EIGENDOM
Controlekamer:

„BLEEKER"

WEERSTANDS-

MEETBRUGGEN

Nederlandsche
Optiek- en
Instrumentenfabriek
Dr. C. E. Bleeker N.V.
Zeist

Inhoud

	pagina
Weerstandsmeetbruggen (meettechnische beschouwingen)	5
Technische meetbruggen serie 2100	
Technische Wheatstonebrug	14
Wheatstonebrug met inbouwgalvanometer	19
Draagbare Wheatstonebrug	23
Draagbare Wheatstonebrug met lichtvlekgalvanometer	23
Draagbare brug voor communicatielijnen	26
Thomsonbrug met inbouwgalvanometer	29
Voedingsapparaat voor Thomsonbrug	33
Thomsonbrug met lichtvlekgalvanometer voor netvoeding	34
Precisie meetbruggen serie 2000	
Algemene beschouwingen	38
Precisie Wheatstonebrug met vier decaden	40
Precisie Wheatstonebrug met vijf decaden	43
Precisie Wheatstonebrug voor driedraadsaansluiting	45
Precisie Thomsonbrug	47
Precisie Thomsonbrug met vijf decaden	52

Nederlandsche
Optiek- en
Instrumentenfabriek
Dr. C. E. Bleeker N.V. Zeist

WEERSTANDSMEETBRUGGEN

Meting van de grootte van weerstanden kan op velerlei wijze geschieden en de keuze van de te volgen methodiek zal o.a. bepaald worden door de nauwkeurigheid waarmee men de meting wenst uit te voeren.
Wanneer de grootst toelaatbare fout minder dan 1 % van de te meten waarde bedraagt, wordt het aantal bruikbare meetmethoden aanzienlijk beperkt. Als zeer belangrijke groep komen dan de verderop te beschrijven brugmethoden in aanmerking. Deze worden gekenmerkt door gemakkelijke uitvoerbaarheid van de metingen, terwijl een grote nauwkeurigheid bereikt kan worden. Daarnaast moeten in dit verband genoemd worden weerstandsmetingen met compensatoren, die in extreme gevallen een nog grotere nauwkeurigheid bereikbaar maken. De methodiek van deze laatstgenoemde metingen wordt in onze catalogus „Compensatoren" nader beschreven.

We laten hier een beschrijving volgen van de meest gebruikelijke brugmethoden voor weerstandsmetingen. Van deze groep is de werkwijze van Wheatstone wel de oudste en nog steeds de meest gebruikte.

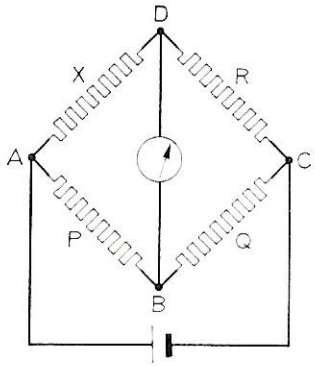

Fig. 1
Brugschakeling van Wheatstone.

Er zijn 3 weerstanden voor nodig van bekende waarde, tenminste één ervan behoort instelbaar te zijn. Deze 3 weerstanden worden met de te meten weerstand verbonden als in figuur 1 aangegeven, voorlopig zonder de verbinding BD. X is hier de onbekende weerstand, P, Q en R zijn de bekende weerstanden. We onderstellen verder, dat R regelbaar is. De weerstanden zijn tot een vierhoek verenigd. De punten A en C worden met een stroombron verbonden, met het gevolg dat zowel in de tak ABC als ADC een stroom loopt. Die stroom zal door ABC volgens de wet van Ohm de grootte

$$i_1 = \frac{E}{P + Q}$$

hebben, als E de spanning tussen A en C voorstelt.

Op dezelfde wijze vindt men voor de tak ADC:

$$i_2 = \frac{E}{X + R}$$

Aangezien door de weerstand P de stroom $i_1 = \frac{E}{P + Q}$ loopt, is de spanning tussen A en B $i_1 P = \frac{EP}{P + Q}$

Op dezelfde wijze vinden we voor de spanningsval door X, dus de spanning tussen A en D $i_2 X = \frac{EX}{X + R}$

Nu onderstellen we verder, dat het gelukt is, bijvoorbeeld door R op de juiste waarde te regelen, beide spanningsvallen precies gelijk te maken. Dan is dus

$$\frac{EX}{X + R} = \frac{EP}{P + Q} \quad \text{of ook} \quad \frac{X}{X + R} = \frac{P}{P + Q}$$

Dit laat zich eenvoudig herleiden tot

$$\frac{X}{R} = \frac{P}{Q} \quad \text{ofwel } X = \frac{P}{Q} R$$

Als men dus R zo geregeld heeft dat aan deze conditie is voldaan, is de spanningsval langs AD en AB gelijk. Hieruit volgt, dat er dan geen spanningsverschil bestaat tussen de punten D en B. Overbruggen wij deze punten nu met een geleider, dan verandert er niets aan de stroomverdeling, door de brug DB loopt geen stroom, daar er geen spanningsverschil aan zijn einden ligt. Het makkelijkst constateren wij dat door in de brug een gevoelige galvanometer op te nemen. Die geeft dan geen uitslag, maar blijft in de nulstand.
Hieruit is de volgende werkwijze af te leiden: Maak de groepering van weerstanden als boven beschreven en sluit een galvanometer tussen B en D aan. Deze zal in het algemeen uitslaan. Door regeling van R kan men bereiken, dat de galvanometeruitslag nul wordt. Volgens het boven verklaarde geldt dan dus $X = \frac{P}{Q} R$. Waar we er van uitgingen, dat P, Q en R bekend zijn, kan X dan direct worden uitgerekend.

De breuk $\frac{P}{Q}$ noemen we de brugverhouding. Kiezen we die 1 of een macht van 10, dan zien we dat X gelijk wordt aan R, behoudens de plaats van het decimaalteken, dat dan door de brugverhouding wordt bepaald.
Vroeger werd voor het realiseren van de brugweerstanden P en Q vaak gebruik gemaakt van een uitgespannen meetdraad met een daarover verplaatsbaar glijcontact. Dit glijcontact verdeelt de meetdraad in twee stukken, die met de weerstanden P en Q overeenkomen. Het is sinds lang gebleken, dat deze constructie zeer grote onnauwkeurigheden meebrengt. Daarom maken moderne instrumenten steeds van vaste brugweerstanden gebruik.
De combinatie van weerstanden die voor de besproken meetmethode nodig is, wordt in de praktijk in één enkel instrument verenigd. Enige uitvoeringen van dit soort apparaten zullen we verderop nader bespreken.
Eerst volgen hier nog enkele opmerkingen over de besproken Wheatstonebrugschakeling. Deze methode, die op het eerste gezicht universeel bruikbaar lijkt te zijn, gaat in praktische nauwkeurigheid te kort schieten wanneer de te meten weerstand een lage waarde heeft. Eén van de hoofdoorzaken van dit tekortschieten ligt in het feit, dat men de te meten weerstand door verbindingsdraden met de meetopstelling moet verbinden. De weerstand van deze verbindingsdraden, alsmede de overgangsweerstanden op de verbindingsplaatsen, meestal vier in getal, worden ook meegemeten. Het meetresultaat moet worden gecorrigeerd door het bedrag van deze verbindingsweerstanden in rekening te brengen.
Echter blijkt in de praktijk, dat hierin onzekerheid blijft, die de Wheatstonebrug voor metingen beneden 1 ohm bij matige nauwkeurigheidseisen en beneden 10 ohm bij hogere nauwkeurigheidseisen verwerpelijk maakt.
In die gevallen waarin de te meten weerstand niet onmiddellijk bereikbaar is, maar door potentiaalaansluitingen is gedefinieerd en via deze leidingen moet worden gemeten, loopt de methode geheel spaak.
De onzekerheid, die in de metingen geïntroduceerd wordt door de onvermijdelijke verbindingsdraden, kan ook bij aanmerkelijk hogere te meten weerstanden dan de reeds genoemde van 10, resp. 1 ohm grootte-orde hinderlijk worden als de omstandigheden nopen, tussen te meten weerstand en meetschakeling een

grote afstand te overbruggen. De dan noodzakelijke lange meetleidingen krijgen een niet verwaarloosbare weerstand, die bovendien nog kan variëren als ze niet op constante temperatuur kunnen worden gehouden.
Deze moeilijkheid doet zich in de praktijk meermalen voor, en is op elegante wijze te ondervangen door de weerstanden door middel van de zgn. driedraadsaansluiting met de brugschakeling te verbinden. Deze methode kan echter alleen worden toegepast als met een brugverhouding 1 : 1 wordt gewerkt.

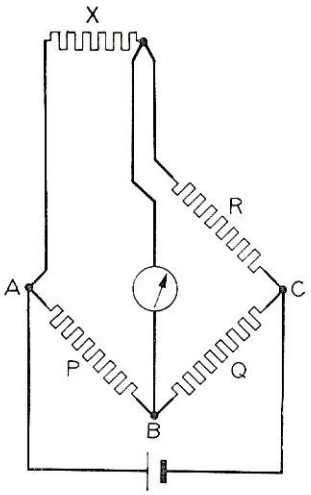

Fig. 2
Brugschakeling met driedraadsaansluiting.

De schakeling is als in figuur 2 aangegeven. Men ziet, dat de galvanometeraansluiting niet meer direct aan R is verbonden, maar aan het eind van de R met X verbindende leiding. Een derde even lange verbindingsdraad verbindt X met het punt A. Het resultaat is dat zowel R als X elk vergroot zijn met de weerstand van één leiding, welke beide leidingen gemakkelijk gelijk van weerstand gemaakt kunnen worden. Ook zullen ze bij temperatuurwisselingen gelijk blijven, als ze bijv. in één kabel verenigd zijn. Bij de 1 : 1 meting heffen de invloeden van beide draden elkaar op. De derde draad geeft hoogstens aanleiding tot een geringe vermindering van de gevoeligheid, doordat de weerstand van de galvanometerkring iets hoger wordt. Men kan deze methode alleen toepassen met meetbruggen, die van de daarvoor nodige klemmen zijn voorzien.
We hebben er reeds op gewezen, dat de Wheatstonebrug voor het meten van kleine weerstanden minder geschikt is. Hier past men bij voorkeur een andere brugschakeling toe, die de naam Thomsonbrug draagt. In principe kunnen met deze brugschakeling weerstanden van elke waarde nauwkeurig en zonder moeite worden gemeten; in de praktijk past men de methode bij voorkeur toe wanneer de te meten weerstandswaarde kleiner is dan circa 100 ohm.
De behandeling van een doelmatige Thomsonbrug is even eenvoudig als van een Wheatstonebrug. Het is een bijzonder waardevol laboratoriuminstrument, dat de mogelijkheden van een Wheatstonebrug op gelukkige wijze aanvult en uitbreidt.
Tot goed begrip van de methode merken we vooraf op, dat een weerstand van enkele ohms gemakkelijk gedefinieerd kan worden door een stuk weerstandsmateriaal tussen twee goede aansluitklemmen. Wanneer een dergelijke weerstand in een stroomkring wordt toegevoegd speelt de overgangsweerstand van de aansluitingen op het toegevoegde bedrag slechts een kleine rol. Bij aanmerkelijk kleinere weerstanden ligt de zaak anders. De overgangsweerstand van de aansluitklemmen is dan op het totaal niet meer te verwaarlozen. Deze moeilijkheid wordt op fraaie wijze opgelost, door aan ieder eind van de weer-

stand twee aansluitmogelijkheden aan te brengen. Door telkens één van deze aansluitingen wordt een stroom toe- en afgevoerd. Het daardoor ontstane potentiaalverschil tussen de andere klemmen bepaalt met de wet van Ohm de weerstand. De Thomsonbrug is speciaal ingericht voor het meten van weerstanden die op deze wijze zijn gedefinieerd. De schakeling is in figuur 3 schematisch aangegeven. Merk op, dat hier de te meten weerstand X aan de einden A en E telkens met twee leidingen is verbonden.
In principe wordt bij de Thomsonbrug, evenals bij de Wheatstonebrug, gebruik gemaakt van drie vergelijkweerstanden, echter zijn twee van de drie in tweevoud aanwezig. Behalve de te meten weerstand X zien we in het schema de weerstand R, die bekend moet zijn en over het algemeen een met X vergelijkbare grootte heeft. De beide takken P zijn onderling gelijk en regelbaar, de takken Q zijn eveneens onderling gelijk, maar òf vast, òf slechts op een beperkt aantal waarden in te stellen.

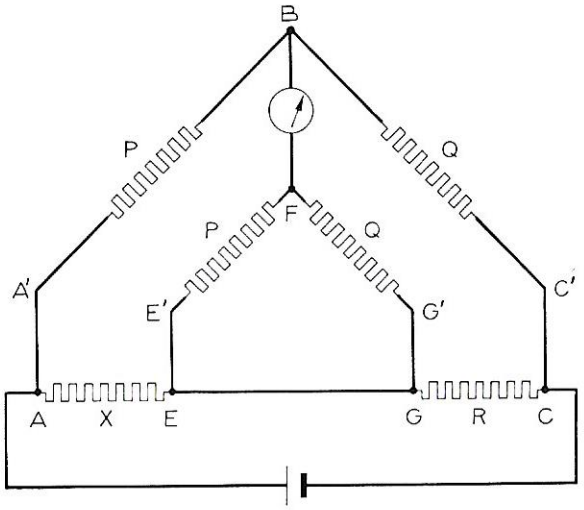

Fig. 3
Schema van de brugschakeling van Thomson.

Om inzicht in de werking te krijgen, denken we ons eerst de punten E, F en G samenvallend. De schakeling die dan ontstaat is identiek met de Wheatstoneschakeling.
De evenwichtsvoorwaarde voor deze vereenvoudigde schakeling is, geheel overeenkomstig het vorige voorbeeld:

$$X = \frac{P}{Q} R$$

Er staat niet anders dan dat de spanningsval langs AC door X en R in de verhouding P : Q verdeeld wordt, evenals ook de spanningsval langs ABC door P en Q in dezelfde verhouding wordt verdeeld. Dit leidt dan tot het spanningsverschil nul tussen B en (EFG).
Wanneer E en G niet samenvallen, en dus tussen E en G nog een van nul verschillende weerstand ligt, vormen de langs X en R optredende spannings-

vallen niet de totale spanningsval langs AC, maar ontbreekt daar de spanningsval tussen E en G aan. Wanneer we deze laatste spanningsval ook in twee stukken, zich als P tot Q verhoudend, konden verdelen en het eerste stuk bij de spanningsval langs X, het andere bij de spanningsval langs R optellen, zouden deze sommen ook weer de verhouding P : Q hebben.
Deze verdeling kunnen we nu bereiken door over EG de weerstanden EF en FG aan te sluiten, die in de verhouding P : Q gekozen zijn. Hierdoor verhoudt het spanningsverschil tussen A en F zich tot dat tussen F en C als P : Q. Hiervoor zagen wij reeds, dat dan tussen B en F geen spanningsverschil bestaat; een galvanometer, tussen deze punten aangesloten, geeft dus geen uitslag.
De conditie, aan de weerstanden EF en FG de verhouding P : Q te geven, vervult men in de praktijk door die weerstanden aan P en Q gelijk te maken.
Bezien wij de schakeling goed, dan bemerken wij, dat voor het verbinden van de weerstanden X en R met de brugschakeling „potentiaaldraden" AA', EE', GG' en CC' zijn gebruikt, wier waarden in meerdering komen van de weerstanden **P** en **Q.**
Men zou kunnen menen, dat hierdoor overeenkomstige bezwaren worden geïntroduceerd als bij de Wheatstonebrug gewraakt werden. In werkelijkheid is dat niet zo, omdat de weerstanden P en Q groot ten opzichte van X en R gekozen worden. Ook dient men er steeds voor te zorgen, dat de weerstanden der verbindingsdraden klein zijn ten opzichte van P en Q. Men kan dan ook meestal, als men niet de uiterste nauwkeurigheid verlangt, van de weerstand dezer verbindingsdraden afzien. Wenst men toch te corrigeren, dan is een globale bepaling van de weerstand der verbindingen voldoende om een eindresultaat van veel groter precisie mogelijk te maken.
Dezelfde overweging geldt ook voor de wisselende overgangsweerstanden op de aansluitingsplaatsen.
Men kan het verschil tussen Wheatstone- en Thomsonbrug ook zo formuleren, dat bij de Wheatstonebrug de in de meting inbegrepen weerstanden van verbindingsdraden en overgangen door dezelfde stroom doorlopen worden als de te meten weerstand, terwijl bij de Thomsonbrug slechts een fractie van die stroom door de meetleidingen gaat. Die fractie wordt een heel kleine fractie, als men de verhouding van de te meten weerstand en de meetweerstanden doelmatig kiest.
Een verder gaande analyse van de condities, die vervuld moeten worden om met de Thomsonbrug zo groot mogelijke nauwkeurigheid te behalen, leidt voornamelijk tot de volgende regels:

1e Maak de potentiaalleidingen zo kort en zwaar mogelijk, met andere woorden geef ze zo laag mogelijke weerstand.
2e Maak ook de weerstand van de verbinding EG zeer klein, dat wil zeggen hoogstens van dezelfde grootteorde als de weerstanden X en R.

Neemt men deze regels in acht, dan is in de meeste gevallen het meetresultaat zonder correcties direct bruikbaar. Alleen wanneer zeer hoge eisen aan de nauwkeurigheid worden gesteld, zullen enkele eenvoudige correcties moeten worden aangebracht. Deze worden in de uitvoerige gebruiksaanwijzing, die bij ieder instrument is gevoegd, duidelijk beschreven.

Bij de practische uitvoering van de instrumenten kan men er naar streven de nauwkeurigheid van het resultaat zoveel mogelijk op te voeren. Er ontstaan dan instrumenten met zware, zeer nauwkeurig uitgevoerde schakelaars, terwijl aan de wikkeling, veroudering en ijking van de weerstanden de uiterste zorg wordt besteed. Meetbruggen van deze kwaliteit worden door ons vervaardigd in onze „2000-serie". Daarnaast bestaat in de praktijk behoefte aan kleinere instrumenten, die desgewenst gemakkelijk verplaatsbaar zijn en waarbij met een wat geringere nauwkeurigheid genoegen wordt genomen. Instrumenten van deze klasse maken wij in de technische „2100-serie". Uit de gedetailleerde beschrijvingen in de volgende hoofdstukken blijkt, dat ook deze voor technische metingen bedoelde instrumenten reeds een grote nauwkeurigheid bezitten.

Technische meetbruggen

TECHNISCHE WHEATSTONEBRUG CAT. NO. 2160

De Wheatstonebrug Cat. No. 2160 is een eenvoudig doch universeel bruikbaar instrument. Het is vooral op zijn plaats waar een permanente opstelling wordt verlangd om snel en met grote precisie weerstandsmetingen te kunnen verrichten. Het meetbereik is groot en de foutgrens wordt gegarandeerd op 0,5 ‰.

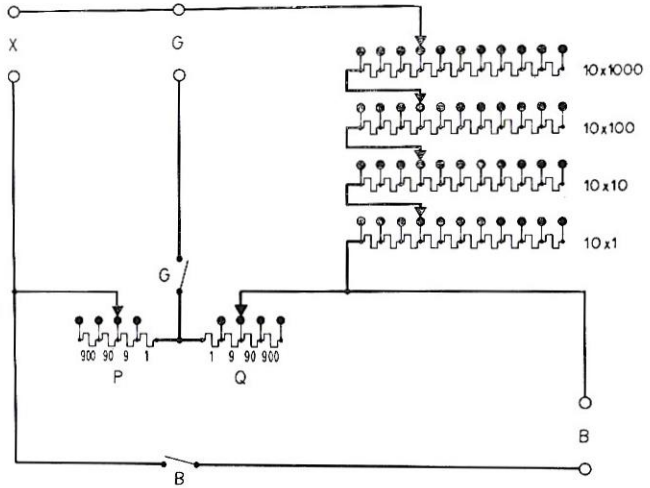

Fig. 4
Schema van de Wheatstonebrug Cat. No. 2160

In figuur 4 geven wij een schema van het apparaat. Hieruit blijkt, dat de vertakkingsweerstanden P en Q elk onafhankelijk op de waarden 1-10-100 en 1000 ohm instelbaar zijn. Hierdoor is men in staat, als brugverhouding elke macht van 10 in te stellen van 10^{-3} tot 10^{3}.
De meetweerstand is een combinatie van vier decadeweerstanden, nl. 10 x 1, 10 x 10, 10 x 100 en 10 x 1000 ohm.
Het instrument is voorzien van 3 paar aansluitklemmen, nl. voor de te meten weerstand, gemerkt X, voor de stroombron, gemerkt B, en voor de galvanometer, gemerkt G. Terloops merken we op, dat de meetweerstand direct geschakeld is tussen één van de klemmen B en één van de klemmen G. Tussen deze klemmen beschikt men dus over een normale vierdecaden weerstandsbank. Zowel voor de voeding als voor de galvanometer zijn drukknopschakelaars ingebouwd. Over het gebruik hiervan volgen verderop nog enkele opmerkingen.
Voor het meetbereik van de Wheatstonebrug 2160 volgt uit de reeds opgegeven waarden der realiseerbare brugverhoudingen en de instelbare waarden van de meetweerstand het gebied van 0,001 ohm tot ruim 10 megohm. Voor het practisch bruikbare meetbereik kan men het volgende overwegen.
Wanneer men bij de metingen de goede regel volgt, minstens 1000 ohm van de meetweerstand in te schakelen, waardoor het meetresultaat direct in vier cijfers kan worden afgelezen, dan kan met de kleinste brugverhouding juist

nog een weerstand van 1 ohm worden gemeten. Dit is reeds rijkelijk laag. 1 ohm dient eigenlijk al met de Thomsonbrug te worden gemeten. Overigens zijn met dezelfde brugverhouding nog benaderde metingen van weerstanden van enkele milli-ohms mogelijk, wanneer men bijvoorbeeld de weerstand van een verbindingssnoer wenst te weten.
Als bovenste grens van het meetbereik komt men theoretisch op ruim 10 megohm. Dergelijke hoge weerstanden zijn echter alleen onder zeer gunstige (droge) weersomstandigheden goed meetbaar, omdat anders het meetobject zelf meestal niet voldoende gedefinieerd is.
Uit deze beschouwingen volgt, dat alle weerstandswaarden die liggen in het gebied dat voor meting met een Wheatstonebrug in aanmerking komt, vallen binnen het bereik van de brug 2160.
Het zeer grote meetbereik van de Wheatstonebrug brengt mee, dat bij het uitvoeren der metingen soms nodeloos tijd wordt verloren met het zoeken naar een eerste benaderde instelling. We menen daarom goed te doen, een bruikbare meetprocedure hier kort te beschrijven. Daartoe zullen we vooraf enige aandacht geven aan de hulpapparatuur, die voor het goed functioneren van de meetopstelling noodzakelijk is.
Wheatstonebrug 2160 moet worden gebruikt met een afzonderlijke galvanometer. Om de nauwkeurigheid van het instrument ten volle te kunnen benutten is het gewenst, hiervoor een spiegelgalvanometer te gebruiken. Bijzonder geschikt is de zeer snelle Simplexgalvanometer Cat. No. 201. Deze spiegelgalvanometer heeft een slingertijd van slechts 1,3 seconde en geeft bij een schaalafstand van 1 m een uitslag van 1 mm door een stroom van ca. 1,5 x 10^{-8} Ampère. De inwendige weerstand bedraagt 30 ohm, de aperiodische grensweerstand is ca. 40 ohm. Met deze constanten is de gevoeligheid ruimschoots voldoende om de gegarandeerde nauwkeurigheid van de brug ten volle te kunnen benutten.
De galvanometer wordt gewoonlijk opgesteld op een muurconsole, voorzien van een schaaldrager en schaal, waarop de uitslagen worden afgelezen. Een lantaarn boven de console zorgt voor een lichtsterke, scherp begrensde lichtvlek met index. De gebruikelijke afstand tussen galvanometer en schaal is ongeveer 0,5 meter. Hierbij is de lichtsterkte van de vlek zo groot, dat zelfs in een helder verlichte omgeving deze nog goed kan worden waargenomen. Deze, hier noodzakelijkerwijze zeer summier beschreven opstelling heeft Cat. No. 210.
In de eerste stadia van de meting, wanneer de brugweerstanden nog niet zijn afgeregeld, zou door de galvanometer soms een zeer sterke stroom kunnen gaan, die overbelasting van dit instrument tengevolge zou kunnen hebben. Daarom moet een middel aanwezig zijn om de stroom door de galvanometer te beperken. Het meest gebruikelijk hiervoor is een zgn. shuntbankje. Dit is een klein hulpinstrument met 4 aansluitklemmen, aan twee ervan komt de galvanometer, het andere paar klemmen wordt verbonden met de uitgangsklemmen G van de Wheatstonebrug. Bovenop het instrument bevindt zich een schakelaar, waarmee de stroom door de galvanometer op bekende wijze verzwakt kan worden. Bij het shuntbankje, dat normaal bij de Simplex galvanometer geleverd kan worden, en dat Cat. No. 401 draagt, zijn de beschikbare verhoudingen van 1 met opklimmende machten van 10 tot 10^{4}. Bovendien is een nulcontact aan-

wezig. De schakeling van dit nuttige instrument zal bij de Wheatstonebrug met inbouwgalvanometer nader beschreven worden. We merken op, dat door gebruik te maken van het shuntbankje de slingeringen van de galvanometer zo sterk worden gedempt, dat een korte aanwijstijd wordt verkregen en dat kleine uitslagen gemakkelijk kunnen worden waargenomen.
Na deze korte beschrijving van de opstelling kunnen we voortgaan met een beschrijving van de metingen.
De te meten weerstand wordt aan de klemmen X van de Wheatstonebrug verbonden. Hierbij houde men er rekening mee, dat de weerstand van de verbindingsdraden wordt meegemeten, het is dus van voordeel wanneer deze te verwaarlozen klein is ten opzichte van de onbekende weerstand.
We gaan er van uit, dat de galvanometer met het shuntbankje reeds verbonden is met de klemmen G. Men begint de metingen met het shuntbankje op 0 te zetten. Vervolgens vergewist men zich ervan, dat de vroeger genoemde drukknopschakelaars uitstaan. In deze stand kunnen ze worden ingedrukt, waarmee het contact gesloten is, welk contact bij loslaten van de schakelaar weer wordt verbroken. Wanneer de knop in neergedrukte stand een kwartslag wordt gedraaid, blijft de verbinding bestaan. Om deze te verbreken draait men de knop weer een kwartslag terug of verder. Met de schakelaars uit wordt aan de klemmen B een stroombron aangesloten. Een batterij van 4 Volt is in bijna alle gevallen voldoende.
Wanneer ook de grootte-orde van de onbekende weerstand geheel onbekend is, begint men met een gemiddelde instelling van de brug te proberen in welke buurt men de juiste instelling zal moeten zoeken. Hiertoe stelt men bijvoorbeeld de 1000 ohm decade van de meetweerstand op 5 en de brugweerstanden P en Q beide op 100. Men draait nu de schakelaar van het shuntbankje op het eerste werkcontact, waarbij dus de stroom door de galvanometer met een factor 10^4 is verzwakt. Vervolgens wordt de batterijschakelaar ingedrukt en vastgezet. Indrukken van de galvanometerschakelaar zal nu over het algemeen een uitslag van de galvanometer ten gevolge hebben. Men draait nu de weerstand P op 1000 en neemt een verandering van de galvanometeruitslag waar. Wanneer deze in dezelfde richting is als de eerst waargenomene met de stand P = 100, dan blijkt hieruit, dat de te meten weerstand kleiner is dan de waarde waarop de bank eerst was ingesteld, dus kleiner dan 5000 ohm. Is daarentegen de richting van de galvanometeruitslag veranderd, dan ligt de waarde van de onbekende weerstand tussen de eerst ingestelde waarde, dus 5000 ohm en de nieuw ingestelde waarde, dus 50000 ohm. Is tenslotte slechts de uitslag verminderd, maar nog steeds in dezelfde richting, dan volgt hieruit, dat de onbekende weerstand groter is dan 50000 ohm. Afhankelijk van het resultaat van deze globale meting zal men nu de bank verder kunnen regelen, waarbij men dus ook gebruik maakt van verandering van de instelling van de meetdecaden. Het is duidelijk, dat men, naarmate een betere instelling van de brug gevonden is, de galvanometergevoeligheid door verstellen van het shuntbankje gaandeweg kan vergroten om de richting van de aan te brengen veranderingen beter te kunnen waarnemen.
Wanneer de meting op de beschreven wijze wordt uitgevoerd, komt men snel

tot resultaat. We hebben reeds opgemerkt, dat men verstandig doet de brugverhouding zodanig te kiezen, dat inderdaad de 1000 ohm decade bij de meting gebruikt wordt, dus op 1 of hoger staat. Het is gewenst nog een korte opmerking te maken over een doelmatig gebruik van de beide aanwezige drukschakelaars bij het einde van de meting. Als criterium voor de juiste instelling van de brug hebben wij bij onze beschrijving het stroomloos zijn van de verbinding DB in figuur 1 gesteld. Wanneer men dit constateert door op de hiervoor beschreven wijze na te gaan of een galvanometeruitslag optreedt bij het sluiten van de galvanometerschakelaar, dan bestaat de mogelijkheid dat een fout optreedt wanneer ergens in de schakeling zgn. thermokrachten aanwezig zijn. Deze fout kan op twee wijzen vermeden worden. De methode die altijd betrouwbaar tot het doel voert is als volgt. Men draaie beide schakelaars in de „uit" stand. Wanneer men nu met uitgeschakelde batterijstroom de galvanometerschakelaar indrukt, zal, wanneer thermokrachten aanwezig zijn, een uitslag optreden. Schakelt men nu de galvanometer weer uit en de batterij in, dan zal daarna, wanneer de brug goed is ingesteld, bij wederom indrukken van de galvanometerschakelaar dezelfde uitslag optreden, die ook oorspronkelijk met uitgeschakelde batterij werd waargenomen. Men kan deze methode enigszins vereenvoudigen wanneer weerstanden gemeten worden die geen merkbare zelfinductie of capaciteit hebben. In dit geval kan de galvanometerschakelaar ingeschakeld blijven en worden waargenomen of bij indrukken van de batterijschakelaar al of niet verandering van de galvanometerstand optreedt. We moeten er evenwel nogmaals nadrukkelijk op wijzen, dat deze methode niet kan worden toegepast wanneer de te meten weerstand een merkbare zelfinductie of capaciteit heeft, aangezien in dat geval een grote stroomstoot door de galvanometer kan optreden.
De practische uitvoering van de Wheatstonebrug 2160 is analoog aan die van de weerstandsbanken van de 2100-serie: notenhouten kast met zwart gemoffelde aluminium dekplaat, waartegen het instrument is gemonteerd. De groepering van de bedieningsorganen blijkt uit figuur 5.
In dit bovenaanzicht herkent men de schakelaars voor de weerstanden, de aansluitklemmen en de drukknoppen van de schake-

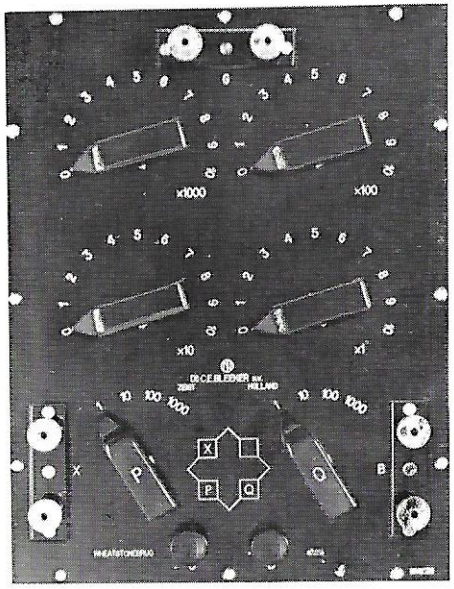

Fig. 5
Bovenaanzicht van de Wheatstonebrug. Cat. No. 2160.

laars voor batterij en galvanometer. Bovendien is in de dekplaat een vereenvoudigd schema gegraveerd, waaruit de volgorde van de weerstanden kan worden afgelezen.

Samenvattend karakteriseren wij Wheatstonebrug 2160 als volgt:

1. Eenvoudig gebouwd, universeel bruikbaar instrument.
2. Groot meetbereik, van 1 ohm tot 10 megohm aflezing van het resultaat in vier cijfers.
3. Foutgrens kleiner dan 0,5 ‰.
4. Overzichtelijke opstelling van de bedieningsknoppen.
5. Onafhankelijke schakelaars voor stroombron en galvanometer.

Cat. No. 2160	Technische Wheatstonebrug. Afmetingen 290 x 225 x 160 mm. Gewicht 3,5 kg.
Cat. No. 201	Simplex galvanometer. Afmetingen 135 x 115 x 185 mm. Gewicht 1,85 kg.
Cat. No. 210	Galvanometeropstelling compleet.
Cat. No. 401	Shuntbankje bij galvanometer 201. Afmetingen 120 mm ∅ x 90 mm. Gewicht 1 kg.

WHEATSTONEBRUG MET INBOUWGALVANOMETER CAT. NO. 2160 G

De Wheatstonebrug met inbouwgalvanometer, Cat. No. 2160 G, is een gemakkelijk verplaatsbaar, betrekkelijk licht instrument, uitermate geschikt om te gebruiken waar op verschillende plaatsen snel weerstandsmetingen met behoorlijke nauwkeurigheid te verrichten zijn. Het meetbereik is groot, de foutgrens wordt gegarandeerd op 1 ‰. In figuur 6 geven wij een schema van het instrument

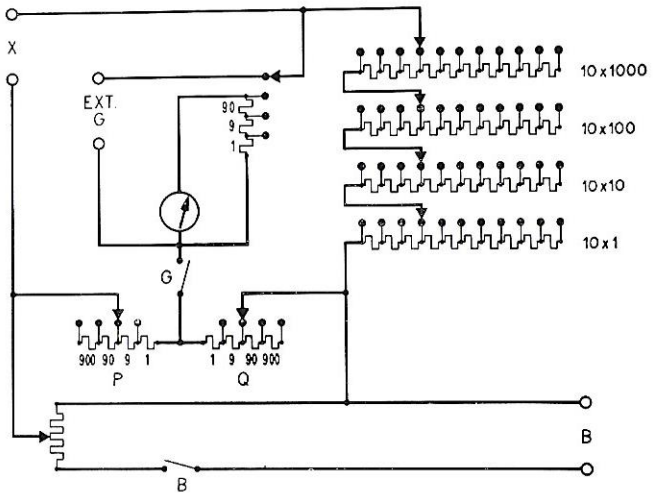

Fig. 6
Schema van de Wheatstonebrug Cat. No. 2160 G.

Hieruit blijkt, dat de opbouw van het meetgedeelte geheel overeenkomt met Wheatstonebrug 2160. Ook hier kunnen de vertakkingsweerstanden P en Q elk onafhankelijk op de waarden 1-10-100 en 1000 ohm worden ingesteld, waardoor als brugverhouding elke macht van 10 van 10^{-3} tot 10^{3} beschikbaar is. De meetweerstand bestaat uit vier decaden, nl. 10 x 1, 10 x 10, 10 x 100 en 10 x 1000 ohm. Hieruit volgt dat de banken 2160 en 2160 G hetzelfde meetbereik hebben. Het kenmerkende verschil met Wheatstonebrug 2160 is de ingebouwde, zeer robuuste en gevoelige wijzergalvanometer, waardoor met de brug 2160 G metingen mogelijk zijn overal waar het instrument op een redelijk solide tafel kan worden neergezet.
Behalve de galvanometer is bovendien enige hulpapparatuur ingebouwd, waardoor de brug alleen met een batterij verbonden moet worden om geheel gebruiksklaar te zijn. Deze hulpapparatuur dient om tijdens de eerste stadia van de meting de stromen door de galvanometer tot op redelijke waarden te be-

perken. Uit de figuur blijkt, dat hiervoor twee onafhankelijke regelmogelijkheden zijn ingebouwd. Allereerst is er een als regelbare spanningsdeler geschakelde weerstand met draaicontact in de batterijkring, waardoor de voor de meting gebruikte spanning kan worden verminderd. Deze regeling is continu. Daarnaast is een tweede regelmogelijkheid aanwezig in de galvanometerkring. Hier is een shunt volgens Ayrton-Mather toegepast in combinatie met een schakelaar, die vier standen heeft. Bij drie van deze standen is de inbouwgalvanometer met de brug verbonden. De vierde stand geeft de mogelijkheid, de brug met een externe galvanometer te verbinden wanneer zulks om een of andere reden gewenst is. Deze stand van de schakelaar is in de figuur voorgesteld.
Gaan wij nu na hoe de brugstroom i wordt verdeeld tussen galvanometer en shunt wanneer de schakelaar op het contact naar de 1 ohm weerstand wordt geplaatst. Er is dan een weerstand van 99 ohm in serie met de galvanometer, waarvan we de weerstand R noemen. De stromen door galvanometer en shunt verhouden zich dus als 1 : (99 + R). Hieruit berekent men de stroom i_g door de galvanometer:

$$i_g = \frac{1}{R + 100}\, i.$$

Op dezelfde wijze vinden we, met de schakelaar in de volgende stand, waarbij de shunt 10 ohm bedraagt en de galvanometer een serie-weerstand heeft van 90 ohm:

$$i_g = \frac{10}{R + 100}\, i.$$

Bij de derde stand is de shunt 100 ohm en heeft de galvanometer geen serieweerstand. We vinden dan

$$i_g = \frac{100}{R + 100}\, i.$$

Het blijkt dus, dat de gedeelten van de stroom die door de galvanometer vloeien, zich verhouden als 1 : 10 : 100. Gemakshalve formuleert men dit wel door te stellen, dat de gevoeligheid van de galvanometer in de drie onderhavige standen zich verhoudt als 0,01 tot 0,1 tot 1. Dit is echter alleen juist wanneer de stroomgevoeligheid wordt bedoeld. Voor de spanningsgevoeligheid zijn de verhoudingen anders, omdat de aequivalente weerstand van het galvanometercircuit in de drie standen sterk varieert. Bij gebruik in een brug worden de genoemde verhoudingen des te beter benaderd naarmate met hogere weerstanden in het meetgedeelte van de bank wordt gewerkt. Aangezien de galvanometer slechts als nulindicator dienst doet, zijn de nauwkeurige waarden van de verhouding der gevoeligheden voor het meetresultaat zonder enige betekenis.
De eigenschappen van de galvanometer die in de brug 2160 G is ingebouwd vormen een gelukkig compromis van de aan een dergelijk instrument te stellen tegenstrijdige eisen. De constructie is robuust, zodat bij enigermate behoorlijke behandeling geen storingen optreden en ook ongeschoolde krachten met het instrument kunnen meten. Anderzijds is de gevoeligheid zo groot, dat over een

belangrijk deel van het meetbereik metingen met een fout kleiner dan 1 ‰ mogelijk zijn. Tenslotte is de aanwijstijd voldoende kort, zodat ook langere meetreeksen met het instrument goed uitvoerbaar zijn.
De practische uitvoering van de Wheatstonebrug 2160 G is analoog aan die van de weerstandsbanken van de 2100-serie: notenhouten kast met zwartgemoffelde aluminium dekplaat, waartegen het instrument is gemonteerd. De groepering der bedieningsorganen blijkt uit figuur 7. In dit bovenaanzicht herkent men allereerst de wijzergalvanometer met spiegelschaal en schroef voor nulpuntscorrectie. Concentrisch met deze schroef is een genikkelde kartelring aanwezig, waarmee de galvanometer tijdens het vervoer van het instrument gearreteerd wordt. Door een rond venster in deze ring neemt men een groen signaal waar als de galvanometer is gearreteerd, een rood signaal wanneer deze vrij is.

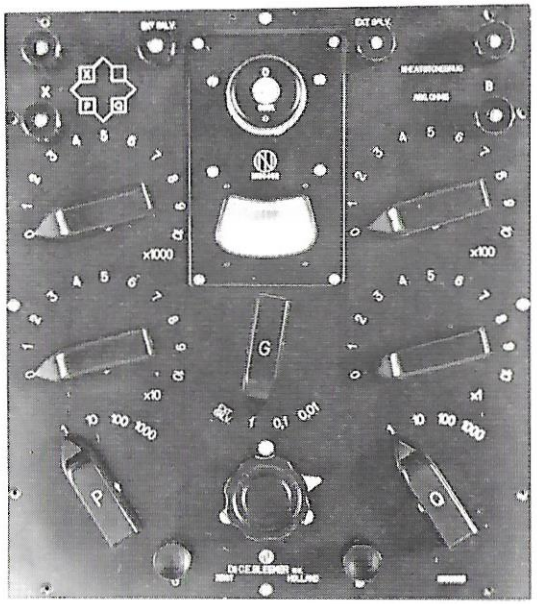

Fig. 7
Bovenaanzicht van de Wheatstonebrug.
Cat. No. 2160 G.

Bij de normale horizontale stand van het instrument bevindt de schakelaar G voor regeling van de galvanometergevoeligheid zich vlak voor de galvanometer. Daarvoor bevindt zich de knop voor de bediening van de reeds genoemde spanningsdeler in de batterijkring. Het dichtst bij de waarnemer zijn de drukknopschakelaars B en G, waarvan het gebruik bij de brug 2160 reeds uitvoerig is besproken.
De bedieningsknoppen voor de weerstanden zijn gelijk aan de overeenkomstige knoppen bij de brug 2160. Ook is hetzelfde vereenvoudigde brugschema in de dekplaat gegraveerd.
Op één der zijden van de bank bevindt zich een tabel, waarop de gunstigste waarden voor de vertakkingsweerstanden voor verschillende te meten weerstanden zijn aangegeven. Tevens vindt men hier gegevens over de bij de metingen te gebruiken spanning aan de batterijklemmen.

Samenvattend karakteriseren we de Wheatstonebrug 2160 G als volgt:

1e Compact, gemakkelijk verplaatsbaar instrument voor het meten van weerstanden tussen 1 ohm en 10 megohm.

2e Na verbinding met een stroombron geheel voor gebruik gereed.

3e Ingebouwde robuuste wijzergalvanometer van hoge gevoeligheid, welke is uitgerust met spiegelschaal.

4e Foutgrens kleiner dan 1 ‰.

5e Twee mogelijkheden voor vermindering van de meetgevoeligheid.

6e Overzichtelijke opstelling van de bedieningsknoppen.

7e Onafhankelijke schakelaars voor stroombron en galvanometer.

8e Aansluitmogelijkheid voor een externe galvanometer.

Cat. No. 2160 G Wheatstonebrug met inbouwgalvanometer.
Afmetingen: 290 x 260 x 160 mm.
Gewicht: 5,6 kg.

DRAAGBARE WHEATSTONEBRUG CAT. NO. 2160 GD

Het meetgedeelte van Wheatstonebrug cat. no. 2160 GD komt geheel overeen met Wheatstonebrug 2160 G. Het instrument is echter voorzien van een bijzonder solide kast met scharnierend deksel. In het deksel kan een stroombron van 4½ Volt worden aangebracht, waardoor het instrument geheel „self contained" is. De foutgrens is 1 ‰.
Door de solide en doelmatige uitvoering van de kast [1]) is het instrument bestand tegen geregeld transport. Wanneer het deksel gesloten is, is het inwendige van de kast niet alleen afdoende beschermd tegen stof en vuil, maar door een rubber pakkingring eveneens tegen water. Het materiaal van de kast is duurzaam teakhout, de hoeken zijn voorzien van metalen hoekbescherming. Aan drie zijden van de kast zijn rubber stootnokken aangebracht, aan één zijde een stevige lederen handgreep.
De verdere uitvoering van het instrument is gelijk aan die van Wheatstonebrug 2160 G. De eigenlijke kast is van boven gesloten met een zwart gemoffelde aluminium dekplaat, waartegen het gehele instrument is gemonteerd.

Cat. no. 2160 GD: Draagbare Wheatstonebrug.
Afmetingen: 331 x 345 x 200 mm.
Gewicht: 8,5 kg.

DRAAGBARE WHEATSTONEBRUG MET LICHTVLEKGALVANOMETER CAT. NO. 2160 LD

De Wheatstonebrug 2160 LD is evenals de brug 2160 GD een geheel „self contained" draagbaar instrument in solide teakhouten kast met scharnierend deksel. Het belangrijkste punt van verschil is de ingebouwde galvanometer. De brug 2160 LD is voorzien van een lichtvlekgalvanometer, die ongeveer tien maal zo gevoelig is als de wijzergalvanometer die in de andere Wheatstonebruggen als nulpuntsindicator is toegepast. De grotere instelnauwkeurigheid die hierdoor verkregen is kan zinvol worden benut doordat de foutgrens van Wheatstonebrug 2160 LD gegarandeerd wordt op 0,5 ‰.
Het meetcircuit komt nagenoeg overeen met het in figuur 6 afgebeelde schema van Wheatstonebrug 2160 G. Aangezien evenwel een externe galvanometer bij dit instrument niet van belang is, is hiervoor ook geen aansluitmogelijkheid aanwezig. De schakelaar voor de galvanometergevoeligheid heeft dezelfde standen 0,01, 0,1 en 1 die in het schema zijn aangegeven. De vierde stand is eveneens aanwezig en gemerkt W. Met de schakelaar in deze stand is het instrument bruikbaar als decadebank. Het wordt dan aangesloten aan twee eveneens met W gemerkte aansluitklemmen.
Een ander verschil met de brug 2160 G is, dat bij het onderhavige instrument

1) Deze kast komt nagenoeg overeen met de in figuur 8 afgebeelde kast van de Wheatstonebrug Cat. No. 2160 LD.

de stroombron is ingebouwd. Hierbij is van belang, dat een schakelaar aanwezig is om de gebruikte beide batterijen van 4½ Volt naar keuze parallel of in serie te schakelen. Bij weerstanden tot enkele tienduizenden ohms zal men met 4½ Volt spanning meten, waarbij de batterijen ieder slechts de helft van de meetstroom behoeven te leveren. Wanneer bij grotere weerstanden nauwkeurige metingen verricht moeten worden, schakelt men over op 9 Volt, waarmee de gevoeligheid van de nulpuntsindicatie wordt verdubbeld.
Behalve de batterijen voor de meetstroom is ook een batterij ingebouwd voor het lantaarntje van de galvanometer. Door gunstige dimensionering van de betreffende onderdelen is bereikt, dat met het geringe stroomverbruik van 0,2 Ampère bij 3,5 Volt de lichtvlek van de galvanometer zelfs in een helder verlichte omgeving zeer goed zichtbaar is.

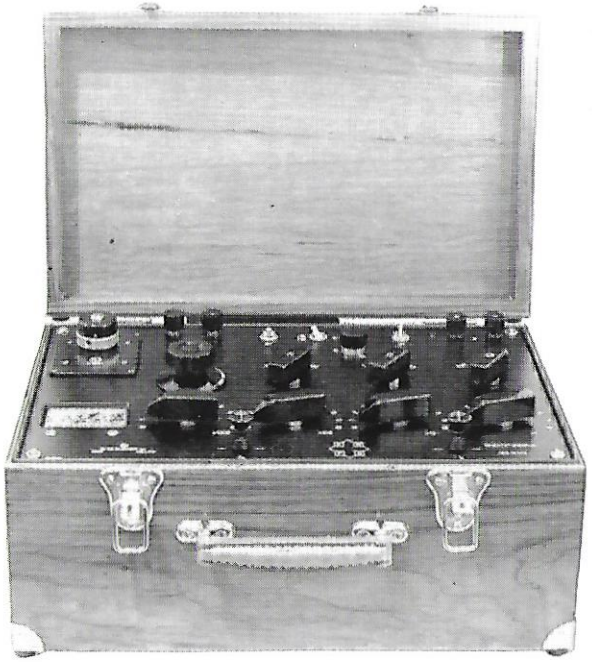

Fig. 8
Wheatstonebrug Cat. No. 2160 LD.

De opbouw van het instrument blijkt uit figuur 8. Het is gemonteerd tegen een zwart gemoffelde aluminium dekplaat, die de kast van boven afsluit. Om de dekplaat is een rubber strook aangebracht, waardoor het instrument bij gesloten deksel afdoende tegen vocht en vuil is beschermd. De hoeken van kast en deksel zijn voorzien van metalen hoekbescherming. Aan drie zijden van de kast zijn rubber stootnokken aangebracht, aan één zijde een stevige lederen handgreep. Wanneer het deksel geopend is, kan het op eenvoudige wijze geheel worden afgenomen.
Op de dekplaat herkent men links de montageplaat van de ingebouwde galvanometer. Deze galvanometer is voorzien van een genikkelde arreteerring, waarin een rond venster is aangebracht. Door dit venster neemt men een groen signaal waar als de galvanometer is gearreteerd, een rood signaal wanneer deze vrij

is. Geheel bovenop bevindt zich een schroef voor de nulpuntscorrectie. Vóór de galvanometer bevindt zich het matglazen scherm met schaalverdeling, waarop de cirkelvormige lichtvlek met zwarte indexlijn wordt geprojecteerd.
Naast de galvanometer bevinden zich van links naar rechts de reeds genoemde klemmen W, drie hefboomschakelaars en de aansluitklemmen voor de te meten weerstand. Van de hefboomschakelaars dienen er twee voor het aan- en uitschakelen van lamp- en meetstroom, terwijl de middelste de serie-parallelschakelaar is voor de meetstroombatterijen. Vóór de hefboomschakelaars ziet men juist nog de genikkelde ring en het zwarte knopje van de galvanometerlantaarn. Door uittrekken van deze knop is het lampje (voor eventuele vernieuwing) bereikbaar.
De verdere bedieningsknoppen van de Wheatstonebrug 2160 LD komen geheel overeen met de vroeger besprokene van de brug 2160 G. De vier decadeschakelaars van de meetweerstand zijn naast elkaar aangebracht, vrijwel vooraan op de montageplaat, daarachter bevinden zich van links naar rechts de spanningsdeler van de meetstroom, de vergelijkweerstanden P en Q en de schakelaar voor de galvanometergevoeligheid. Geheel vooraan bevinden zich de drukknopschakelaars voor batterij en galvanometer en het reeds bij de andere bruggen genoemde vereenvoudigde brugschema. De ingebouwde batterijen zijn bereikbaar via een schuif in de bodem van de kast.

We vatten de belangrijkste eigenschappen van de Wheatstonebrug cat. no. 2160 LD als volgt samen:

1e Compact, geheel „self contained" gemakkelijk transportabel meetinstrument voor het meten van weerstanden tussen 1 ohm en 10 megohm.
2e Ingebouwde, robuuste lichtvlekgalvanometer van hoge gevoeligheid en korte aanwijstijd.
3e Foutgrens kleiner dan 0,5 ‰.
4e Twee mogelijkheden voor vermindering van de meetgevoeligheid.
5e Overzichtelijke opstelling van de bedieningsknoppen.
6e Onafhankelijke schakelaars voor stroombron en galvanometer.
7e Meetweerstand afzonderlijk bruikbaar als decadebank.

Cat. no. 2160 LD: Draagbare Wheatstonebrug met lichtvlek inbouwgalvanometer.
Afmetingen: 450 x 330 x 240 mm.
Gewicht: 13 kg.

DRAAGBARE BRUG VOOR METINGEN AAN COMMUNICATIELIJNEN CAT. NO. 2160 I

De draagbare brug cat. no. 2160 I is een universeel bruikbare Wheatstonebrug, voorzien van een aantal extra schakelmogelijkheden, die speciaal van belang zijn voor het localiseren van fouten in communicatielijnen. Het instrument is geheel „self contained", met ingebouwde gevoelige wijzergalvanometer en ingebouwde batterij. In verband met de toepassing voor het localiseren van fouten is de mogelijkheid aanwezig, gebruik te maken van een externe stroombron met aanmerkelijk hogere spanning dan de interne batterij. Tot 45 Volt mag deze externe stroombron direct worden aangesloten. Voor nog hogere spanningen tot 200 Volt toe, moet een passende voorweerstand worden gebruikt.

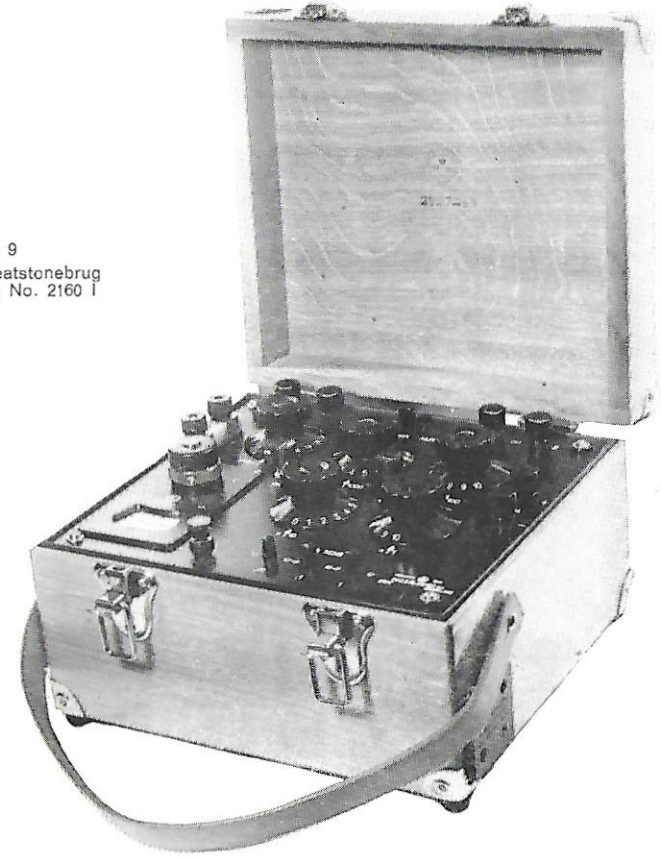

Fig. 9
Wheatstonebrug
Cat. No. 2160 I

De speciale schakelmogelijkheden waarmee de brug 2160 I is uitgerust maken het instrument geschikt voor de directe bepaling van de verhouding van twee onbekende weerstanden en voor het opsporen van sluitingen en isolatiefouten. Wij noemen het beproeven van aders op aardsluiting, de Murray lusproef (speciaal voor lage weerstandsmetingen), de Varley lusproef (speciaal voor hoge weerstandsmetingen) en het bepalen van de fout in een open circuit. Aan de bruikbaarheid als normale Wheatstonebrug wordt hierdoor op geen enkele wijze afbreuk gedaan. Het meetbereik en de meetgevoeligheid zijn gelijk aan die van brug 2160 G. De foutgrens is 1 ‰. Het instrument kan als decadeweerstandsbank worden gebruikt. Het wordt geleverd met een duidelijke en uitvoerige gebruiksaanwijzing.

De uitvoering (zie figuur 9) komt overeen met die van brug 2160 GD. De solide teakhouten draagkast is voorzien van een waterdicht sluitend deksel. De hoeken zijn voorzien van metalen hoekbescherming. Aan drie zijden van de kast zijn rubber stootnokken aangebracht. Bovendien is de kast voorzien van een solide lederen draagriem. Wanneer het deksel geopend is, kan het op zeer eenvoudige wijze geheel worden afgenomen.

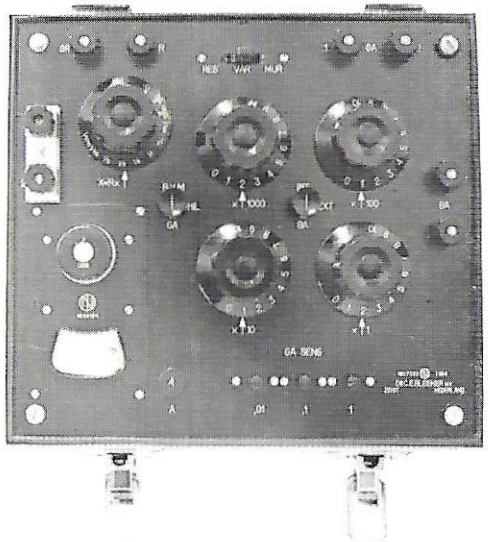

Fig. 10
Bovenaanzicht van de Wheatstonebrug
Cat. No. 2160 I.

Een bovenaanzicht van de kast met afgenomen deksel is afgebeeld in figuur 10. De thans zichtbare aluminium dekplaat draagt het gehele meetinstrument met alle bedieningsknoppen. Men herkent de ingebouwde galvanometer en de ronde bedieningsknoppen van de vier decadeschakelaars van de meetweerstand. Links van de decaden bevindt zich de ronde gegraveerde bedieningsknop van de schakelaar voor de verschillende brugverhoudingen. Er is geen aparte schakelaar voor het instellen van de galvanometergevoeligheid. In plaats daarvan zijn drie drukknopschakelaars aanwezig, waarmee met behulp van een ingebouwde shunt volgens Ayrton-Mather de factoren 0,01, 0,1 en 1 van de stroomgevoeligheid verwezenlijkt zijn. Voorts zijn aanwezig aansluitklemmen voor de te meten weerstand, voor een externe galvanometer en een externe batterij, benevens een aantal schakelaars en aansluitklemmen, noodzakelijk voor de hierboven genoemde speciale metingen. Aan de klemmen voor galvanometer en batterij kunnen ook respectievelijk een telefoon en een wisselstroombron worden aangesloten. Dit

is noodzakelijk wanneer de fout in een open circuit gelocaliseerd moet worden. Bij deze metingen kan met een aparte schakelaar de galvanometer worden uitgeschakeld, zoals in de gebruiksaanwijzing nader beschreven wordt.
De ingebouwde batterij, die voor de meeste metingen voldoende spanning heeft, is bereikbaar door een in figuur 9 zichtbaar deksel in de rechter zijwand van de kast.

Samenvattend karakteriseren wij Wheatstonebrug 2160 I als volgt:

1e Zeer compact „self contained", gemakkelijk transportabel meetinstrument van veelzijdige bruikbaarheid.
2e Ingebouwde robuuste wijzergalvanometer van hoge gevoeligheid, welke is uitgerust met spiegelschaal.
3e Foutgrens kleiner dan 1 ‰.
4e Speciale schakelmogelijkheden voor metingen aan communicatielijnen.
5e Zeer solide spatwaterdichte draagkast.

Cat. no. 2160 I: Draagbare brug voor metingen aan communicatielijnen.
Afmetingen: 300 x 340 x 215 mm.
Gewicht: 9,3 kg.

THOMSONBRUG MET INBOUWGALVANOMETER CAT. NO. 2181

De Thomsonbrug met inbouwgalvanometer cat. no. 2181 is een bijzonder eenvoudig en doeltreffend apparaat voor het meten van lage weerstanden. Het instrument heeft slechts enkele bedieningsknoppen en een overzichtelijke gravering, zodat er snel en betrouwbaar mee gemeten kan worden. Het meetbereik is groot en vormt een uitstekende aanvulling van het meetbereik van de Wheatstonebruggen. De foutgrens van de ijking is gegarandeerd op 1 ‰.
In principe wordt de schakeling van het instrument voorgesteld in figuur 3. De beide weerstanden P bestaan elk uit één decade en een continu veranderlijke weerstand. Door mechanische koppeling van de schakelaars wordt er voor gezorgd, dat beide weerstanden steeds gelijktijdig veranderd worden en altijd onderling gelijk zijn. Er is één bedieningsknop voor de gekoppelde decaden, met standen genummerd 0 tot 10. Een tweede bedieningsknop verandert de gekoppelde continu veranderlijke weerstanden. De stand van deze knop kan worden afgelezen op een in ruim honderd delen verdeelde schaal becijferd van 0,1 tot 1,1. Eén interval van de verdeling komt overeen met 0,01 van één stap van de decade. Op decade en sleepdraad samen kan de instelling van beide weerstanden P derhalve direct in drie cijfers worden afgelezen.
De beide weerstanden Q zijn bij de Thomsonbrug 2181 eveneens automatisch onderling gelijk. Er zijn twee paren, die onderling een factor 10 verschillen. Hierdoor is met één bekende weerstand R een groot gebied van weerstanden voor nauwkeurige meting toegankelijk. Over het algemeen is het bij Thomsonbruggen gebruikelijk, de weerstanden R buiten het instrument te houden. Dit wordt hierdoor ongetwijfeld zeer veelzijdig, maar wanneer tijdens een meting blijkt, dat voor optimaal resultaat een andere weerstand R gebruikt moet worden, geeft de noodzakelijke verwisseling steeds een vrij groot tijdverlies. Omdat de brug 2181 vooral een gemakkelijk te bedienen, snel meetinstrument moet zijn, zijn de weerstanden R, ten getale van drie stuks, ingebouwd. Samen met de reeds genoemde beide paren weerstanden Q vormen deze weerstanden R een eenheid, die door één enkele schakelaar van bijzondere constructie wordt bediend. Deze meetbereikschakelaar heeft zes standen, voorzien van de gravering x 0,0001, x 0,001, x 0,01, x 0,1, x 1 en x 10 ohm. Men kiest bij de meting die stand van de schakelaar, waarbij de brug in evenwicht kan worden gebracht bij een van nul verschillende stand van de decadeschakelaar van de weerstanden P. Men verkrijgt dan een meetresultaat in drie cijfers.
Wanneer de te meten weerstand ligt tussen 0,0001 ohm en 100 ohm, is een dergelijke stand van de meetbereikschakelaar altijd mogelijk en bovendien gemakkelijk te vinden door een globale weerstandsmeting op het hoogste meetbereik. Een dergelijke meting vooraf kost nauwelijks tijd, omdat bij veranderen van meetbereiken alléén de meetbereikschakelaar verzet behoeft te worden.
Voor het aansluiten van de onbekende weerstand zijn vier aansluitklemmen aanwezig. Twee hiervan zijn extra zwaar uitgevoerd. Zij worden door zo kort

en zwaar mogelijke leidingen verbonden met de stroomaansluitingen van de te meten weerstand. Het andere paar klemmen is wat minder zwaar, het dient voor de aansluiting van de potentiaalleidingen. Ook de potentiaalleidingen moeten bij voorkeur zeer weinig weerstand hebben.

De ingebouwde wijzergalvanometer met spiegelschaal komt overeen met de galvanometer van Wheatstonebrug 2160 G. Voor het beperken van de galvanometeruitslagen in de eerste stadia van de meting is een shuntbankje ingebouwd. Keuze van de gevoeligheid heeft hier plaats door indrukken van de bij deze gevoeligheid behorende drukknopschakelaar. Er zijn drie van deze drukknopschakelaars aanwezig, overeenkomend met verhoudingen in de stroomgevoeligheid van 0,01, 0,1 en 1.

Evenals bij de Wheatstonebrug 2160 G is ook bij de Thomsonbrug 2181 een aansluitmogelijkheid aanwezig voor een externe galvanometer. Met een eenvoudige hefboomschakelaar kan deze galvanometer in plaats van de wijzergalvanometer in de meetkring geschakeld worden. Het shuntbankje blijft hierbij in de schakeling en de reeds genoemde drukknopschakelaars worden op dezelfde wijze gebruikt als bij de ingebouwde galvanometer. Hierdoor is het goed mogelijk, de eerste stadia van een meting te verrichten met de ingebouwde galvanometer en de laatste stadia met een externe galvanometer. Overigens heeft een externe galvanometer slechts zin, wanneer zeer kleine weerstanden zo nauwkeurig mogelijk gemeten moeten worden. Als doelmatige externe galvanometer bevelen wij cat. no. 201 aan.

We merken op, dat kleine weerstanden alleen dan met behoorlijke precisie gemeten kunnen worden, wanneer ze met een vrij sterke stroom belast worden. Immers, de spanningsval door een stroom i in een weerstand R veroorzaakt, is volgens de wet van Ohm gelijk aan iR. Bij kleine waarde van R moet i dus tamelijk groot zijn om de spanningsval langs de weerstand, welke spanningsval bepalend is voor de meetgevoeligheid, een voldoende waarde te geven. Een en ander heeft tengevolge, dat op de laagste twee meetbereiken van Thomsonbrug 2181 een stroom van 10 Ampère voor de meting nodig is. De te gebruiken stroombron moet dus voldoende capaciteit bezitten om een dergelijke belasting te kunnen verdragen.

Bij de brug 2181 zijn enkele stroombegrenzende hulpweerstanden ingebouwd. Deze worden tegelijk met het meetbereik automatisch omgeschakeld. Wanneer aan de batterijklemmen van de brug een stroombron van 2 Volt wordt aangesloten, heeft de meetstroom altijd de juiste waarde. Het is dus niet nodig hieraan bij de metingen apart aandacht te besteden; alle attentie kan dus op de meting geconcentreerd worden. Het werken met de brug 2181 is hierdoor zeer eenvoudig.

Als stroombron kan een accu van 2 V van voldoende capaciteit worden gebruikt. Deze moet vanzelfsprekend het normale onderhoud hebben. Men zal daarom vaak de voorkeur geven aan voeding uit het lichtnet, waarbij nauwelijks enig onderhoud nodig is. Daarom is speciaal voor brug 2181 een netvoedingsapparaat ontwikkeld. Het draagt cat. no. 2182. Een korte beschrijving hiervan geven wij in een volgend hoofdstuk.

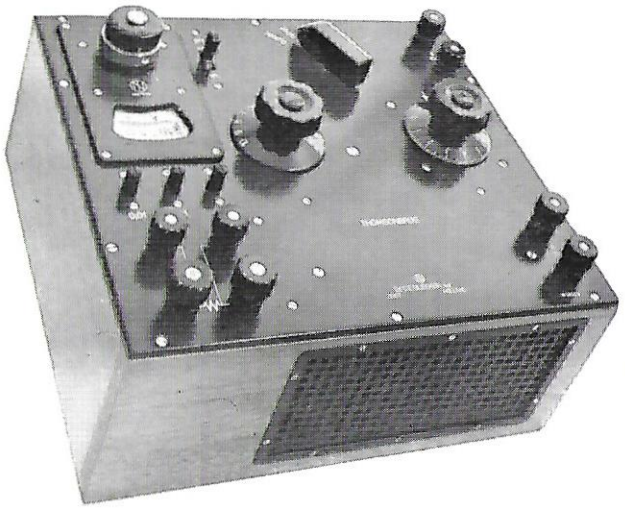

Fig. 11
Thomsonbrug Cat. No. 2181.

De practische uitvoering van Thomsonbrug 2181 is analoog aan die van de weerstandsbanken van de 2100-serie: notenhouten kast met zwart gemoffelde aluminium dekplaat, waartegen het instrument is gemonteerd. De groepering van de bedieningsorganen blijkt uit figuur 11. Men herkent links op de voorgrond de reeds beschreven vier aansluitklemmen voor de te meten weerstand. De wijze van aansluiten wordt door een tussen de klemmen gegraveerd eenvoudig schema verduidelijkt. Achter de klemmen zijn de drie drukknoppen zichtbaar voor het inschakelen van de galvanometer. De knop 0,01 zit links. Links boven ziet men de reeds bij Wheatstonebrug 2160 G uitvoerig beschreven inbouwgalvanometer met er naast de hefboomschakelaar voor het inschakelen van de eventueel te gebruiken externe galvanometer. Deze wordt aangesloten aan de rechts achter zichtbare aansluitklemmen.

Tussen de laatstgenoemde klemmen en de hefboomschakelaar bevindt zich de knop van de meetbereikschakelaar, daarvoor links de knop van de decadeschakelaar, rechts de bedieningsknop van de continu veranderlijke weerstand. Het meetgedeelte is dus op overzichtelijke wijze compact samengebouwd.

Het deel rechts voor in de kast is, zoals blijkt uit de figuur, afgesloten met een rooster. Achter het rooster bevinden zich, afgeschermd van het meetgedeelte, de reeds eerder genoemde begrenzingsweerstanden voor de meetstroom. Daarboven ziet men geheel rechts op de dekplaat van het instrument, de aansluitklemmen voor de stroombron. Een schakelaar voor de meetstroom is niet aanwezig. De stroom is alleen ingeschakeld wanneer een weerstand aan de meetklemmen is aangesloten.

Samenvattend karakteriseren wij Thomsonbrug 2181 als volgt:

1e Zeer eenvoudig te bedienen, gemakkelijk verplaatsbaar instrument.
2e Na verbinding met een stroombron geheel voor gebruik gereed.
3e Ingebouwde robuuste wijzergalvanometer van hoge gevoeligheid, welke is uitgerust met spiegelschaal.

4e Bijzonder practische meetbereikschakelaar.
5e Tussen 0,0001 ohm en 100 ohm aflezingen van het meetresultaat in drie cijfers.
6e Foutgrens kleiner dan 1 ‰.
7e Ingebouwde begrenzingsweerstanden voor de meetstroom, welke bij verandering van meetbereik automatisch worden omgeschakeld.
8e Overzichtelijke opstelling van de bedieningsknoppen.
9e Aansluitmogelijkheid voor externe galvanometer.
10e Het instrument wordt, evenals de meeste andere van onze instrumenten, geleverd met duidelijke en uitvoerige gebruiksaanwijzing.

Cat. no. 2181: Thomsonbrug met inbouwgalvanometer.
Afmetingen: 300 x 265 x 160 mm.
Gewicht: 6,2 kg.

Cat. no. 201: Simplex galvanometer.
Afmetingen: 135 x 115 x 185 mm.
Gewicht: 1,85 kg.

Cat. no. 210: Galvanometeropstelling compleet.

VOEDINGSAPPARAAT VOOR THOMSONBRUG CAT. NO. 2182

De voor de voeding van de Thomsonbrug Cat. No. 2181 benodigde accucel, die stroomsterkten tot 10 Amp. moet kunnen leveren, zoals die voor het meten op de laagste meetbereiken nodig zijn, zal niet altijd ter beschikking staan of in goede conditie verkeren.
Dit heeft ons aanleiding gegeven, een de accu vervangend, aan het net aan te sluiten voedingsapparaat te construeren, dat bovengenoemde accu kan vervangen. Het bestaat uit een passende transformator met voorbelaste, dubbelwerkende gelijkrichter. Het is van drie aansluitklemmen voorzien. De twee uiterste worden voor de laagste twee meetbereiken van de Thomsonbrug gebruikt, die een hoge meetstroom vergen, voor de overige meetbereiken wordt de andere combinatie van twee klemmen gebruikt, zoals op de frontplaat van de voedingsapparaatkast is aangegeven.
Dit laatste stel klemmen is op een ingebouwde spanningsdeler aangesloten, waardoor ook de hogere meetbereiken met de juiste spanning worden gevoed.
Het geheel is ingebouwd in een geperforeerde metalen kast met vertikaal frontpaneel, waarop, behalve de aansluitklemmen, ook een schakelaar in het netgedeelte aanwezig is, alsmede een signaallampje, dat bij ingeschakeld apparaat brandt.

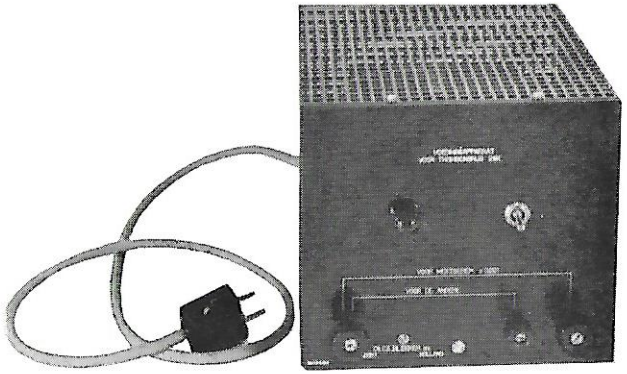

Fig. 12
Voedingsapparaat voor Thomsonbrug Cat. No. 2182.

Aansluiting aan het net geschiedt met behulp van een snoer voorzien van stekker met randaarding.
Het voordeel van het voedingsapparaat boven een accu is, dat het steeds voor gebruik gereed is en in het geheel geen onderhoud vraagt.

Cat. No. 2182: Voedingsapparaat voor Thomsonbrug Cat. No. 2181.
Afmetingen: 205 x 180 x 230 mm.
Gewicht: 5,2 kg.

THOMSONBRUG MET LICHTVLEKGALVANOMETER CAT. NO. 2183

De Thomsonbrug met lichtvlekgalvanometer cat. no. 2183 is een universeel meetinstrument dat met voordeel gebruikt kan worden in zeer veel gevallen, waar voor weerstandsmetingen tot 1000 ohm een groter nauwkeurigheid wordt verlangd dan met de Thomsonbrug 2181 bereikbaar is. De bediening is uiterst eenvoudig, het is voldoende om Thomsonbrug 2183 aan het lichtnet te verbinden om met de metingen te kunnen beginnen. De foutgrens wordt gegarandeerd op 0,5 ‰. De practische uitvoering blijkt uit figuur 13. In tegenstelling tot de gebruikelijke opbouw van onze instrumenten uit de serie 2100 zijn de bedieningsknoppen van Thomsonbrug 2183 aangebracht op een verticaal, zwart gemoffeld aluminium paneel. Geheel links bevinden zich vier aansluitklemmen voor de te meten weerstand, twee zeer zwaar uitgevoerde stroomklemmen en twee wat kleiner gedimensioneerde klemmen voor het aansluiten van de potentiaalleidingen. Naast de stroomklemmen bevindt zich de meetbereikschakelaar, die dezelfde mogelijkheden geeft als de meetbereikschakelaar van de Thomsonbrug 2181, maar bovendien voorzien is van een stand x 100 ohm, waardoor de brug 2183 geschikt is voor het meten van weerstanden tot ruim 1000 ohm. Onder de meetbereikschakelaar zijn de drie drukknopschakelaars voor de galvanometer zichtbaar. Deze corresponderen met galvanometergevoeligheid 0,01, 0,1 en 1. Naast de potentiaalklemmen is een kleine hefboomschakelaar aangebracht, waarmee het instrument kan worden in- en uitgeschakeld. Boven de meetbereikschakelaar ziet men het matglazen scherm met schaalverdeling waarop de lichtvlek van de galvanometer (met een scherpe zwarte index) wordt geprojecteerd. Links van genoemd scherm bevindt zich de galvanometerlantaarn.

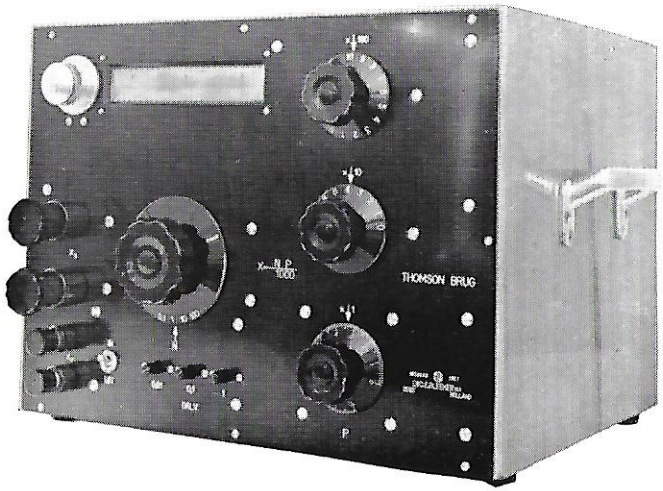

Fig. 13
Thomsonbrug met lichtvlekgalvanometer Cat. No. 2183.

Rechts op het paneel zijn de bedieningsknoppen voor de meetweerstanden aangebracht. Er zijn bij de Thomsonbrug 2183 twee gekoppelde dubbele decaden en een gekoppelde dubbele continu veranderlijke weerstand. Hierdoor kan voor alle weerstandswaarden tussen 0,0001 en 1000 ohm het meetresultaat in vier cijfers worden afgelezen, mits men de gunstigste stand van de meetbereikschakelaar gebruikt. Deze stand kan gevonden worden door een voorlopige meting op het hoogste meetbereik. Aangezien onbeperkt tussen de verschillende meetbereiken kan worden omgeschakeld, neemt een dergelijke voorlopige meting nauwelijks tijd. Men meet met de Thomsonbrug 2183 snel, nauwkeurig en zeer eenvoudig.
De achterzijde van de kast wordt voor een niet onbelangrijk gedeelte ingenomen door het ingebouwde netvoedingsapparaat. Door zorgvuldige opbouw is er voor gezorgd, dat de hier ontwikkelde warmte geen schadelijke invloed op de meetresultaten heeft.
Aangezien de Thomsonbrug 2183 niet aan een vaste plaats gebonden is en overal gebruikt kan worden waar een stevige tafel en een stopcontact aanwezig zijn, is het vervoer vergemakkelijkt door de kast aan beide zijden te voorzien van een solide metalen handgreep.

Samenvattend karakteriseren wij Thomsonbrug 2183 als volgt:

1e Gemakkelijk te bedienen, nauwkeurig meetapparaat voor weerstanden kleiner dan 1100 ohm.
2e Na verbinding met het lichtnet direct voor gebruik gereed.
3e Ingebouwde gevoelige lichtvlekgalvanometer met korte aanwijstijd.
4e Zeer doelmatige meetbereikschakelaar maakt onbeperkt omschakelen van de meetbereiken mogelijk.
5e Foutgrens kleiner dan 0,5 ‰.
6e Tussen 0,0001 ohm en 1000 ohm aflezen van het meetresultaat in vier cijfers.
7e Het instrument wordt geleverd met uitvoerige gebruiksaanwijzing.

Cat. no. 2183: Thomsonbrug met lichtvlekgalvanometer.

Precisie meetbruggen

PRECISIE MEETBRUGGEN SERIE 2000

De precisie meetbruggen, waarvan de Wheatstonebruggen onder cat. no. 2060 zijn samengevat en de Thomsonbrug cat. no. 2080 draagt, zijn instrumenten van zeer hoge nauwkeurigheid en duurzaamheid en van veelzijdige bruikbaarheid. De zeer hoge kwaliteit van deze instrumenten wordt onder andere bereikt door toepassing der speciale schakelaars die voor onze gehele 2000 serie zijn ontwikkeld.

Fig. 14
„2000" schakelaar.

De bijzondere constructie van deze schakelaars, die in onze catalogus „weerstandsbanken" uitvoerig wordt beschreven, garandeert een lage en constante overgangsweerstand van de contacten, vrijwel geheel onafhankelijk van op de schakelaar werkende uitwendige krachten, terwijl het voor deze precisie-instrumenten noodzakelijke onderhoud uiterst eenvoudig is en weinig tijd vordert.
Aan de weerstanden waaruit de meetbruggen van de 2000-serie zijn opgebouwd wordt eveneens veel zorg besteed. Ze worden op doelmatige wijze gewikkeld uit geselecteerd manganin en voor de montage op doeltreffende wijze kunstmatig verouderd. De ijking geschiedt bij deze weerstanden met zeer nauwe toleranties, zodat wij voor de complete instrumenten een foutgrens van 0,2 ‰ kunnen garanderen. Bij aflevering van de meetbruggen zijn de werkelijk aanwezige fouten evenwel aanmerkelijk kleiner dan met de gegarandeerde grens overeenkomt.
We merken op, dat metingen met instrumenten van de onderhavige klasse weliswaar zeer eenvoudig zijn uit te voeren, maar dat enige oplettendheid wordt vereist om de in het meetinstrument aanwezige nauwkeurigheid ook in het meetresultaat te realiseren.
Een eerste vereiste daartoe is temperatuurevenwicht van de gehele meetopstelling. Deze moet men bij voorkeur opstellen in een ruimte van gelijkmatige temperatuur en zorg dragen dat geen eenzijdige verwarming door de zon, een kachel of een radiator kan optreden. Ook het te meten object moet een goed gedefinieerde temperatuur hebben.
Hierbij kunnen over het algemeen twee gevallen onderscheiden worden. In de eerste plaats heeft men dikwijls te maken met weerstanden van materiaal met

een kleine temperatuurcoëfficient. Dan speelt de meettemperatuur geen extreem grote rol en kan noteren van de kamertemperatuur voldoende zijn, wanneer men tenminste de voorzorg neemt het meetobject voldoende tijd te geven om deze temperatuur aan te nemen.
Het kan echter ook voorkomen, dat de temperatuurcoëfficient van de te meten weerstand groot is. Dit is bijvoorbeeld bij weerstandsthermometers het geval. Hierbij spreekt het wel vanzelf, dat dan aan de temperatuur alle aandacht moet worden besteed. Het is echter niet overbodig er op te wijzen, dat ook op de leidingen tussen de weerstand en de meetapparatuur gelet moet worden. We vestigen in dit verband speciaal de aandacht op de brug 2060 C, waarin het voor dit geval zeer belangrijke principe van de driedraadsaansluiting is verwezenlijkt.
Een tweede vereiste voor het verkrijgen van optimale resultaten is het voorkomen van lekstromen door zorg te dragen voor goede isolatie van de gehele bij de meting betrokken apparatuur. Het blijkt, dat isolatiefouten van de voor de metingen gebruikte stroombron veel vaker voorkomen dan men geneigd is aan te nemen. Wanneer dan bovendien het meetobject niet bijzonder goed is geïsoleerd, kunnen de meest onverwachte verschijnselen optreden.
Over de invloed van thermokrachten is reeds bij de bespreking van Wheatstonebrug 2160 het nodige gezegd. We merken op, dat bij de meetbruggen van de 2000 serie roodkoperen aansluitklemmen zijn toegepast, waardoor een aantal mogelijkheden voor het optreden van thermokrachten is geëlimineerd. We raden in dit verband aan de leidingen te voorzien van roodkoperen kabelschoenen.
Een veel gebruikte methode om de invloed van thermokrachten uit te schakelen is het commuteren van de meetstroom. Voor metingen waaraan hoge eisen worden gesteld is dit altijd aan te bevelen, zelfs wanneer met de Wheatstonebruggen gemeten wordt op de vroeger aangegeven wijze. Men heeft dan een extra controle in het feit, dat het meetresultaat niet mag afhangen van de poling waarmee de stroombron aan de brug wordt verbonden. Treden belangrijke verschillen op, dan wijst dit op storingen, die bijvoorbeeld door isolatiefouten veroorzaakt kunnen worden.
Als nulpuntsindicator bij metingen met de onderhavige apparatuur kan verreweg het best een goede, aan het doel aangepaste spiegelgalvanometer worden gebruikt. Het gebruik van een electronische nulindicator geeft in veel gevallen aanleiding tot moeilijk te achterhalen storingen en moet ten sterkste worden afgeraden.
Op één groep gevallen waarbij de nauwkeurigheid van het instrument zich in het resultaat niet laat realiseren moeten we nog kort de aandacht vestigen. Het komt niet zelden voor, dat het te meten object niet met de nagestreefde nauwkeurigheid gedefinieerd is. We noemen bijvoorbeeld hoge weerstanden die niet bijzonder goed zijn geïsoleerd of ook wel lagere weerstanden waarvan de isolatie wat hygroscopisch is. In extreme gevallen kan het dan voorkomen, dat het evenwicht van de brug niet stabiel is en zelfs, dat een eindwaarde die na enige tijd is bereikt bij commuteren van de meetstroom volkomen verloren gaat. Het spreekt vanzelf, dat men in zulke gevallen noodgedwongen met een kleinere nauwkeurigheid genoegen zal moeten nemen.

PRECISIE WHEATSTONEBRUG MET VIER DECADEN CAT. NO. 2060 A

De Wheatstonebrug met vier decaden, cat. no. 2060 A, is een zeer nauwkeurig meetinstrument. In combinatie met een geschikte galvanometer, opgesteld in een ruimte van gelijkmatige temperatuur, geeft het een meetopstelling waarmee alle voor meting met een Wheatstonebrug in aanmerking komende weerstanden tot een maximum van ruim 11 megohm met grote precisie gemeten kunnen worden.
De schakeling komt geheel overeen met het in figuur 4 gegeven schema van de Wheatstonebrug cat. no. 2160. Voor de mogelijkheden die met brug 2060 geboden worden geldt derhalve geheel wat wij over de brug 2160 hebben opgemerkt. De nauwkeurigheid van het resultaat is bij de brug 2060 echter belangrijk groter, want de gegarandeerde foutgrens is 0,2 ‰.
Om de genoemde nauwkeurigheid in de metingen te kunnen realiseren moet een galvanometer van voldoende gevoeligheid worden gebruikt. Voor weerstanden tot circa 10000 ohm is de reeds bij brug 2160 genoemde Simplex-galvanometer cat. no. 201 goed bruikbaar. Deze heeft het grote voordeel van een zeer korte aanwijstijd, waardoor snel gemeten kan worden. Met een stroombron van bijv. 4 volt aan de batterijklemmen van de brug is de aanwijsnauwkeurigheid van de galvanometer tot ongeveer de genoemde grens voldoende groot.
Voor het meten van weerstanden groter dan 10000 ohm is galvanometer 201 niet meer voldoende stroomgevoelig, zich hierin uitend, dat de juiste stand in de laagste meetdecade niet meer met zekerheid is vast te stellen. Wanneer zulke metingen zelden voorkomen, kan men zich helpen door voor de meting een hogere spanning te gebruiken. Wanneer men zorg draagt, P niet kleiner te kiezen dan 1000 ohm en ook in de decadeweerstanden minstens 1000 ohm ingeschakeld houdt, mag men tot 10 volt aan de batterijklemmen aansluiten. Men kan de uitslagen dan nog verdubbelen door in de batterijkring een commutator aan te brengen. Het zal echter vaak nodig zijn, bij het commuteren de galvanometer uit te schakelen in verband met optredende stroomstoten tengevolge van de eigen capaciteit of zelfinductie van het meetobject.
Wanneer de brug regelmatig gebruikt moet worden voor het meten van hoge weerstanden is het beter een hiervoor speciaal geschikte galvanometer aan te schaffen. Er zijn hier verschillende mogelijkheden en het loont de moeite om onder nauwkeurige omschrijving van het verlangde meetbereik ons advies over de te gebruiken galvanometer in te winnen.
De uitvoering van de brug 2060 A komt overeen met de in de 2000 serie gebruikelijke. De decadeschakelaars zijn gemonteerd op platen hoogwaardig isolatiemateriaal welke zijn vastgeschroefd aan een metalen raamwerk. Dit raamwerk draagt ook de benodigde roodkoperen aansluitklemmen. Het is gemonteerd in een fraaie mahoniehouten kast, zodanig dat de aansluitklemmen zijdelings uitsteken, zoals dat in figuur 15 zichtbaar is.
Door het raam met de isolatieplaten is de kast van binnen verdeeld in twee boven elkaar liggende afdelingen. De onderste afdeling bevat de weerstanden,

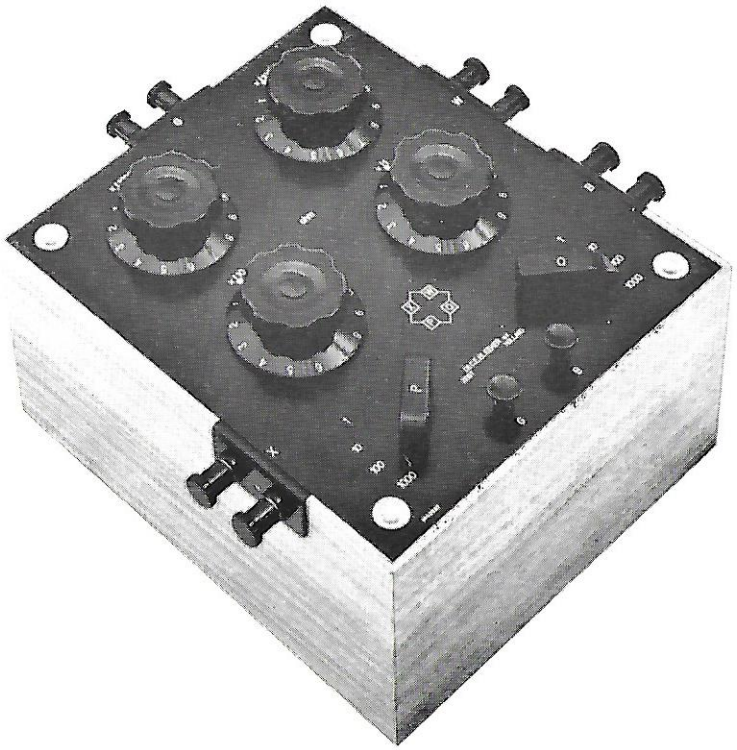

Fig. 15
Wheatstonebrug Cat. No. 2060 A.

de bovenste afdeling de schakelcontacten. Deze bovenste afdeling is van boven afgesloten met een zwart gemoffelde aluminium dekplaat, waardoor de assen van de schakelaars naar boven uitsteken. Doordat de bedieningsknoppen van de schakelaars eenvoudig kunnen worden afgenomen, kan de dekplaat gemakkelijk worden verwijderd wanneer dit voor een eventuele onderhoudsbeurt van de schakelaars (ongeveer eens per jaar) nodig is.
Uit de figuur blijkt verder, dat de opbouw van de brug 2060 A zeer veel overeenkomst vertoont met het in fig. 5 afgebeelde bovenaanzicht van brug 2160. De brug 2060 A is nog voorzien van een extra paar aansluitklemmen, voorzien van de gravering W. Deze klemmen zijn verbonden met de einden van de meetweerstand, zodat men direct hiermee de beschikking heeft over een zeer nauwkeurige vier decaden weerstandsbank.

Samenvattend karakteriseren wij de Wheatstonebrug cat. no. 2060 A als volgt:

1e Zeer nauwkeurig, universeel bruikbaar instrument.
2e Groot meetbereik, tussen 1 ohm en 10 megohm, aflezing van het resultaat in vier cijfers.
3e Foutgrens kleiner dan 0,2 ‰.
4e Overzichtelijke opstelling van de bedieningsknoppen.
5e Onafhankelijke schakelaars voor stroombron en galvanometer.
6e Door afzonderlijke klemmen bruikbaar als decadebank.

Cat. no. 2060 A: Precisie Wheatstonebrug met 4 decaden.
Afmetingen: 400 x 350 x 195 mm.
Gewicht: 11 kg.

Cat. no. 201: Simplex galvanometer.
Afmetingen: 135 x 115 x 185 mm.
Gewicht: 1,85 kg.

Cat. no. 210: Galvanometeropstelling compleet.

Cat. no. 401: Shuntbankje bij galvanometer 201.
Afmetingen: 120 mm ∅ x 90 mm.
Gewicht: 1 kg.

PRECISIE WHEATSTONEBRUG MET 5 DECADEN CAT. NO. 2060 B

De Wheatstonebrug met vijf decaden, cat. no. 2060 B, komt in velerlei opzicht overeen met Wheatstonebrug 2060 A, maar de bruikbaarheid voor metingen van zeer hoge precisie is bij de brug 2060 B groter gemaakt door de meetweerstand op te bouwen uit vijf decaden, namelijk 10 x 1000, 10 x 100, 10 x 10, 10 x 1 en 10 x 0,1 ohm. Het meetbereik is hierdoor niet veranderd, maar wel is erdoor bereikt, dat het meetresultaat over het algemeen direct in vijf cijfers kan worden afgelezen.
We merken hierbij op, dat aflezen van het resultaat in vijf cijfers bij bruggen van de 2000 serie in veel gevallen zinvol is, hoewel een verschil van één eenheid van het laatste cijfer steeds aanmerkelijk kleiner is dan de gegarandeerde foutgrens van 0,2 ‰. Immers bij aflezen van vier cijfers komt de nauwkeurigheid van het instrument pas tot uitdrukking in het resultaat, wanneer het eerste cijfer hiervan vijf is of meer.
Van veel belang is het aflezen van meer cijfers wanneer het onderlinge verschil van twee weerstanden nauwkeurig gemeten moet worden. Wanneer hierbij enige voorzorgen worden genomen kan ook in de waarde van het verschil de volle nauwkeurigheid van de bank worden gerealiseerd, zelfs wanneer dit verschil bijvoorbeeld slechts ongeveer 10 % van de gemeten weerstanden bedraagt. Bij metingen van deze soort is het waardevol om over vijf decaden te beschikken omdat men anders genoodzaakt is, zeer zorgvuldig te interpoleren.
Een speciaal geval van verschilmetingen is het meten van temperaturen met behulp van weerstandsthermometers. Hierbij geldt het voorgaande wel in bijzondere mate wanneer kleine temperatuurverschillen nauwkeurig bepaald moeten worden. Voor de methodiek van de meting en de te gebruiken galvanometer verwijzen wij naar hetgeen daaromtrent bij Wheatstonebrug 2060 A is opgemerkt.
De uitvoering van de brug 2060 B komt geheel overeen met die van de brug 2060 A. De bedieningsknop van de vijfde decade is aangebracht tussen de knoppen voor de vergelijkweerstanden, zoals blijkt uit figuur 16, waar de geheel overeenkomstig uitgevoerde brug 2060 C is afgebeeld.

Samenvattend karakteriseren wij de Wheatstonebrug cat. no. 2060 B als volgt:

1e Zeer nauwkeurig, universeel bruikbaar instrument.
2e Groot meetbereik. Tussen 1 ohm en 10 megohm aflezing van het resultaat in vijf cijfers.
3e Foutgrens kleiner dan 0,2 ‰.
4e Door grote afleesnauwkeurigheid zeer doelmatig voor het meten van weerstandsverschillen.
5e Overzichtelijke opstelling van de bedieningsknoppen.
6e Onafhankelijke schakelaars voor stroombron en galvanometer.
7e Door afzonderlijke klemmen bruikbaar als decadebank.

Cat. no. 2060 B: Precisie Wheatstonebrug met 5 decaden.
Afmetingen: 400 x 350 x 195 mm.
Gewicht: 12,5 kg.

Cat. no. 201: Simplex galvanometer.
Afmetingen: 135 x 115 x 185 mm.
Gewicht: 1,85 kg.

Cat. no. 210: Galvanometeropstelling compleet.

Cat. no. 401: Shuntbankje bij galvanometer 201.
Afmetingen: 120 mm Ø x 90 mm.
Gewicht: 1 kg.

PRECISIE WHEATSTONEBRUG VOOR DRIEDRAADSAANSLUITING CAT. NO. 2060 C

De Wheatstonebrug cat. no. 2060 C is geheel gelijk aan de brug 2060 B, behalve de aanwezigheid van drie aansluitklemmen voor de te meten weerstand. Zoals blijkt uit figuur 16 kunnen twee van deze klemmen door een roodkoperen verbindingsplaat worden verbonden. De brug is in dat geval in electrisch opzicht gelijk aan de brug 2060 B. Men kan er dan alle metingen mee verrichten die met laatstgenoemde brug kunnen worden uitgevoerd en met dezelfde nauwkeurigheid. Maakt men de verbindingsplaat los, dan is de brug 2060 C geschikt voor metingen volgens de driedraadsmethode, waarvan de schakeling in figuur 2 is voorgesteld. Zoals we reeds hebben opgemerkt, is deze meetmethode uiterst belangrijk in alle gevallen waar leidingen van niet te verwaarlozen weerstand tussen het te meten object en de meetopstelling moeten worden aangebracht.

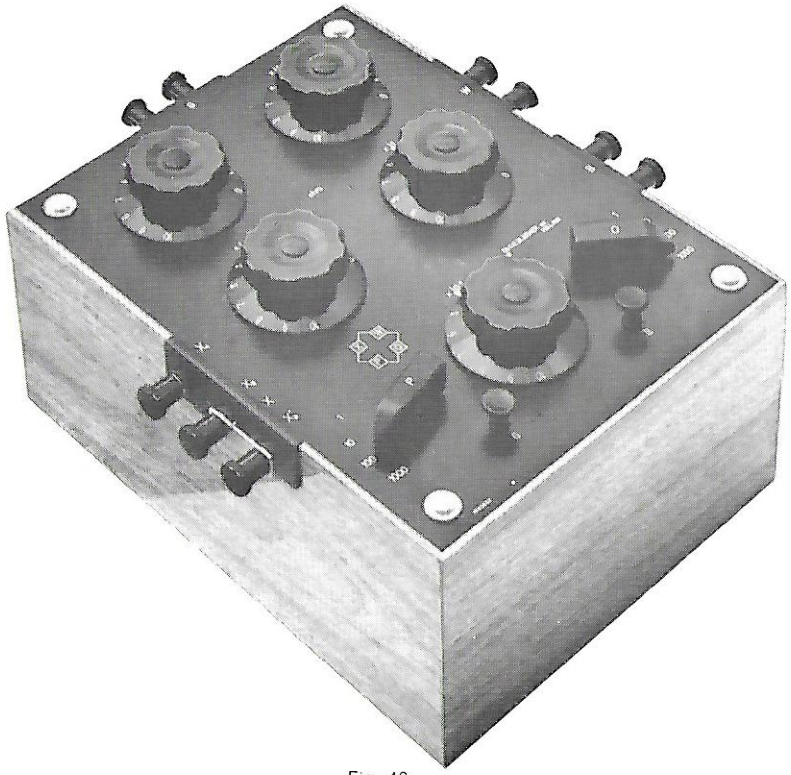

Fig. 16
Wheatstonebrug Cat. No. 2060 C.

Met name zijn door de driedraadsmethode temperatuurmetingen met weerstandsthermometers mogelijk op plaatsen waar een nauwkeurige meetopstelling moeilijk kan worden opgesteld. We merken echter met nadruk op, dat metingen volgens de driedraadsmethode alléén goede resultaten geven wanneer de vergelijkweerstanden P en Q van de Wheatstonebrug aan elkaar gelijk zijn, dus wanneer de brugverhouding gelijk is aan één. Voorts is van belang, dat de verbindingsleidingen onderling gelijk zijn, en dat ze met zorg zijn geïsoleerd.

Cat. no. 2060 C: Precisie Wheatstonebrug voor driedraadsaansluiting.
Afmetingen: 400 x 350 x 195 mm.
Gewicht: 12,5 kg.

Cat. no. 201: Simplex galvanometer.
Afmetingen: 135 x 115 x 185 mm.
Gewicht: 1,85 kg.

Cat. no. 210: Galvanometeropstelling compleet.

Cat. no. 401: Shuntbankje bij galvanometer 201.
Afmetingen: 120 mm Ø x 90 mm.
Gewicht: 1 kg.

PRECISIE THOMSONBRUG CAT. NO. 2080

De Thomsonbrug cat. no. 2080 is een veelzijdig precisieinstrument voor het vergelijken van zowel zeer kleine als ook grotere weerstanden. In combinatie met een geschikte galvanometer en één of meer goed bekende standaardweerstanden geeft het een meetopstelling, waarmee op even eenvoudige wijze als met een Wheatstonebrug, maar met aanzienlijk grotere nauwkeurigheid, weerstandsmetingen verricht kunnen worden. Hierbij bepaalt de keuze van de reeds genoemde standaardweerstanden het beschikbare meetbereik. A priori geldt hiervoor geen enkele beperking. Uitsluitend practische overwegingen geven een zekere begrenzing van het gebied waarbinnen de Thomsonbrug voor metingen bruikbaar is.

Van veel belang is, dat in het gebied van lage en zeer lage weerstanden de nauwkeurigheid van de meting niet wordt begrensd door de absolute waarde van de te meten weerstanden. Men moet alleen vasthouden aan de voor alle metingen met lage weerstanden geldende eis, dat ze bij de metingen door een stroom van zodanige sterkte worden doorlopen, dat een redelijk potentiaalverschil tussen hun potentiaalaansluitingen optreedt. In veel gevallen is een bruikbare waarde voor dit potentiaalverschil ca. 0,03 V. Een weerstand van 0,001 ohm moet daartoe met 30 Amp. belast worden en heeft dan een dissipatie van 0,3 Watt, een weerstand van 0,0001 ohm echter moet hiertoe met 300 Amp. worden belast en heeft dan een dissipatie van 3 Watt. In het laatstgenoemde geval zullen een aantal bijzondere maatregelen nodig zijn om de vrijkomende warmte zo snel af te voeren, dat de weerstanden een goed gedefiniëerde temperatuur behouden; de bereikbare nauwkeurigheid is echter even groot als bij het meten van grotere weerstanden. Ten overvloede wijzen wij er op, dat de brugweerstanden bij deze metingen weinig worden belast, mits men zorg draagt dat de verbinding EG in figuur 3 een lage weerstand heeft.

Nog lagere weerstanden dan de genoemde 0,0001 ohm kunnen eveneens gemeten worden, maar men moet dan wel zeer sterke stromen gebruiken en de dissipatie in de weerstanden neemt evenredig toe. Het wordt dan steeds moeilijker de temperatuur van de weerstanden met de vereiste nauwkeurigheid gedefinieerd te houden. Dit is echter een practisch bezwaar, dat inhaerent is aan elke methode voor het meten van lage weerstanden, en dat met juiste keuze van de technische hulpmiddelen zo nodig overwonnen kan worden.

Bij het meten van hoge weerstanden levert de belastbaarheid van de brugweerstanden een beperking op. Het is in dit verband raadzaam, het potentiaalverval langs de som van de te vergelijken weerstanden te beperken tot hoogstens 1 Volt. Dit heeft tengevolge, dat voor weerstanden groter dan ongeveer 10000 ohm de meetgevoeligheid wat klein wordt, tenzij men een speciale galvanometer gebruikt. Tegen deze oplossing is overigens geen bezwaar, het meetprogramma van de opstelling zal in de practijk de doorslag moeten geven of het zin heeft, de Thomsonbrug met een extra galvanometer voor het meten van hoge weerstanden uit te rusten, of dat het de voorkeur verdient voor dit doel een Wheatstonebrug aan te schaffen.

De schakeling van de Thomsonbrug 2080 komt overeen met het in figuur 3 gegeven schema, met dien verstande, dat in de bank alléén de beide takken P en de beide takken Q zijn ingebouwd. Van bijzondere betekenis is, dat door het gebruik van dubbele schakelaars automatisch beide weerstanden P steeds onderling gelijk zijn en dat hetzelfde geldt voor beide weerstanden Q. Hierdoor kan met de Thomsonbrug snel en zonder fouten worden gemeten.
De weerstand R en de weerstand X worden buiten de bank in een stroomkring opgenomen en alleen hun potentiaalklemmen worden door middel van leidingen met lage weerstand met de bank verbonden. Door deze maatregel is bereikt, dat geen enkele zwaar belaste weerstand in de bank aanwezig is en door ongelijkmatige verwarming van de brugweerstanden de nauwkeurigheid van het meetresultaat ongunstig zou kunnen beïnvloeden. Het spreekt wel vanzelf, dat bij gebruik ook verder de omstandigheden zodanig gekozen moeten worden, dat ongelijkmatige verwarming en grote temperatuurverschillen zo goed mogelijk vermeden worden.

Teneinde een groot meetbereik met een klein aantal vergelijkweerstanden te verkrijgen, is de brugverhouding op verscheidene wijzen instelbaar. Daartoe kan men met een daarvoor aanwezige schakelaar de weerstanden Q, als aangegeven in figuur 3, de waarden 10-20-50-100-200-500 en 1000 ohm geven. De weerstanden P volgens het schema zijn in werkelijkheid 4 dubbeldecaden van 2 x 10 x (0,1, 1, 10 en 100) ohm. Met de beschreven inrichting kan men, alle vier decaden gebruikend, weerstanden meten van waarden die tussen 0,1 van en 111 maal de waarde van de gebruikte standaardweerstand liggen. Het aantal mogelijkheden voor weerstanden er boven is groter, daar het dikwijls toelaatbaar is het proefobject relatief zwaarder te belasten dan de standaard. Hierdoor is in dergelijke gevallen een wat betere gevoeligheid bereikbaar.
De Thomsonbrug cat. no. 2080 is gebouwd met het doel, daarmee zeer nauwkeurige metingen te verrichten. Teneinde de cijfers waaruit het meetresultaat zal bestaan zoveel mogelijk door directe aflezing en zo weinig mogelijk door interpolatie te verkrijgen, moet de meting zo worden ingericht, dat alle vier decaden worden gebruikt. Dit impliceert, dat van de hoogste decade dus tenminste één weerstand in gebruik zal moeten zijn.
Dit inzicht heeft ertoe geleid, dat wij de 0-stand voor de hoogste decade geheel weggelaten hebben. Dit gaf drieërlei voordeel:

1e Men moet nu beslist alle vier decaden gebruiken.

2e De zgn. nulweerstand van het decadendeel kan nu worden ingeijkt. Daar behoeft dus nooit een correctie voor te worden aangebracht.

3e De drie lagere decaden kunnen nu met —1 standen worden uitgerust. Dit blijkt in de praktijk een groot voordeel, daar bij het instellen veel minder manipuleren der decadenschakelaars nodig is. Immers, de stap onder de nul wordt nu verkregen door de betreffende schakelaar 1 stap terug te draaien. Is de —1 stand niet aanwezig, dan moet men om hetzelfde resultaat te bereiken de naast hogere decade 1 stand terugdraaien en de in beschouwing zijnde, 9 stappen hoger.

De ijknauwkeurigheid van Thomsonbrug 2080 wordt door ons gegarandeerd op 0,1 ‰. De bijzonder gunstige eigenschappen van contact- en borstelconstructie der schakelaars laten deze geringe tolerantie zonder meer toe, terwijl ook de buitengewone vrijheid van thermostoringen in deze schakelaars tot dit doel bijdraagt.
Om thermospanningen ook in het verdere apparaat als storingsbron te elimineren, zijn o.a. alleen roodkoperen aansluitklemmen gebruikt.
We merken hierbij nog op, dat de instrumenten bij aflevering zelfs nog aanmerkelijk kleinere fouten vertonen dan met de gegarandeerde foutgrens overeenkomt.
De uitvoering van de in fig. 17 afgebeelde Thomsonbrug 2080 komt in het algemeen overeen met die van de reeds beschreven Wheatstonebrug 2060. Schakelaars en weerstanden zijn gemonteerd op een raamwerk, dat bevestigd is in een mahoniehouten kast. Deze kast is van boven afgesloten door een zwart gemoffelde aluminium dekplaat, waarboven de bedieningsknoppen uitsteken. De schakelknop voor de vergelijkweerstanden Q bevindt zich links vooraan. Rechts er van is de drukknopschakelaar voor de galvanometer gemonteerd. De

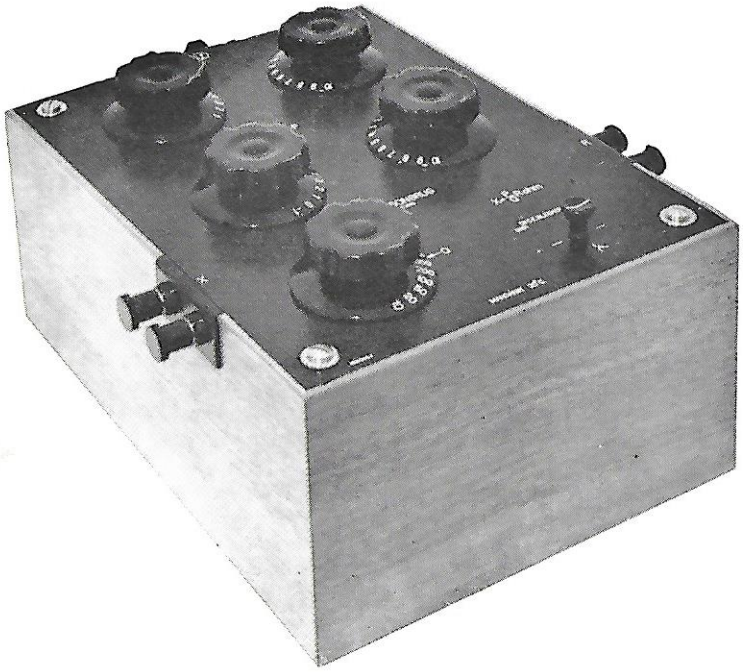

Fig. 17
Thomsonbrug Cat. No. 2080.

vier dubbele meetdecaden van de weerstanden P worden bediend door de vier overige in de figuur zichtbare knoppen. Knoppen en dekplaat kunnen zeer gemakkelijk worden afgenomen wanneer dit (ongeveer eens per jaar) voor een schoonmaakbeurt van de schakelaars noodzakelijk is.

Zoals blijkt uit de figuur is de bank 2080 voorzien van drie paar aansluitklemmen. Het achterste paar dient voor aansluiting van de galvanometer, met de andere paren worden de potentiaalleidingen van de te vergelijken weerstanden verbonden. Op de dekplaat is door een ingegraveerde eenvoudige formule aangegeven op welke wijze uit de afgelezen waarden van P en Q en de bekende waarde van R de onbekende weerstand moet worden berekend.

Bij onze beschrijving van de Thomsonbrug kan een korte beschouwing van de daarbij noodzakelijke hulpapparatuur niet ontbreken.

In dit verband allereerst een en ander over de te gebruiken standaardweerstanden R. Hiervoor zal men in veel gevallen de voorkeur geven aan normaalweerstanden. Het grote voordeel hiervan is, dat door het bij deze weerstanden geleverde ijkcertificaat hun waarde zo goed bekend is, dat hierdoor geen noemenswaardige onzekerheid in de metingen wordt geïntroduceerd. Bij het meten van zeer kleine weerstanden heeft men als tweede voordeel de mogelijkheid, normaalweerstanden in een petroleumbad te plaatsen, waardoor de belastbaarheid ongeveer tien maal wordt vergroot. Voor nadere bijzonderheden zie men onze desbetreffende catalogus.

We merken op, dat bij metingen met een Thomsonbrug in kritieke gevallen met veel voordeel de methode kan worden gevolgd, een voorlopige instelling uit te voeren met een verminderde belasting van de weerstanden en alleen bij de definitieve instelling de stroom gedurende korte tijd zijn volle waarde te geven. De eventuele onzekerheid door verwarming van de weerstanden wordt hierdoor vele malen verkleind.

Voor gebruik bij Thomsonbrug 2080 hebben wij een speciale spiegelgalvanometer ontwikkeld. Deze heeft cat. no. 204. Zoals steeds hebben wij de verschillende strijdige eisen die aan een dergelijk instrument worden gesteld door veel practijkproeven zo goed mogelijk in harmonie gebracht. Het instrument heeft een slingertijd van slechts 3 seconden, de gunstige aperiodische grensweerstand van ongeveer 50 ohm en het geeft een uitslag van 1 mm bij één meter schaalafstand voor 5 x 10^{-9} A. Bij critische demping komt dit overeen met een spanning van 3,5 microvolt.

Wanneer men overweegt, dat bij het meten van kleine weerstanden een spanningsval per weerstand van 10000 maal dit bedrag ruim voldoende is voor metingen tot op 0,1 ‰, dan komt men tot een spanning van 0,035 Volt per weerstand. Men heeft daarmee een afleesgevoeligheid die in staat stelt de nauwkeurigheid van de bank geheel te benutten.

Samenvattend karakteriseren wij de Thomsonbrug cat. no. 2080 als volgt:

1e Zeer nauwkeurige, gemakkelijk te bedienen meetbrug voor het vergelijken van weerstanden.
2e Foutgrens kleiner dan 0,1 ‰.

3e Directe aflezing van het meetresultaat in vier cijfers.
4e Gunstig gekozen waarden van de weerstanden Q geven een meetbereik van 0,1 tot 111 maal de vergelijkweerstand.
5e Tijdbesparende —1 standen aan drie van de meetdecaden.
6e Overzichtelijke opstelling van de bedieningsknoppen.
7e Ingeijkte nulweerstanden maken een aantal correcties overbodig.
8e Het instrument wordt geleverd met overzichtelijke, uitvoerige gebruiksaanwijzing.
9e Gemakkelijk onderhoud.

Cat. no. 2080:	Precisie Thomsonbrug. Afmetingen: 420 x 350 x 210 mm. Gewicht: 15 kg.
Cat. no. 204:	Galvanometer bij Thomsonbrug. Afmetingen: 135 x 115 x 185 mm. Gewicht: 1,85 kg.
Cat. no. 210:	Galvanometeropstelling compleet.
Cat. no. 402:	Shuntbankje bij galvanometer 204. Afmetingen: 120 mm ∅ x 90 mm. Gewicht: 1 kg.

PRECISIE THOMSONBRUG MET VIJF DECADEN CAT. NO. 2082

De grote nauwkeurigheid der weerstanden en de uitstekende reproduceerbaarheid der schakelaars, die in onze 2000-serie gebruikt worden, komen tot uiting in de foutgrens van 0,1 ‰, die wij voor onze precisie-Thomsonbruggen kunnen garanderen. Om evenwel de hierdoor gegeven mogelijkheden geheel te kunnen benutten zal bij gebruik van een meetbank met 4 decaden niet zelden interpolatie van een vijfde cijfer zinvol en nodig zijn. Deze overweging heeft geleid tot het ontwerp van de Thomsonbrug cat. no. 2082, waarvan de beide weerstanden P elk bestaan uit 5 decaden, namelijk 10 x (0,01, 0,1, 1, 10 en 100) ohm. Zoals bij de brug cat. no. 2080 reeds uitvoerig is beschreven, is de verstelling van de weerstanden gekoppeld, zodat beide takken P automatisch steeds aan elkaar gelijk zijn.

De uitvoering der bruggen 2080 en 2082 is verder geheel analoog, het enige verschil is de toevoeging van een dubbele decade 10 x 0,01 ohm, die is uitgevoerd als shuntdecade. Hierdoor zijn een aantal ongewenste verschijnselen, die bij gebruik van lage weerstanden in decadeschakelingen kunnen optreden, vermeden. Evenals de dubbeldecaden 10 x (0,1, 1 en 10) ohm is ook de dubbeldecade 10 x 0,01 ohm voorzien van een —1 contact. Om de vroeger uiteengezette redenen begint decade 10 x 100 ohm met het contact +1.

Samenvattend karakteriseren wij Thomsonbrug cat. no. 2082 als volgt:

1e Zeer nauwkeurige, gemakkelijk te bedienen meetbrug voor het vergelijken van weerstanden.
2e Foutgrens kleiner dan 0,1 ‰.
3e Directe aflezing van het meetresultaat in vijf cijfers.
4e Gunstig gekozen waarden van de weerstanden Q geven een meetbereik van 0,1 tot 111 maal de vergelijkweerstand.
5e Tijdbesparende —1 standen aan vier van de meetdecaden.
6e Overzichtelijke opstelling van de bedieningsknoppen.
7e Ingeijkte nulweerstanden maken een aantal correcties overbodig.
8e Het instrument wordt geleverd met overzichtelijke uitvoerige gebruiksaanwijzing.
9e Gemakkelijk onderhoud.

Cat. no. 2082: Precisie Thomsonbrug met vijf decaden.
Afmetingen: 420 x 350 x 210 mm.
Gewicht: 17,5 kg.

Cat. no. 204: Galvanometer bij Thomsonbrug.
Afmetingen: 135 x 115 x 185 mm.
Gewicht: 1,85 kg.

Cat. no. 210: Galvanometeropstelling compleet.

Cat. no. 402: Shuntbankje bij galvanometer cat. no. 204.
Afmetingen: 120 mm Ø x 90 mm.
Gewicht: 1 kg.