil man indrette et Amperemeter til stærkere Strømme, maa man derfor bruge en Shunt s i Fig. 101; Shunten anbringes sædvanlig indeni Apparatet som et uforanderligt Tilbehør dertil. Da Vindingerne saaledes med Shunten danne en sluttet Kreds, vil der fremkomme en Dæmpning ved Induktionsstrømme, som opstaa i Kredsen, naar Rammen svinger.

SPEJLGALVANOMETRET er et Galvanometer, hvor der anbringes et lille Spejl i fast Forbindelse med den bevægelige Del, saa at dennes Drejninger kunne iagttages ved Spejlaflæsning; man tilsigter herved at opnaa større Følsomhed end den et Amperemeter kan give; er den bevægelige Del en Magnet, hænger den i en Traad med den mindst mulige Snomodstand, sædvanlig et Silkespind, idet den faar sin Ligevægtsstilling ved Jordmagnetismen. Rammegalvanometret derimod er en Snovægt, hvor Ligevægten er betinget af Snomodstanden i den Traad, hvori Rammen hænger. Spejlgalvanometrets større Følsomhed er betinget af, at man kun

faar med smaa Udslagsvinkler at gøre, og af at man, da Apparatet ikke skal være transportabelt, kan have dets bevægelige Del hængende i en tynd Traad, saa at man er fri for Gnidningsmodstand og derfor kan arbejde med mange Gange mindre Kræfter end i Amperemetret. Den lille Udslagsvinkel har for Kompasgalvanometret den Betydning, at man kan lægge Vindingerne tæt omkring den ophængte Magnet og dog beholde en simpel Relation mellem Udslag og Strømstyrke (jvfr. S. 44). Bruges Rammegalvanometret, opnaar man ved det lille Udslag, at man kan udfylde næsten hele den konstante Del af Feltet med Vindinger, uden at disse komme ud deraf, naar Rammen svinger ud. I Fig. 102 er vist et Spejlgalvanometer; N og S er de udhulede Polsko for en Staalmagnet; mellem dem og Jærncylindren C er Rammen med Spejlet f anbragt, hængende i en tynd Metaltraad, som fører Strømmen til; Strømmen føres videre gennem den tynde, skruesnoede Traad under Rammen.

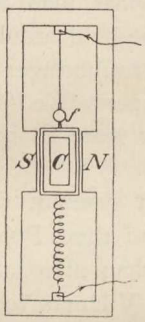


Fig. 102

Man kan drive Følsomheden betydelig videre med Kompasgalvanometret end med Rammegalvanometret, fordi man ved at bruge astatisk Dobbeltnaal og ved at svække det jordmagnetiske Felt kan formindske saa at sige uden Grænse den Kraft, der bruges til at holde Strømmens Virkning i Ligevægt. Derimod kan man, af Hensyn til Traadrammens Vægt, ikke uden Grænse formindske Snomodstanden i Rammegalvanometret. Kompasgalvanometrets Anvendelse er i de senere Aar bleven stærkt begrænset paa Grund af de mange Stærkstrømsledninger, man nu bruger, og særlig efter den udbredte Anvendelse i større Byer af elektriske Sporveje, hvor Skinnerne bruges som Tilbageledning for Strømmen; fra disse udbreder der sig Jordstrømme i vide Kredse, som fremkalde idelige Perturbationer i det jordmagnetiske Felt. Kun ved at omgive Galvanometret helt med et tykvægget Hylster af blødt Jærn kan man gøre sig uafhængig af disse Forstyrrelser (Pansergalvanometret).

Et Galvanometers *Følsomhed* F er bestemt ved $F = 1/i_0$, hvor i_0 er den Strøm, der fremkalder et Udslag lig 1 Inddelingsenhed, f. Ex. 1 mm ved Spejlaflæsning. En Strøm af Styrke i giver da et Udslag $i/i_0 = Fi$ Enheder. Nu kan der i et Galvanometer af en given Type lægges flere eller færre Vindinger, eftersom man vikler med tyndere eller tykkere Traad; jo flere

Vindinger des følsommere Galvanometer og des større Modstand. I hver Type er der et vist Rum V til Raadighed for Vindingerne; Rummets Størrelse er i Kompasgalvanometret begrænset ved, at de ydre Vindingslag have en svagere Virkning end de indre paa Grund af deres større Afstand fra Magneten, og de have større Modstand paa Grund af deres større Længde. I Rammegalvanometret bliver Rummet lille, fordi Magnetfeltet vilde tabe i Intensitet, hvis man skaffede Plads til flere Vindinger ved at forøge Afstanden mellem Jærnkærnen og Magnetens Polflader. Er L og d Traadens Tykkelse og Længde, n Antallet af Vindinger, r Traadens Modstand, C_1, C_2 . . . C_6 Konstanter, har man tilnærmelsesvis

$$V = C_1 L d^2 = C_2 n d^2, \qquad r = C_3 \frac{n}{d^2}, \qquad n = C_4 \sqrt{r}$$

$$F = \frac{I}{i_0} = C_5 n = C_6 \sqrt{r}.$$

Et Galvanometers Følsomhed er altsaa proportional med Kvadratroden af dets Modstand. Følsomheden afhænger endvidere af den Størrelse man giver Modkraften mod Strømmens Virkning; den er relativt given ved den reciproke Værdi af Svingningstidens Kvadrat (jvfr. S. 113). Man har vedtaget at tage som Maal for en Galvanometertypes Følsomhed det Udslag F_0 mm, som 1 Mikroampere (10^{-6} Amp) fremkalder, naar Modstanden er 1 Ohm, og Tiden for en hel Svingning er 10 sek, og naar Spejlet er fjærnet 1000 mm fra Maalestokken. For et Kompasgalvanometer kan man have $F_0 = 1000$; blev her Modstanden 3600 Ohm og Afstanden 2000 mm, vilde man ved $^1/_5$ mm Udslag kunne mærke en Strøm paa $^1/_{600\,000}$ Mikroamp. eller $^1/_6 \times 10^{-11}$ Amp.

Kaldes Strømkredsens elektromotoriske Kraft e (den skal i det følgende betegnes med E. K.), og kaldes Modstanden udenfor Galvanometret R, faar man Udslaget $a = F_0 e \sqrt{r}/(R + r)$, idet e maales i Mikrovolt. Betragtes e og R som givne, mens r's Værdi kan vælges, giver dette Udtryk Maximum for a, naar $r = R$. Tilsigtes det størst mulige Udslag, maa man derfor vælge Galvanometermodstanden saa nær som mulig lig med Modstanden i den øvrige Del af Kredsen. Man har jævnlig til samme Galvanometer flere Ruller med forskellig Modstand til Ombytning.

Ballistisk Galvanometer. Ved Maaling af Strømstyrke ønsker

man et lille Inertiemoment for den bevægelige Del for ved kort Svingningstid og virksom Dæmpning at fremskynde Iagttagelsen af Ligevægtsstillingen. Det omvendte er Tilfældet, naar man skal iagttage det første Udsving i Galvanometret; da gælder det om, at Bevægelsen ud til Yderstillingen er langsom, for at man kan faa Tid til at iagttage denne. I et Galvanometer til saadant Brug giver man derfor den bevægelige Del et stort Inertiemoment; det kaldes ballistisk paa Grund af Analogien med det ballistiske Pendul; det bruges til Maaling af i kort Tid udladede Elektricitetsmængder, som i Galvanometret fremkalder een en lige saa kort Tid varende Stødvirkning. Det herved fremkaldte første Udsving α_1 er ifølge S. 116 proportionalt med det i den korte Tid τ meddelte Bevægelsesmængdemoment $I\omega$, idet $\alpha_1 = \pi I\omega / H_1\vartheta$, naar der ingen Dæmpning er. Er der Dæmpning, beregnes første Udsving α'_1 ved Ligningen S. 91 som den Værdi for φ, der gør $\omega = o$ første Gang efter Tiden Nul. Man faar $\alpha_1 = \eta\alpha'_1$, hvor $\eta > 1$ er en Konstant, som alene afhænger af Dæmpningsforholdet. Er Dæmpningen undersøgt (S. 92), kan man derfor af det iagttagne Udsving α'_1 regne sig til det Udsving α_1, man vilde have faaet uden Dæmpning. I nedenstaaende Tabel findes Værdier for η svarende til forskellige Dæmpningsforhold $f = \alpha'_n / \alpha'_{n+1}$.

log f	f	η	log f	f	η	log f	f	η
0,00	1,000	1,0000	0,16	1,445	1,1859	0,32	2,089	1,3694
0,02	1,047	1,0231	0,18	1,514	1,2091	0,34	2,188	1,3918
0,04	1,096	1,0463	0,20	1,585	1,2324	0,36	2,291	1,4140
0,06	1,148	1,0694	0,22	1,660	1,2555	0,38	2,399	1,4360
0,08	1,202	1,0927	0,24	1,738	1,2785	0,40	2,512	1,4578
0,10	1,259	1,1160	0,26	1,820	1,3014	0,42	2,630	1,4794
0,12	1,318	1,1393	0,28	1,905	1,3242	0,44	2,754	1,5008
0,14	1,380	1,1626	0,30	1,995	1,3469	0,46	2,884	1,5219

For ikke at forringe Følsomheden indrettes det ballistiske Galvanometer med ringe Dæmpning; derfor vil Spejlet vedblive at svinge længe efter at første Udsving er iagttaget, og man kan ikke gøre en ny Iagttagelse, før det atter er kommen i Ro. Ved Rammegalvanometret undgaar man denne Ulæmpe ved at kortslutte Galvanometerledningen strax efter Iagttagelsen; herved vil der sædvanlig opstaa en saa stærk Dæmpning, at Spejlet kommer i Ro efter faa Svingninger.

Dæmpningen kan i Kompasgalvanometret opnaaes ved Foucaultske Strømme i en udhulet Kobberblok, indeni hvilken Magneten svinger; herved forringes dog Følsomheden, da Kobberet holder Vindingerne i Afstand fra Magneten. I følsomme Galvanometre bruges derfor Luftdæmpning, idet man anbringer lette Vinger i Forbindelse med Magneten, men udenfor Traadrullerne.

I Rammegalvanometret faar man, som nævnt S. 205, let en kraftig Dæmpning ved at opvikle Ledningen paa en Metalramme; vil man undgaa Dæmpningen, afbryder man Rammen et Sted ved en Isolator; desforuden har man, naar Kredsen er sluttet, en Dæmpning fra Vindingerne, som er forskellig efter den ydre Modstand; dette er en Ulæmpe ved det ballistiske Galvanometer, idet et og samme Udsving i Henhold til hosstaaende Tabel faar forskellig Betydning efter Kredsens Modstand.

Shunt bruges i Forbindelse med Galvanometret forat gøre dette anvendeligt overfor stærkere Strømme end dem det uden Shunten kan modtage. Er Shuntens Modstand $R/9$, $R/99$, $R/999$ . . ., hvor R er Galvanometrets Modstand, bliver Udslagets Betydning henholdsvis 10, 100, 1000 . . . Gange saa stor som den er uden Shunten. Den i Fig. 103 viste Shunts Værdi kan forandres, ved at man flytter en Messingprop mellem de viste Kontaktstykker; tjærnes Proppen, er Galvanometret ushuntet. Galvanometerledningen dannes af Kobber for at opnaa den af Kobberets store Ledningsevne betingede Følsomhed; da man ikke har det Hensyn at tage overfor Shunten, dannes den af en modstandskonstant Legering som Manganin. Hermed følger rigtignok den Ulæmpe, at det shuntede Galvanometers Udslags Betydning varierer med Luftens Temperatur, fordi denne har Indflydelse paa Kobberets, men ikke paa Manganinets Modstand og saaledes forrykker det rette Forhold mellem disse Modstande; men man vilde med en Kobbershunt jævnlig faa en endnu større Indflydelse, som tilmed ikke altid kunde kontrolleres, paa Grund af Strømvarmen; da den afhænger af Strømmens Kvadrat, vil den nemlig opvarme Shunten stærkere end Galvanometerledningen, medmindre man giver Shunten et meget stort Tværsnit, hvorved den bliver tung, omfangsrig og kostbar.

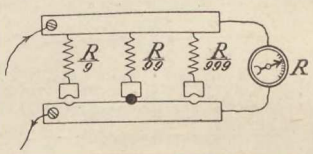


Fig. 103

Ayrton og Mather have indrettet en Shunt af den i Fig. 104 viste Konstruktion. Mellem de med $1/1$, $1/10$, $1/100$, $1/1000$ og d

mærkede Messingklodser findes indskudt Modstandene 9000, 900, 90 og 10 Ohm; en Messingskinne *ab* kan ved en Messingprop forbindes med enhver af Klodserne. Galvanometret forbindes med de to Klemmer *d* og *c*, mens Strømmen føres til ved *a* og *d*. Naar Proppen staar ved $^1/_1$ er Strømmen i i Galvanometret lig med $10000/(R + 10000)$ Gange Hovedstrømmen I, idet Galvanometermodstanden er R Ohm; naar R ikke er meget stor, forringes Følsomheden kun lidt herved, men flyttes Proppen efterhaanden til hver af de følgende Klodser, bliver Følsomheden hver Gang forringet til $^1/_{10}$ af hvad den var ved den foregaaende, uanset Galvanometermodstandens Værdi; forsaavidt er samme Shunt lige godt anvendelig overfor alle Galvanometre, mens Modstandene i en almindelig Shunt, der forbindes saaledes som vist i Fig. 103, maa afpasses særlig efter hvert Galvanometer forat tidele Følsomheden.

MAALING AF VEXELSTRØM. Sender man en Vexelstrøm gennem et almindeligt Kompas- eller Rammegalvanometer, vil de hurtig skiftende, modsatte Virkninger ophæve hinanden, saa at der intet Udslag fremkommer. Men hvis man indretter et Galvanometer med en meget kort Svingningstid og saaledes, at man kan variere denne Tid, da vil man faa en forholdsvis stærk Virkning, naar man opnaar en Svingningstid lig Perioden i Vexelstrømmen; da vil nemlig den bevægelige Del komme i Svingninger, og den vil følges saaledes med Strømvexlingen, at den faar en Impuls til Forstærkelse af hver Svingning; Størrelsen af Udsvinget vil blive konstant, naar det fra Strømmen modtagne Arbejde bliver lig det til Luftmodstand og andre Modstande afgivne Arbejde. Man har grundet Maaleapparater herpaa, *Vibrationsgalvanometre*.

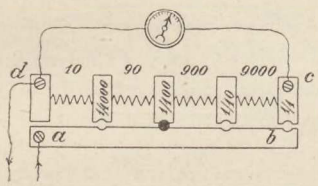


Fig. 104

Den Varmemængde, en Vexelstrøm i udvikler i hvert sek ved at gennemløbe en Leder af Modstand r, er $Q = \frac{r}{4{,}2\,t}\int_0^t i^2\,dt$. Er Lederen en tynd Traad, vil denne hurtig faa en stationær Temperatur betinget af, at den til Omgivelserne i hvert sek afgivne Varmemængde er lig den modtagne. Temperaturoverskuddet er tilnærmelsesvis proportionalt med ovenstaaende Integral; ogsaa herpaa har man grundet Maaleapparater for Vexelstrøm.

Sædvanlig benyttes dog *Elektrodynamometret*, bestaaende af en eller to faste Traadruller med lodrette Vindinger og en i en Bifilar- eller Torsionsophængning ophængt Traadrulle, hvis lodrette Vindinger i Ligevægtsstillingen er vinkelrette paa den faste Rulles (Fig. 105). Lader man en konstant Strøm af Styrke i gaa gennem begge Ruller, vil den bevægelige paavirkes af et Moment H, der er proportionalt med i^2, $H = Ki^2$. Udslaget α bliver altsaa proportionalt med Strømmens Kvadrat. Sender man en Vexelstrøm i gennem Rullerne, bliver Momentets Middelværdi for Tidsrummet t $H = K\frac{1}{t}\int_0^t i^2\,dt$. Det endelige Udslag afhænger af Grænseværdien for dette Udtryk svarende til $t = \infty$. Er Strømmen en Sinusstrøm, $i = i_1 \sin bt$, hvor i_1 er Strømmens største Værdi, mens Perioden er $T = 2\pi/b$, bliver nævnte Grænseværdi lig $^1/_2\, Ki_1^2$, og Udslaget $\alpha = {}^1/_2\, D.i_1^2$, idet D er en Konstant, som kan bestemmes ved at sende en ved et Galvanometer maalt Jævnstrøm gennem Elektrodynamometret; har den Styrken i, faaes et Udslag $\alpha = Di^2$. Dynamometrets Følsomhed er lig Di; den aftager altsaa med Strømmens Styrke; derfor egner Dynamometret sig ikke til som »*Nulinstrument*« at paavise Ligevægt mellem de E. K. i en Leder; hertil kan Vibrationsgalvanometret eller Telefonen bruges. Ved Elektrodynamometret faar man Størrelsen $i_e = [^1/_t \int_0^t i^2\,dt]^{\frac{1}{2}}$ bestemt; den kaldes den effektive Strømstyrke, fordi man ofte faar den at regne med, naar man vil udregne det Arbejde, en Vexelstrøm udfører i sin Leder.

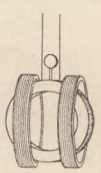


Fig. 105

MAALING AF SPÆNDINGSFORSKEL. Spændingsforskellen mellem to Punkter af en Leder kan findes ved at man forbinder Punkterne med to indbyrdes isolerede Ledere, saaledes de to Kvadrantpar i et *Elektrometer* eller de to Belægninger i en Kondensator. Herved afgives der til Lederparret en Elektricitetsmængde, som er proportional med Lederparrets Kapacitet og med den søgte Spændingsforskel; denne sidste findes derfor, ved at man iagttager en Virkning af den afgivne Elektricitetsmængde.

I Kvadrantelektrometret benytter man den elektrostatiske Virkning fra Kvadrantparrenes Ladninger paa Viseren, som man giver en konstant Spænding V_0; Udslagets Proportionalitet med Spændingsforskellen er betinget af, at V_0 er stor i Sammenligning med

Spændingerne i de to Punkter. Følsomheden voxer med V_0. Man har indrettet tekniske Maaleapparater, statiske Voltmetre, analoge med Kvadrantelektrometret, til Maaling af Spændingsforskelle paa flere hundrede Volt, hvor Virkningen er saa stor, at Udslaget kan aflæses ved en Visers Bevægelse over en Gradbue.

Bruges Kondensatoren til Spændingsmaaling, kan man finde den med Spændingsforskellen proportionale Elektricitetsmængde ved at sende den gennem et ballistisk Galvanometer saaledes, at man enten lader eller udlader Kondensatoren gennem Galvanometerledningen; i sidste Tilfælde kan der ske Elektricitetstab ved mangelfuld Isolation i den Tid der forløber mellem Ladning og Udladning.

Det maa i hvert Tilfælde undersøges, om Afgivelsen af den Elektricitetsmængde, som tjener ved Maalingen, har haft nogen kendelig Indflydelse paa Størrelsen af Spændingsforskellen i den undersøgte Leder. Kondensatormaalingen er betydelig følsommere end Elektrometermaalinger, men Elektricitetsforbruget er ogsaa meget større.

Man kan maale Spændingsforskelle paa Grundlag af *Ohms Lov*: i en Leder med Modstand r Ohm, som fører en Strøm af Styrke i Amperer, opstaar der en Spændingsforskel $e = ir$; herved kan Spændingsmaalingen grundes paa Iagttagelse af Ligevægtsstillingen i et Galvanometer, hvad der giver en betydelig større Nøjagtighed end Iagttagelsen af det ved Udladning af en Kondensator frembragte første Udsving i det ballistiske Galvanometer.

Voltmeter. Gaar der en Strøm af Styrke i gennem et Amperemeter med Modstand r, vil der være en Spændingsforskel $e = ir$ mellem Amperemetrets Klemmer. Apparatet kan inddeles til umiddelbart at vise denne Spændingsforskel og kaldes da Voltmeter. Forbindes Voltmetrets Klemmer med de to Punkter af en Leder, hvis Spændingsforskel søges, gaar der en vedvarende Strøm bort fra disse Punkter; herved bliver Spændingsforskellen en anden end den var før Forbindelsen, og Maalingen har derfor sædvanlig kun da Interesse, naar denne Ændring er enten forsvindende lille eller dog saa lille, at man kan korrigere for den; dette kan være Tilfældet, naar Voltmetrets Modstand er mange Gange større end Modstanden mellem Punkterne, hvis Spændingsforskel søges. Jo følsommere Voltmetret er som Amperemeter betragtet, des større Modstand kan man give det, og des korrektere er det som Spændingsmaaler. Voltmetret har ofte som Tilbehør en Modstandskasse (Fig. 106), der ved Omstilling af en Prop kan give Mod-

stande af Værdi $9r$ eller $99r$ eller $999r$ o. s. v. som Tillæg til dets egen Modstand r. Tillægsmodstanden R forbindes i Række med Voltmetret, hvis Udslags Betydning derved forøges til det 10 eller 100 eller 1000 dobbelte, idet $e = i(r + R)$. Medens et ushuntet Amperemeters Visning er uafhængig af Temperaturen, gælder dette ikke Voltmetret; dets Udslag er alene afhængigt af i, medens Spændingen $e = ir$ tillige afhænger af Modstanden r, der varierer kendelig med Temperaturen, fordi r af Hensyn til Følsomheden maa dannes af Kobber. Ved at bruge Tillægsmodstandene opnaar man at kunne maale højst forskellige Spændingsforskelle med det samme Voltmeter.

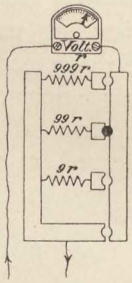


Fig. 106

Strømspændingsmetoden (Kompensationsapparat). Sender man en Strøm af uforanderlig Styrke i gennem en Leder AB (Fig. 107), vil Spændingen i Lederen falde fra A hen mod B, saaledes at Spændingsforskellen e mellem A og et Punkt C af Lederen er proportional med Lederens Modstand r mellem A og C, $e = ir$. Man kan paa den Maade fremstille Spændingsforskelle af ønsket Størrelse til Brug ved Spændingsmaalinger. Ved Strømspændingsmetoden kan man maale med betydelig større Nøjagtighed end ved Elektrometer eller Kondensator, og Maalingen kan foretages uden at den undersøgte Leder afgiver nogen kendelig Strøm. Apparatet er noget mere sammensat end ved de andre Metoder; det benævnes Kompensationsapparat.

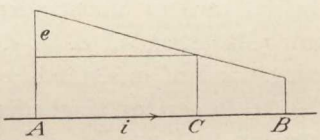


Fig. 107

AB (Fig. 108) er en Leder, hvis Ledningsmodstand er kendt for hver enkelt Dels Vedkommende. L er den Leder, hvis Spændingsforskel i Punkterne p og n søges. Den konstante Strøm i sendes gennem AB i en saadan Retning, at A og p faa samme Spændingsfortegn; disse to Punkter forbindes ved en Ledningstraad. I Ledningen fra n indskydes en Strømslutter t og et følsomt Galvanometer G; Ledningen fortsættes til en Kontakt k, der kan bringes i Forbindelse med Lederen AB i et saadant Punkt C, at man mellem A og C faar en Strømspænding ir, der er lig den søgte Spændingsforskel e i L; om det er Tilfældet kan sees, ved at man slutter Forbindelsen ved t; hvis $e = ir$, gaar der herved ingen Strøm over i Sideledningen, og Galvanometret gør intet Udslag. Man arbejder

saaledes, at man lægger Kontakten k mod AB i et vilkaarligt Punkt og slutter t kun i saa lang Tid som behøves for at se til hvilken Side Udslaget i G gaar; derpaa flytter man Kontakten, idet man ved kortvarige Strømslutninger efterhaanden prøver sig frem til den rigtige Stilling.

Hvis man kender Strømstyrken i i Amperer og Modstanden r i AC i Ohm, finder man umiddelbart e i Volt; herefter er Kompensationsapparatet S. 156 til termoelektrisk Maaling indrettet; i dette Apparat er dog Modstanden r forudsat konstant, mens man varierer Strømstyrken i, indtil $e = ir$. Ved Normalmaalinger gør man sig uafhængig af Kendskabet til i, idet man kun benytter Strømspændingen som Mellemled ved Sammenligningen mellem den søgte Spændingsforskel e og den bekendte Spændingsforskel e_1 ved Polerne af et Normalelement (dobbelt Kompensation). Det sker derved, at man først indskyder Normalelementet paa L's Plads og finder den til dets E. K. e_1 svarende Modstand r_1; derpaa indskyder man den undersøgte Leder og finder den dertil hørende Modstand r; man vil da have den søgte Spændingsforskel

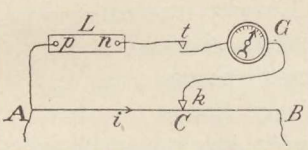


Fig. 108

$$e = \frac{r}{r_1} e_1,$$

forudsat, at Strømmen i har holdt sig konstant; det prøves ved paa ny at indskyde Normalelementet. Man behøver kun at kende Forholdet mellem Modstandene, ikke deres absolute Værdier. Er AB en »Maaletraad«, d. v. s. en over en Maalestok udspændt Ledningstraad af modstandskonstant Materiale, faar man efter fornødne Korrektioner for Uligheder i Traaden, Forholdet r/r_1 lig Forholdet mellem to Længder AC og AC_1. Ved Brugen af Maaletraad opnaar man ikke større Nøjagtighed end den, Længdemaalingen kan give; vil man ikke nøjes dermed, danner man Forbindelsen mellem A og B af afdelte, enkeltvis udmaalte Traade som i en Modstandskasse. Maalingens Paalidelighed er betinget af, at Strømmen holder sig konstant; det opnaaes bedst naar den er svag, en lille Brøkdel af 1 Amp., og naar den frembringes af Akkumulatorer. Maaler man større elektromotoriske Kræfter, f. Ex. omkring 1 Volt, maa af den Grund Modstanden r være stor, saa at man ogsaa derved er henvist til at anbringe Modstandene som i en Modstandskasse.

Metodens Følsomhed findes ved at beregne Strømstyrken i_1 i Sideledningen for det Tilfælde at der ikke er Ligevægt. An-

tages Hovedstrømmen I konstant, faaes ved Kirchhoffs Lov, at $i_1 = (e - Ir)/(r + \rho)$, hvor ρ er Sideledningens samlede Modstand. Hvis $e = Ir$, bliver $i_1 = o$, men er der en lille Afvigelse, saa at $e - Ir = \Delta e$ faaes $i_1 = \Delta e/(r + \rho)$. En given Forandring Δe i den søgte elektromotoriske Kraft giver derfor en Strøm i_1 gennem Galvanometret, som er omvendt proportional med Summen $r + \rho$. Til Maaling af smaa E. K. som den i et Termoelement, maa man derfor arbejde med forholdsvis smaa Modstande i Kompensationsapparatet og i Galvanometret, forudsat at Elementets Modstand er lille.

Exempel: $r = 1500$ Ohm, $\rho = 500$; Galvanometret giver et synligt Udslag for $i_1 = 10^{-8}$ Amp. Den mindste Spændingsforskel, som kan iagttages, vil være $\Delta e = 2000 \cdot 10^{-8} = 2 \cdot 10^{-5}$ Volt.

Spændingen i en Leder med Vexelstrøm. Forbindes et af Kvadrantparrene i et Elektrometer med et Punkt af en Leder med Vexelstrøm, mens det andet Kvadrantpar og Viseren samlede forbindes med et andet Punkt af samme Leder, vil Elektrometerudslaget være proportionalt med $\frac{1}{t}\int_0^t e^2\,dt$, som er Kvadratet paa den effektive Spændingsforskel mellem Punkterne. Samme Størrelse faaes bestemt ved de S. 212 omtalte statiske Voltmetre.

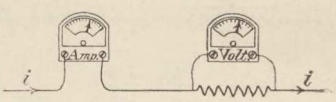


Fig. 109

MAALING AF LEDNINGSMODSTAND. En Leders Modstand r er defineret ved Ohms Lov $ri = e$, altsaa som Kvotienten mellem Strømspændingen e og Strømstyrken i. I Overensstemmelse hermed maa man ved enhver Maaling eller Sammenligning af Modstande sende Strøm igennem Lederne og maale eller sammenligne Værdierne for i og e.

Man kan maale en Leders Modstand r saaledes at man, som Fig. 109 viser, sender en Strøm, der passerer et Amperemeter, igennem den, idet man forbinder Lederens Endepunkter med en Spændingsmaaler; finder man herved i Amp. og e Volt, vil $r = e/i$ Ohm. Dette kan bruges, hvor man, uden at tilstræbe stor Nøjagtighed, vil finde Modstandens Afhængighed af den Opvarmning, Strømme af forskellig Styrke give Lederen, ligeledes naar man vil finde Modstanden i en i et arbejdende Ledningssystem indskudt Leder. Bruger man Voltmeter som Spændingsmaaler, faar man

$r = e/(i-j)$, hvor j er Strømstyrken i Voltmetret. Er dettes Modstand R, bliver $i - j = iR/(R + r)$.

Modstanden i en Leder, f. Ex. et Galvanometer eller en Strømkilde, som findes indskudt i en udelt, sluttet Kreds, kan man bestemme ved at maale Strømstyrken $i = E/(R + r)$, hvor E er den E. K., r den søgte og $R + r$ hele Kredsens Modstand. Indskyder man en ny bekendt Modstand R_1 i Kredsen, faar man $i_1 = E/(R_1 + R + r)$. Kender man her R men ikke E, findes r af de to Ligninger ved Elimination af E, idet $R + r = R_1 i_1/(i - i_1)$; man behøver kun en relativ Bestemmelse af i og i_1. Det forudsættes, at den E. K. er ens i begge Tilfælde. Maalingen bliver ikke god, hvis R er mange Gange større end den søgte Modstand r; R_1 vælges helst nogenlunde af samme Størrelse som $R + r$, fordi man da faar i og $i - i_1$ omtrent lige godt bestemte. Kan det forenes med Maalingen at udskyde Lederen af Kredsen, kan Modstanden r findes, ved at man istedenfor den indskyder en bekendt Modstand, der varieres indtil Strømstyrken bliver den samme som før.

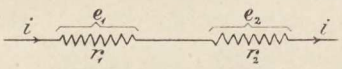


Fig. 110

En *meget stor Modstand*, overfor hvilken Batteriets og Galvanometrets Modstand er forsvindende, finder man ved at indskyde den i en Kreds med en kendt elektromotorisk Kraft E og et Galvanometer af kendt Følsomhed; man faar $R = E/i$. Har man ikke tilstrækkelig store Modstande af kendt Størrelse til en direkte Bestemmelse af Følsomheden, kan man bestemme denne for Galvanometret i shuntet Tilstand og derefter regne sig til det ushuntede Galvanometers Følsomhed.

Sammenligning mellem to forskellige Modstande kan ske, ved at man sender samme Strøm igennem begge Ledere og bestemmer Spændingsforskellene mellem Endepunkterne af hver af Lederne (Fig. 110); man har da $i = e_1/r_1 = e_2/r_2$, $r_1/r_2 = e_1/e_2$. Den relative Spændingsmaaling kan med godt Resultat udføres med Kompensationsapparatet, men sædvanlig foretager man den saaledes, at man til de to i Række indskudte Modstande r_1 og r_2 danner en Sideledning af to andre Modstande R_1 og R_2 (Fig. 111), hvis Forhold er kendt. De to parallelt stillede Ledninger have fælles Spændinger i Punkterne A og B og altsaa samme Spændingsfald. Afpasser man nu R_1 og R_2 saaledes, at der er samme Spænding i deres Sammenstødspunkt S som i det tilsvarende Punkt

s for r_1 og r_2, da vil der være samme Spændingsfald i R_1 som i r_1, og i R_2 som i r_2; derfor vil $e_1 = r_1 i_1 = R_1 I_1$, $e_2 = r_2 i_1 = R_2 I_1$, idet i_1 og I_1 er Strømstyrkerne i de to parallele Ledninger. Man har følgelig, at $r_1/r_2 = R_1/R_2$. Om Spændingerne i Punkterne S og s er ens eller ej kan afgøres meget simpelt ved at indskyde et Galvanometer G imellem de to Punkter. Man arbejder saaledes, at man begynder med to vilkaarlige Værdier for R_1 og R_2 og slutter Hovedstrømmen kun i saa lang en Tid som behøves, for at se til hvad Side Udslaget gaar, og man prøver sig saaledes efterhaanden frem, indtil Strømslutningen intet Udslag giver i G. Ledningssystemet kaldes en *Wheatstones Bro*; Forbindelseslederen mellem S og s kaldes Broledningen.

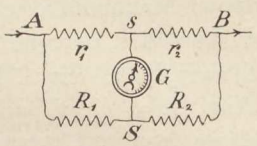


Fig. 111

Følsomheden ved Maaling med en given Wheatstones Bro kan findes saaledes: Strømstyrkerne i de 5 Ledere r_1 r_2 R_1 R_2 og Broledningen kaldes henholdsvis i_1 i_2 I_1 I_2 og η, sidstnævnte regnet positiv fra s til S. Ved Kirchhoffs Love findes, naar Broledningen har en Modstand ρ,

$$I_2 = I_1 + \eta,\ i_2 = i_1 - \eta,\ i_1 r_1 + \eta\rho - I_1 R_1 = 0,\ i_2 r_2 - I_2 R_2 - \eta\rho = 0$$

$$\frac{r_2}{R_2} - \frac{r_1}{R_1} = \frac{\eta}{i_1}\left(\rho\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) + \frac{r_2}{R_2} + 1\right) = \eta K.$$

Man tilstræber at faa $\eta = 0$. Udtrykket giver den Afvigelse i de to Forholds Ligestorhed, der svarer til den Strømstyrke η, som kan gaa i Broledningen, uden at Galvanometret gør noget synligt Udslag. ηK er omvendt proportional med Styrken i_1 af den Strøm, man sender gennem den søgte Modstand; heraf følger, at Følsomheden er proportional med denne Strømstyrke.

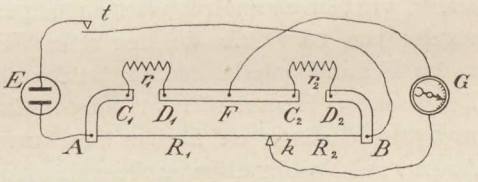


Fig. 112

Man kan indrette Broen saaledes, at R_1 R_2 danner en Maaletraad, AB i Fig. 112, henad hvilken en med Broledningen forbunden Glidekontakt k kan forskydes. AC_1, D_1C_2 og D_2B er saa tykke Kobberledere, at man kan se bort fra deres Modstande; fra Klemmer paa disse føre Forbindelsestraade til Modstandene r_1 og r_2. Maaletraaden er uforanderlig fastspændt ved A og B. r_1 er den søgte Modstand, r_2 en bekendt Modstand, helst saa nær som mulig lig

r_1; man forskyder Kontakten k henad Maaletraaden, til Udslaget ved Strømslutning i t bliver Nul. Har de to Stykker Maaletraad Ak og kB Længderne l_1 og l_2 bliver $r_1 = r_2 l_1/l_2$, hvis Brostrømmen er Nul, og hvis der i lige Længder af Traaden er lige store Modstande. Har Brostrømmen en Værdi η, bliver $r_1 = r_2 l_1/l_2 - \eta K R_1$. Kender man Galvanometrets Følsomhed og derved Maximum for η samt Maaletraadens Modstand og Strømstyrken i_1, kan man beregne den Fejl $\eta K R_1$ man kan begaa ved at regne $r_1 = r_2 l_1/l_2$. Er f. Ex. Maaletraadens Modstand 1 Ohm, $r_2 = 3$ Ohm, $l_1 = l_2$, $i_1 = \frac{1}{5}$ Amp., $\rho = 500$ Ohm og $\eta = 10^{-8}$ Amp., bliver paa det nærmeste $\eta K R_1 = \frac{1}{2}\,10^{-4}$ Ohm, hvorved Broens Følsomhed i det givne Tilfælde er bestemt; man kan ikke aflæse Kontaktens Plads paa Maaletraaden med en til denne Følsomhed svarende Nøjagtighed. Man kan ombytte Element og Galvanometer i Broen Fig. 112 og maa foretrække det, naar Modstandene r_1 og r_2 er mange Gange større end Modstanden i Maaletraaden, da man i det Tilfælde forøger Følsomheden ved Ombytningen.

Til nøjagtigere Modstandsmaaling dannes Modstandene r_2, R_1 og R_2 af afdelte, enkeltvis udmaalte Modstande. Paa Grund af Spejlgalvanometrets store Følsomhed hører Modstandsmaaling med Wheatstones Bro til de allernøjagtigste fysiske Maalemetoder. Lad Broen være dannet af 3 ligestore Modstande $r_2 = R_1 = R_2 = 500$ Ohm og af en fjerde, som man vil afpasse til ogsaa at være 500 Ohm; lad Galvanometret have 500 Ohms Modstand og være følsomt for 10^{-10} Amp. Er Strømmen i hver af Broens Grene $^1/_{500}$ Amp. stærk, vil Galvanometret efter Ligningen S. 217 kunne vise en Afvigelse paa 10^{-4} Ohm fra den rette Værdi for r_1; denne Afvigelse er en Femmilliontedel af den maalte Størrelse; det er dog vanskeligt i andre Henseender at tilfredsstille Betingelserne for en saa nøjagtig Maaling; en Leders Modstand forandres med *Temperaturen*; ved Forbindelsen mellem de enkelte Ledere kan der komme uvedkommende og ubekendte Modstande ind dels i *Forbindelsestraadene*, dels som *Overgangsmodstand* ved mangelfuld Kontakt; det sidste gælder især, hvor Forbindelsen hyppig skiftes, som Tilfældet er i Modstandskasser ved Proppe og Glidekontakter; saadanne Deles Overflade kan ved Berøring med Haanden, ved Støv og Iltning let faa et ufuldkomment ledende Overtræk, der, især naar Fladerne ikke trykkes haardt sammen, kunne give betydelige Overgangsmodstande. Paa Grund af Temperaturforskelle i Broens Ledninger kan der opstaa ubekendte termoelektriske Kræfter, som

ville give en falsk Ligevægt; om de er tilstede kan prøves ved at afbryde Hovedstrømmen og se, om der endnu kan komme et Udslag i Galvanometret; deres Indflydelse kan elimineres ved efter Indstilling hurtig at skifte Strømretningerne i Broen og tage Middeltallet af de to Værdier, som de modsatte Strømretninger give.

Foruden de Temperaturforskelle, der kan være tilstede af ydre Grunde, vil der opstaa saadanne ved Varmen fra selve den Strøm, hvormed man maaler. Strømvarmens Indflydelse paa Ligevægten i Broen er dels betinget af, at de forskellige Ledere opvarmes ulige meget, og dels af at deres Modstande forandres i ulige Grad med Temperaturen. Da Strømvarmen udvikles efterhaanden, giver dens Indflydelse sig tilkende, ved at Galvanometret efterhaanden forandrer sin Ligevægtsstilling, naar man holder Strømmen sluttet. Man imødegaar Indflydelsen ved kun at holde Strømmen sluttet saa længe som behøves til en sikker Iagttagelse af Udslaget. Overfor Strømvarmen er det meget nyttigt at bruge et følsomt Galvanometer, da det tillader Anvendelse af en svag Maalestrøm.

Broens faste Ledninger danner man af Manganin forat gøre deres Modstand uafhængig af Temperaturen; man gør dem induktionsfri ved bifilar Vikling, forsaavidt de dannes af Traadruller. Manganin udmærker sig ved at have ringe termoelektrisk Virkning. Er der kendelig *Selvinduktion* i den undersøgte Leder, vil der opstaa en Extrastrøm i Broen, naar man slutter Hovedstrømmen, saa at Ligevægten først kan iagttages naar Galvanometret er kommen i Ro efter Stødet fra Extrastrømmen; denne Virkning kan man, med Strømslutter baade i Hovedkredsen og i Broledningen, undgaa ved at slutte dem den ene efter den anden; dette kan ske ved et enkelt Tryk paa en særlig indrettet Dobbeltnøgle.

Meget smaa Modstande. Maaler man med den i Fig. 112 viste Wheatstones Bro, finder man i Virkeligheden Forholdet mellem den samlede Modstand i Lederne mellem A og F og den i Lederne mellem F og B, mens man søger Forholdet mellem r_1 og r_2. Naar disse er saa smaa, at man ikke kan se bort fra Modstandene i Forbindelseslederne til Punkterne A, F og B og heller ikke med fornøden Nøjagtighed kan beregne Forbindelsesledernes Modstand af deres Dimensioner, maa man indrette Broen anderledes. (Will. Thomsons (Lord Kelvins) Bro er indrettet som vist i Fig. 113. Den bestaar af de fire Modstande $R_1 R_2 R'_1 R'_2$. De to smaa Modstande r_1 og r_2, hvis Forhold søges, forbindes i Række, og Maalestrømmen sendes igennem dem; fra de Punkter

hvor hver Modstand begynder og ender, føres der Ledningstraade, som vist i Fig., til Broens 4 Klemmer *a* og *b*, *c* og *d*. Forskellen mellem Thomsons Bro og Wheatstones er altsaa væsentlig den, at man forgrener Broledningen fra Galvanometret til de to indre Endepunkter af Modstandene r_1 og r_2 istedenfor at føre den udelt til et Punkt i deres Forbindelse; derved opnaar man kun at faa med Spændingsfaldene i selve Modstandene at gøre. Modstandene R gør man forholdsvis store *samt to og to ligestore*, $R_1 = R'_1$, $R_2 = R'_2$. Man varierer Forholdet R_1 / R_2 og dermed R'_1 / R'_2, indtil Brostrømmen er Nul. Da har man, idet Modstandene i Forbindelsestraadene *Aa*, *Bb*, *Cc* og *Dd* maa være forsvindende mod de tilhørende R, at Spændingsfaldet ir_1 er lig $R_1 I_1 - R'_1 I'_1$ og ir_2 lig $R_2 I_1 - R'_2 I'_1$; følgelig $r_1 / r_2 = R_1 / R_2$. Forbindelsen gennen *BC* maa være der forat tillade en Maalestrøm af fornøden Styrke at gaa igennem r_1 og r_2; uden stærk Strøm faar man ikke tilstrækkeligt Spændingsfald i r_1 og r_2 til Opnaaelse af Følsomheden. For at undgaa Virkning af Opvarmningen maa man, om muligt, anbringe Lederne i et Petroleumsbad, der røres. Herved opnaar man ogsaa at kunne faa Lederens Temperatur godt bestemt, uden hvilket en nøjagtig Modstandsmaaling i Reglen ingen Betydning har.

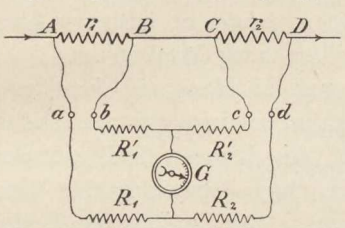


Fig. 113

Differentialgalvanometret er et Galvanometer, som har to Sæt Vindinger med ens Modstande R, indbyrdes isolerede, saa at de kunne føre hver sin Strøm. Paa Grund af Vanskeligheder ved Tilledningen af to Strømme til de bevægelige Vindinger egner Rammegalvanometret sig ikke til Differentialgalvanometer, som derfor forudsættes indrettet som Kompasgalvanometer; de to Sæt Vindinger anbringes saaledes, at de med samme Strøm have ligestore Virkninger paa Magneten; sendes lige stærke Strømme i modsatte Retninger, vil den samlede Virkning derfor være Nul. Differentialgalvanometret bruges til Modstandsmaaling saaledes, at den ubekendte Modstand forbindes enten i Række med eller parallelt med det ene Sæt Vindinger, og en Modstandskasse eller en anden variabel Modstand forbindes paa samme Maade som den søgte Modstand med det andet Sæt. Ved Rækkeforbindelsen (Fig. 114) forgrenes Strømmen fra Elementet *B* til de to Sæt Vindinger saaledes, at disse gennemløbes i modsatte Retninger. Den søgte Modstand r og den be-

kendte m indskydes hver i sin Strømgren; man varierer Størrelsen af m, indtil man ved at slutte Strømmen med Nøglen N intet Udslag faar. Er der ingen Uligheder mellem Vindingerne, vil man i det Tilfælde have $r + R = m + R$, og altsaa $r = m$. Er r og m smaa mod R, vil en forholdsvis stor Forandring i m kun faa en ringe Indflydelse paa Strømstyrkerne; derfor egner Rækkeforbindelsen sig ikke til smaa Modstande.

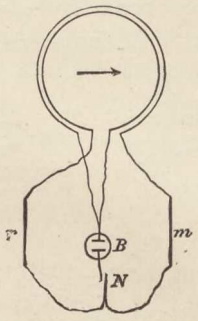


Fig. 114

Smaa Modstande maales paa den i Fig. 115 viste Maade; r og m indskydes i Række i Elementets Kreds, og fra deres Endepunkter føres der Ledninger a, b, c og d til Galvanometret saaledes, at dettes to Vindingssæt gennemløbes i modsatte Retninger af afledede Strømme; disse ere lige stærke, naar Udslaget er Nul, og i saa Fald er ogsaa $r = m$. Her som ved Thomsons Bro er Metodens Følsomhed grundet paa, at man sender en forholdsvis stærk Strøm igennem de smaa Modstande, saa at man faar frembragt Spændingsforskelle af fornøden Styrke til i Galvanometret at vise smaa Forskelle i disse Modstande.

Mulige smaa Uligheder i Galvanometervindingerne give sig tilkende, naar man efter at have afpasset r og m til Ligevægt, ombytter dem; for atter at faa Ligevægt maa man afpasse en ny Værdi for m; er der kun ringe Forskel paa de to Værdier for m, kan man tage deres Middeltal som den rigtige Værdi for r.

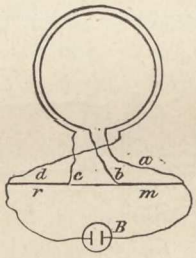


Fig. 115

En Elektrolyts Ledningsmodstand kan sædvanlig ikke bestemmes ved de ovenfor nævnte Metoder, fordi der i en elektrolytisk Leder enten er en E. K. tilstede iforvejen som i et galvanisk Element, eller der opstaar en saadan i Form af den Polarisation, som Maalestrømmen fremkalder; for at finde Lederens Modstand maatte man tillige bestemme dens E. K.; men det lader sig i Reglen ikke gøre for Polarisationens Vedkommende. Elektrolyten er sædvanlig en Opløsning; forat finde dennes Ledningsevne fylder man den i et Glas, som det i Fig. 116 viste, dannet af et U-Rør med en Udvidelse ved hver Ende, hvor Elektroden, en nedadbuet Platinplade,

nedsættes; Opgaven er at finde Modstanden mellem de med Elektroderne forbundne Klemmeskruer. Efter Kohlrausch finder man denne Modstand uafhængig af Polarisationen ved at indskyde den i en Wheatstones Bro (Fig. 117), og som Maalestrøm anvende en Vexelstrøm, der frembringes ved en lille Induktionsrulle J. Er der ingen kendelig Polarisation, Selvinduktion eller elektrostatisk Kapacitet i Ledningerne, vil Brostrømmen være Nul ved det sædvanlige Modstandsforhold (S. 217). Er Vexelstrømmens Periode kort (f. Ex. $^1/_{200}$ sek), og er Overfladen af Elektroden stor og ved galvanisk Udfælding af en Platinopløsning bedækket med et Lag Platinsort, vil der kun frembringes en meget ringe Polarisation, og den som frembringes vil strax efter blive hævet ved Strømskiftningen. Man kan af tidligere nævnte Grunde ikke bruge Galvanometret i Broen; heller ikke Dynamometret egner sig paa Grund af sin Ufølsomhed for svage Strømme; derimod har Telefonen vist sig vel skikket til, indskudt i Broen, ved sin Tavshed at vise, naar Brostrømmen er Nul; den er vist ved T i Fig. 117. Til Sammenligningsmodstande bruger man her ligesom ellers, lange isolerede Metaltraade, der opvikles til Ruller; Selvinduktionen undgaaes ved bifilar Vikling, idet Traaden lægges dobbelt, før den vikles op. Den elektrostatiske Kapacitet i en Leder er betinget af en Kondensatorvirkning, som indtræder ved den Forandring i Lederens Spændinger, der følger med Strømmens Indsendelse; den har ligesom Selvinduktionen til Følge, at Telefonen ikke tier, men kun giver et mere eller mindre udpræget Lydminimum ved Indstilling af Broen. Indflydelsen af en Kapacitet i Grenen r_1 kan hæves, ved at man forbinder Endepunkterne af R_1 med Belægningerne af en Kondensator, hvis Kapacitet man varierer, indtil Lydminimumet bliver det bedst mulige. Martin Knudsen har hertil indrettet en Kondensator dannet saaledes af Glimmerblade og Stanniol, at man kan variere dens Kapacitet kontinuerlig indenfor vide Grænser ved at sammentrykke den mere

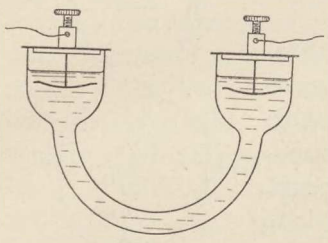


Fig. 116

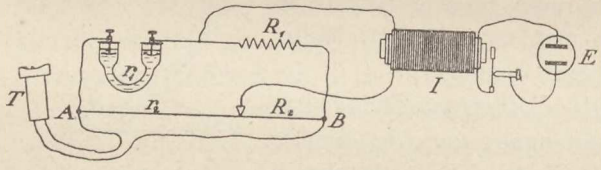


Fig. 117

eller mindre ved Trykket fra en Skrue. Ved Maaling af meget store Modstande kan det være vanskeligt at faa et tilstrækkelig udpræget Lydminimum. Man kender forskellige Opløsningers, saaledes en mættet Kogsaltopløsnings, Ledningsevne i Forhold til Kvægsølv. For at finde en anden Opløsnings Ledningsevne bestemmer man dens Ledningsmodstand r i et Maalekar som det i Fig. 116 viste, hvorefter man finder Modstanden r_1, som fremkommer, naar samme Kar fyldes med en mættet Kogsaltopløsning. Er dennes Ledningsevne i Forhold til Kvægsølv K_1, bliver den søgte Ledningsevne $K = K_1 r_1 / r$. For Kogsaltopløsningen er $10^7 K_1 = 202 + 4{,}5\,(t - 18)$; for en mættet Gibsopløsning er $10^7 K_1 = 1{,}77 + 0{,}045\,(t - 18)$, idet t er Temperaturen. Ved en saa slet ledende Vædske som Gibsopløsningen maa man tage Hensyn til, at ogsaa det destillerede Vand leder; det maa derfor undersøges iforvejen, og dets Ledningsevne lægges til ovenstaaende Værdi for Opløsningen. Produktet KR af en Vædskes Ledningsevne og dens Modstand i et givet Kar kaldes Karrets *Modstandskapacitet.*

Elektrolyters Ledningsevne voxer meget stærkt med Temperaturen, hvorfor man maa anvende megen Omhu paa Temperaturbestemmelsen.

ABSOLUTE MAALINGER. 1 *Ohm* er 10^9 absolute elektromagnetiske Enheder (se S. 109); den er funden at være lig Modstanden i en Kvægsølvtraad, der er 1,063 m lang, 1 mm² i Tværsnit og 0° C varm. Man fremstiller *Normalohmer*, i Regelen af Manganin; de kunne faaes forsynede med Certifikat, som angiver deres Værdi i Forhold til den rigtige Ohm, og som udstedes af den tyske fysisk-tekniske Rigsanstalt.

1 *Volt* er 10^8 absolute Enheder. Man har i Clarks Element et praktisk Udtryk for Volten; dette Elements E. K. er $1{,}4292 - 0{,}00123\,(t - 18) - 0{,}000007\,(t - 18)^2$ Volt, hvor t er Temperaturen. Elementet viser ved given Temperatur en meget konstant E. K., naar man sørger for, at det ved Brugen kun giver en minimal Strøm (højst $^1/_{20000}$ Amp.) og kun i kort Tid. Man justerer et Elektrometer eller Voltmeter ved at udsætte det for en Spændingsforskel, der samtidig ved Kompensationsapparatet sammenlignes med Clarkelementets E. K.; man faar herved at vide, hvormange Volt det i Maaleapparatet iagttagne Udslag betyder.

1 *Ampere* er $^1/_{10}$ absolut Enhed. Man justerer et Amperemeter ved at sende samme Strøm gennem det og gennem en

Modstand, hvis Størrelse er kendt, udtrykt i Ohm (Fig. 109). Sammenlignes Strømspændingen e ved Endepunkterne af Modstanden ved Hjælp af Kompensationsapparatet med Clarkelementets E. K., faar man e udtrykt i Volt; Kvotienten $e/r = i$ vil give Strømmens Styrke udtrykt i Amperer; giver Amperemetret Udslaget u, ved man, at det svarer til i Amperer.

Det ballistiske Galvanometer kan justeres til at maale Elektricitetsmængder udtrykte i 1 *Coulomb* som Enhed, ved at man lader en Kondensator af bekendt Kapacitet C med et Clarkelement, idet man gør det saaledes, at Ladestrømmen føres gennem Galvanometret; er det første Udsving, korrigeret for Dæmpningen, lig med α_1, ved man, at der til α_1 svarer en Elektricitetsmængde $E_1 C$ Coulomb, naar Elementets elektromotoriske Kraft er E_1. Bruges Galvanometret og Kondensatoren herefter til Maaling af en Spændingsforskel e, saaledes som det er omtalt S. 212, og faaes der et Udsving α, vil man have $e/E_1 = \alpha/\alpha_1$.

INDHOLD

I. **Længdemaaling.**

Aflæsning paa en Maalestok, Iagttagelsesfejl 7. Brøkdele af Millimetren 14. Sigtemaal 19. Følemaal 30. Maalestokken 31. Længdemaaling ved Lysinterferens 36.

II. **Vinkelmaaling.**

Spektrometret 40. Spejlaflæsning 44.

III. **Vægtskaalen og dens Brug.**

Vægtskaalens Teori 48. Milligramsvægtskaalen 51. Vægtskaalens Undersøgelse og Brug 54. Vægtlodder 60. Tekniske Vægte 66.

IV. **Tidsmaaling.**

Tidsenheden 67. Penduluret 67. Kronografen 69. Nøjagtigheden ved Maaling af et Tidsrum 71. Smaatidsmaaling 73.

V. **Metoder til Undersøgelse af Legemers Bevægelse.**

Maaling af Hastigheder 76. Tilvejebringelse af konstant Omløbshastighed 79. Registrering af Bevægelser 82. Den svingende Bevægelse 84. Maaling af Svingningstid og Dæmpning 90. Pendulsvingninger 94. Lydsvingninger 100.

VI. **Maaling af Kræfter og Momenter.**

Snovægten 110.

VII. **Maaling af Varmegrader.**

Kvægsølvtermometret 117. Kvægsølvtermometrets Undersøgelse 126. Kvægsølvtermometrets Brug 134. Lufttermometret 140. Særlige Former for Kvægsølvtermometret 146. Termometre med andre Vædsker 148. Temperaturmaaling ved forskellige Varmevirkninger 149. Pyrometer 154. Konstante Temperaturer 157. Maaling af Varmemængder 165.

VIII. **Maaling af Lufttryk og Damptryk.**

Barometret 172. Kvægsølvmanometret 176. Maaling af meget store og meget smaa Tryk 179. Metalmanometer, Aneroidbarometer 181. Dampes Maximumstryk 182.

IX. **Maaling af Rumfang.**

Faste Legemers Rumfang 187. Vædskers Vægtfylde 192. Afmaaling af Luftarter 196. Kalibrering af Maalerør 203.

X. **Maaling af elektrisk Strømstyrke, Spændingsforskel og Ledningsmodstand.**

Amperemetret 204. Speilgalvanometret 205. Maaling af Vexelstrøm 210. Maaling af Spændingsforskel 211. Maaling af Ledningsmodstand 215. Absolute Maalinger 223.

SAGFORTEGNELSE

Absolute Enheder 109, 223
Absolut Temperatur 145
Ampere 223
Amperemeter 204, 223
Aneroidbarometer 182
Aperiodisk Bevægelse 88, 205
Arbejde 109
Aræometer 195

Ballistisk Galvanometer 207, 224
Barometer 172
Beckmanns Termometer 146
Bifilarophængning 115
Bifilar Vikling 219, 222
Bolometer 154
Bourdons Rør 181
Brinttermometer 137, 141
Bureau international 35, 38, 65, 124

le Chatelier's Termoelement 155
Clarks Element 223
Coulomb 224

Damptryk 182
Damptæthed 200
Dekrement, logaritmisk 86, 89
Delemaskine 31
Deprez-d'Arsonvals Galvanometer 204
Dewars Kar 162, 164
Differentialgalvanometer 220
Dimension 109
Diopter 19
Dugpunkt 182
Dyn 107, 110
Dæmpning 86, 92, 205, 208

Eftervirkning, elastisk 112
— termisk 117, 122, 126
Effektiv Strømstyrke 211
Elektricitetsmængde 208, 224
Elektrisk Opvarmning 155, 163
Elektrisk Strøm 204
Elektrodynamometer 211
Elektrolyter 221
Elektrometer 211, 223
Element, Clarks 223

Fortættet Luft 162
Frysepunkt 157, 162
— Opløsningers 164
— Termometers 124, 133
Fysisk-teknisk Rigsanstalt 105, 156, 223

Galvanometer 204
— Modstand 216
Glassorter 125, 193

Haarrørstryk 173, 179
Haarrørsvirkning i Termometret 118, 135
Hastighedsmaaling 75, 76
Hulrum, Maaling af 190

Iagttagelsesfejl 8
Inertiemoment 111, 208
Interferens, Længdemaaling ved 36
Is 157, 164, 165
Justering 223, 224

Kalibrering 127, 203
Kalorie 165
Kalorimeter 165
Kapacitet 222, 224
Katetometer 24
Kikkert 19, 41
Kilogram 65
Kogepunkt 159
Kogepunkt, Termometers 124, 132
Koincidens 95
Kollimator 41
Komparator 26
Kompensationsapparat 156, 213, 223, 224
Kondensator 212, 224
Konstantan 151
Krafts Maaling 107
Kronograf 69, 73, 98, 105
Kuldeblandinger 162
Kvartstraad 112
Kvarts til Termometer 148, 154
Kvægsølvoverflade, Iagttagelse af 174, 176
Kvægsølvs Vægtfylde 188

Ledningsmodstand 215
Libelle 21
Luft, Afmaaling af 196
Luftanalyse, Apparat til 198
Luftarters Vægtfylde 198
Lufthævert 197
Lufttermometer 140
Lydens Bølgelængde 103
— Hastighed 103
Lydsvingninger 100
Lysets Bølgelængde 37
Lys, monokromatisk 38
Lægetermometer 147
Længdemaaling 7

Maaleglas 190
Maalekolbe 190
Maalepasser 17
Maalerør 197, 203
Maalestok 33
Maaletraad 214, 217
Manganin 209, 219
Manometer 176
Mc Leods Manometer 181
Meteren 35
Middelfejl 9
Middeltal 10
Mikrometer 27, 39, 43
Mikroampere 207
Mikron 33
Mikroskop 26
Mikrovolt 151
Modstand, elektrisk 215
— i en Strømkilde 216
— i et Galvanometer 216
Modstandskapacitet 223
Modstandstermometer 151
Mohrs Vægt 194
Moment 107, 111
Monokord 104

Normalelement 214
Normalohm 223
Normaltermometer 140
Nonius 15

Ohm 223
Okular, lysende 41
Opløsningers Damptryk 183
— Kogepunkt 185
— Frysepunkt 164
Overgangsmodstand 218

Parallaxefejl 8, 176
Pendul 68, 76, 94
Personlig Funktion 72
Polarisation 221
Projektils Hastighed 76
Pyknometer 189, 192
Pyrometer 154

Rammegalvanometer 204, 206
Reduceret Kvægsølvhøjde 177
— Rumfang 144, 196
Registrerende Termometer 149
Registrering af Bevægelser 83
Regulering af Hastigheder 79
— af Temperaturer 160
Relativ Fejl 13
Rumenhed 65
Rumfang, Maaling af 187
Ryttervejning 53, 195

Selvinduktion 219, 222
Sfærometer 31
Shunt 205, 209
Sinusstrøm 211
Smeltepunkt 157, 163
Snovægt 110, 205
Soldøgn 67
Spejlaflæsning 44
Spejlgalvanometer 205
Spektrometer 40
Statisk Voltmeter 212
Stemmegaffel 78, 82, 101, 105
Stempelmanometer 180
Stjernedøgn 67
Stroboskopisk Metode 101
Strømspænding 213, 224
Strømstyrke, elektrisk 204
Strømvarme 209, 210, 219
Stød ved to Toner 104
Svingende Bevægelse 84
Svingningstid, Maaling af 90, 95

Tachometer 78
Telefon 211, 222
Temperaturs Definition 120, 141, 154
Termoelement 150, 155
Termometret 117
Tidsenhed 67
Tidsmaaling 67
Thomsons Bro 219
Tonehjul 81, 102, 105
Traadkors 20, 41
Traadmaaler 30
Tælleværk 77

Udvidelse 34, 36, 120, 142, 193
Uret 67

Vandets Kogepunkt 134
Vandhøjde omsat til Kvægsølvhøjde 179
Vandets Vægtfylde 188
Vandværdi 165
Varmeenhed 165
Varmemængde, Maaling af 165
Varmestraaling 170
Westphals Vægt 194
Vexelstrøm 210, 215, 222
Wheatstones Bro 217, 222
Vibrationsgalvanometer 210
Vinkelmaaling 40
Volt 223
Voltmeter 212, 223
Volumenometer 192
Vægtenhed 65
Vægtfylde 187
Vægtlodder 60
Vægtskaal 48, 66
Vægttab i Luften 62, 188, 194, 199

RETTELSER

Side 8 Lin. 1 f. n. d_2, læs: d^2.
— 62 — 13 f. n. »for hver cm³ Legemet er stort« udelades.
— 68 — 16 f. o. »som ovenfor nævnt« udelades.
— 73 — 14 f. n. $2t - \vartheta$, læs: $2t + \vartheta$.
— 80 — 13 f. n. $\frac{1}{2}\,\mathrm{tg}\,\varphi\delta\varphi$, læs: $-\frac{1}{2}\,\mathrm{tg}\,\varphi\delta\varphi$.
— 118 — 12 f. n. Fig. 65, læs: Fig. 66.
— 128 — 5 f. o. α'_2, læs: α'_1.