

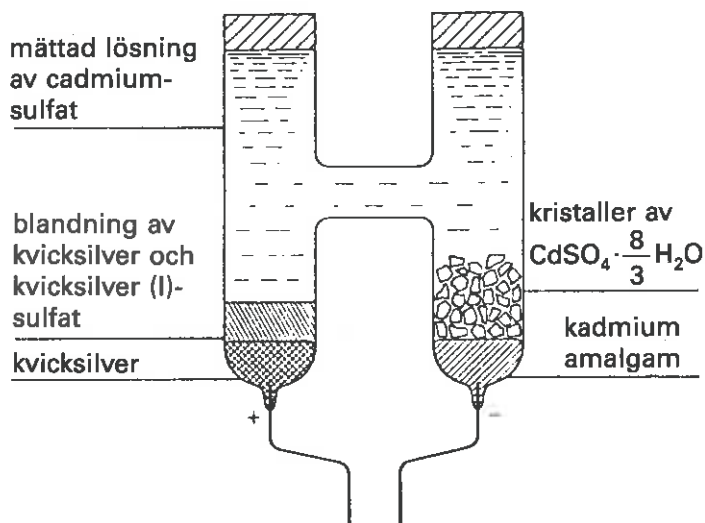
Säkrare volt och ohm

BIPM Bureau International des
Poids et Mesures
CIPM Comité International des
Poids et Mesures

Att mäta är stort, att mäta rätt är större. Med detta menar vi att vi måste mäta i överenskomna enheter. För den sakens skull finns sedan 1875 en internationell organisation BIPM med säte i Sèvres utanför Paris, som har till uppgift att fastställa och övervaka det internationella enhetssystemet Le Système International d'Unités (SI). SI innehåller såväl definierade som härledda enheter. Inom elektricitetsläran är strömenheten (ampere) definierad medan enheterna för spänning (volt) och resistans (ohm) är härledda. Definitionen av ampere utgående från kraftverkan mellan två parallella oändligt långa raka ledare med försumbart cirkulärt tvärsnitt kan uppenbarligen ej användas i en verklig mätsituation. Genom att mäta spänningen över en resistans och utnyttja Ohms lag kan strömstyrkan bestämmas experimentellt.

Dagens spänningsnormaler

Den vanligaste normalen för att säkerställa spänningseenheten (1 V) är normalelementet eller westoncellen (fig 1). Om tillverkningen sker under mycket rena förhållanden med kemikalier av högsta kvalitet kan man få spänningsnormaler med hög stabilitet och en årlig drift som är

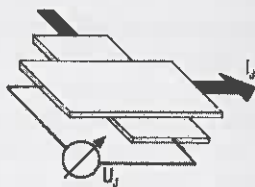


Figur 1. Normalelement av Westontyp med mättad elektrolyt.

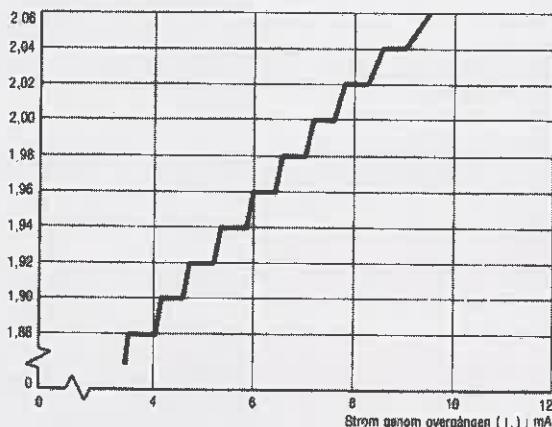
JOSEPHSONEFFEKTEN

En Josephsonövergång består av två supraledare åtskilda av ett tunt isolerande skikt. Då övergången bestrålas med en mikrovågsfrekvens uppstår spänningsnivåer över övergången.

Spänningsnivåerna är åtskilda med $\Delta U = h/2e \cdot f$ där h är Plancks konstant, e elektronladdning och f mikrovågens frekvens.



Spänning (U_J) över Josephsonövergång i mV



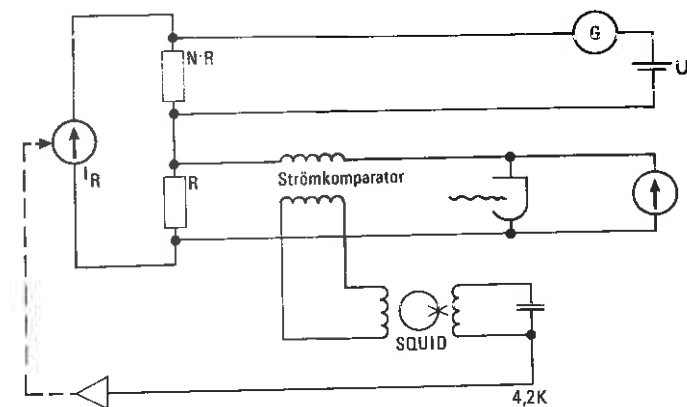
Då en Josephsonövergång bestrålas med mikrovågsstrålning uppstår kvantiserade nivåer, steg, i kurvan över förhållandet mellan spänning och ström. De stegen används för att bestämma enheten 1 volt.

mindre än $0,2 \mu\text{V}$. Normalelementet har dock en mängd brister som att temperaturberoendet är stort, de tål inget strömottag och de klarar transporter dåligt. På senare år har man lyckats tillverka zenerreferenser som är bättre än normalelementen i alla avseenden utom vad avser stabiliteten där normalelementen fortfarande är bäst.

Josephsoneffekten som spänningsnormal

En Josephsonövergång består av två supraledare åtskilda av ett tunt isolerskikt (se faktaruta). Om spänningen är U mellan de båda supraledarna förlorar varje elektronpar, Cooperpar, som tunnlar genom isolerskiktet, energin $2 \cdot e \cdot U$ där e är elektronladdningen. Denna energi strålar ut med energin $h \cdot \nu$ (h Plancks konstant och ν frekvensen), dvs $2eU = h\nu$. Vi har med andra ord en ytterst noggrann spänning-frekvensomvandlare.

Om man istället bestrålar övergången med frekvensen ν , fås en spänning som är proportionell mot grundfrekvensen eller någon av dess övertoner. Vi har nu grundprincipen för en spänningsreferens som utnyttjar Josephsoneffekten.



Figur 2. Mätupställning för att kalibrera ett normalelement med Josephsoneffekten.

Mätförfarande

Bestrålningens frekvens är normalt i storleksordningen 10 GHz och genom att använda ett så högt n som möjligt blir utspänningen typiskt 2–3 mV. Jämförelser med normalelement vid spänningsnivån 1 V kräver någon form av spänningsdelning (fig 2). Spänningsdelarens delningsförhållande är av väsentlig betydelse för själva spänningsmätningen och mätproceduren både inleds och avslutas med en bestämning av delningsförhållandet. För att öka systemets prestanda används en kryogen strömkomparator och en SQUID (Superconducting Quantum Interference Device). Delningsförhållandet bestäms genom att koppla om resistorerna (NR och R) i en bryggkoppling och genom att utnyttja två extra lindningar hos strömkomparatorn vars lindningsvarv förhåller sig som $N:1$. Vid spänningsmätningen regleras I_R så att galvanometern G visar noll. Därefter väljs lämpligt spänningssteg och slutligen finjusteras mikrovågsfrekvensen tills utsignalen från SQUIDen är noll. För att eliminera inverkan av termoemk ändras strömriktningen I_R och dessutom polvänds galvanometern.

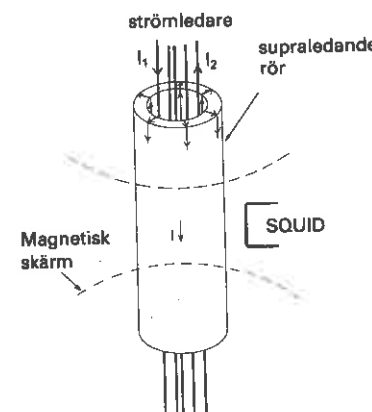
Vid balans gäller:

$$U_N = \frac{h}{2e} \cdot \nu \cdot n \cdot \frac{NR}{R}$$

Kryogen strömkomparator

I mätsystemet för att kalibrera normalelement finns en kryogen strömkomparator och en SQUID (fig 3). Komparatorn används för att jämföra strömmar och SQUIDen som en noll-detektor vid själva jämförelsen.

När en strömförande ledare omges av ett supraledande rör flyter strömmar i ytan av supraledaren längs insidan och utsidan av röret för att skärma bort magnetfältet från



Figur 3. Principen för en supraledande strömkomparator.

den strömförande ledaren inuti supraledaren. Strömmarna längs utsidan av röret är oberoende av ledarens placering inne i röret och man kan tack vare detta jämföra två strömmar längs utsidan. Om vi låter strömmarna vara motriktade är ytströmmarna noll då $I_1=I_2$. Om vi i stället låter den ena ledaren gå n varv genom röret är $nI_1=I_2$ vid nollström. I fallet med vårt beskrivna mätsystem är givetvis antalet lindningsvarv fixa och man justerar delningsförhållandet med en potentiometer tills delnings- och lindningsförhållande stämmer överens.

För att detektera ytströmmen används en SQUID, en mycket känslig magnetflödesdetektor. SQUIDen och dess funktion finns beskriven på annan plats i detta nummer av Kosmos.

Felaktigt värde på $2e/h$

För att uppnå överensstämmelse mellan spänningseenheterna i olika länder rekommenderade BIPM redan 1972 ett talvärde för $2e/h$. Rekommendationen accepterades i ett flertal länder men i USA, Sovjetunionen och i Frankrike valde man utifrån sin egen forskning egna värden på $2e/h$. I realiteten innebär detta att vi har fyra olika "voltar" i världen med en spridning upp till nära nog $6 \mu\text{V}$.

Senare års forskning har visat att det rekommenderade värdet på $2e/h$ ger en spänningseenhet som är i storleksordningen $8 \mu\text{V}$ mindre än SI-enheten (1 V). Om några år (1990) kan vi vänta oss en världsomfattande "högertrafikomläggning". Då får vi nämligen ett nytt rekommenderat värde på $2e/h$ som förutom att överensstämmelsen med SI-volten blir bättre också innebär att alla använder samma värde.

Den nuvarande motståndsnormalen (1987)

Den svenska motståndsnormalen, liksom övriga nationella motståndsnormaler, består av ett antal trådlindade 1Ω motstånd vars medelvärde definierar den svenska ohmen, Ω_S . Motstånden är förvarade i ett temperaturkontrollerat bad av mineralolja vid Statens Provningsanstalt i Borås. Någon av de sex svenska motståndsnormalerna tas med jämna mellanrum till Paris för att jämföras med den internationella ohm-normalen Ω_{BIPM} . Ω_{BIPM} jämförs i sin tur med SI-ohmen Ω_{SI} . Jämförelser mellan Ω_{SI} och andra normaler är en mycket tids- och kostnadskrävande process och har aldrig utförts i Sverige. I USA utfördes den senast 1972 medan den numera utföres kontinuerligt i Australien.

För att bestämma Ω_{SI} utgår man från en kondensator med beräkningsbar kapacitans. Eftersom kapacitansen hos en kondensator bestäms av dess linjära dimensioner kan man med laserljus och interferens åstadkomma välde-

Rekommenderat värde $2e/h=483594$ GHz/V.

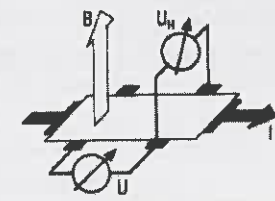
KVANTISERADE HALLEFFEKTEN

Den kvantiserade halleffekten uppstår i tunna halvledarstrukturer (hallelement) och då temperaturen endast är någon grad K

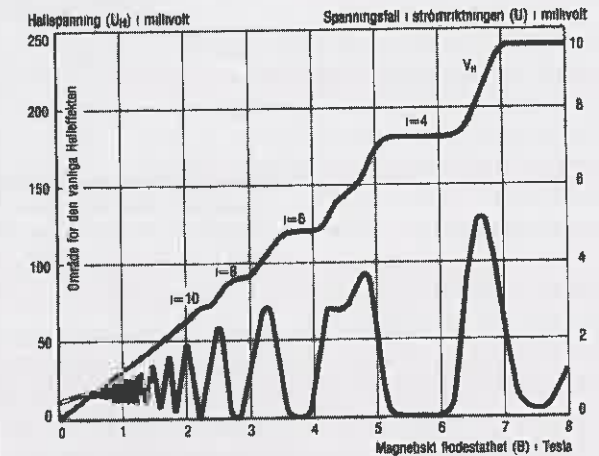
Spänningen över hallelementet dividerad med strömmen genom halvledaren är kvantiserad och oberoende av de geometriska måtten hos hallelementet

$$R_H = \frac{U_H}{I} = \frac{h}{e^2} \cdot \frac{1}{i}$$

h är Plancks konstant, e^2 elektronens laddning i kvadrat och i är ett heltal. Vid $i=1$ är $R_H \approx 25812,80 \Omega$



Den kvantiserade halleffekten uppstår i ett mycket tunt hallelement.

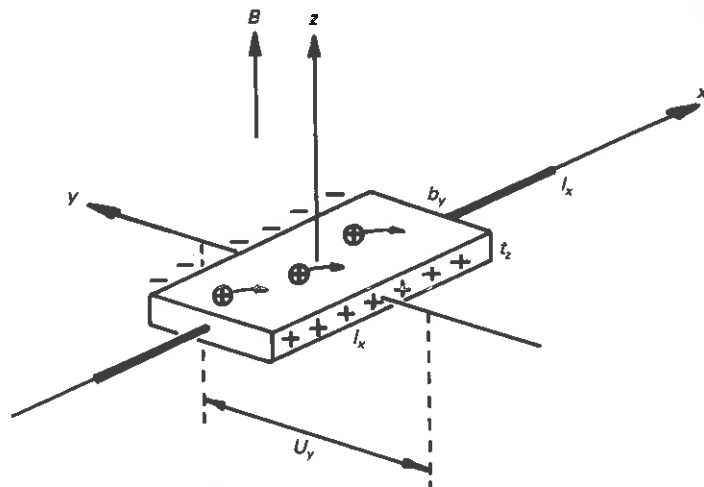


Kvoten mellan hallspänningen och strömmen genom hallelementet är kvantiserad om flödestätheten över elementet har vissa speciella värden. Dessa kvantiserade steg används för att bestämma enheten 1 ohm

finierade kapacitansändringar. Genom att använda en växelströmskrets ($\omega=10^4\text{s}^{-1}$) kan man i konsekutiva steg jämföra olika impedanser av samma storleksordning från den lilla ändringen av den beräkningsbara kapacitansen ($\Delta C \sim 0.5 \text{ pF}$) till ett växelströmsmotstånd på 1000Ω . Växelströmsmotståndets kapacitans och induktans kan beräknas varvid vi erhåller ett 1000Ω likströmsmotstånd. Detta skalas därefter i steg ner till 1Ω varvid en jämförelse med en trådmotståndsnormal kan göras.

Den kommande motståndsnormalen (1/1 1990?)

Allt sedan den nobelprisbelönade upptäckten (Klaus von Klitzing, 1980) att Hallmotståndet för vissa halvledarstrukturer har ett trappstegsformat utseende (se faktaruta) och där plåtarna antar inverterade heltalsvärden av h/e^2 ($=25812.80 \Omega$) har nationella standardlaboratorier över hela världen undersökt möjligheten att använda denna kvantiserade Halleffekt som en framtida motståndsnormal. De välutvecklade kvantiserade nivåerna lämpade för normalmotstånd observeras endast vid mycket låga tem-



Figur 4. Hall-effekt. En ström I_x skickas i den positiva x -riktningen. Ett magnetfält i den positiva z -riktningen strävar att förskjuta positiva laddningsbärare i negativa y -riktningen. Detta ger upphov till en Hallspänning U_H i y -riktningen.

peraturer (<4 K) och höga magnetfält (>6 T). Flertalet laboratorier använder sig av $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ -GaAs-strukturer och 4:e kvantnivån dvs ett Hallmotstånd $= 25812.80 \Omega/4 = 6453.20 \Omega$.

Fram till den 15 juni 1988 insamlas h/e^2 -värden erhållna från R_H -mätningar (se faktaruta) och i september 88 kommer ett värde på h/e^2 att fastläggas. Detta värde kommer sedan att gälla från januari 1990 och utgöra en internationell motståndsnorm för laboriearbete.

Halleffekt

Normalt görs Hallelffekt-mätningar på en provbit i form av en rektangulär platta (fig 4) (längd (l_x), bredd (b_y), tjocklek (t_z)). Vinkelrätt mot plattan lägger man på ett magnetfält ($B_z=B$) samtidigt som man låter en ström (I_x) gå i plattans längdriktning. För denna experimentsituation observeras en spänning, Hallspänningen $U_H(=U_y)$, förorsakad av ett inducerat elektriskt fält (E_i) som är vinkelrätt och proportionellt mot både B_z och I_x . Förhållandet $R_H=U_y/I_x=B/(nqt_z)$ definierar Hallmotståndet (n =laddningsbärartätheten; q =laddningsbärarnas laddning). Det elektriska fältet orsakas av den laddningsförskjutning som uppstår genom kraftverkan på de rörliga laddningarna från magnetfältet, Lorentzkraften $F_B=qv \times B$. När strömmen blivit stationär balanseras denna kraft av den inducerade kraften $F_E=qE_i$ dvs $E_i=-v \times B$.

Om elektronernas rörelse i z -led begränsas till atomära dimensioner erhålles ett sk tvådimensionellt prov. Man utbyter då den 3-dimensionella laddningsbärartätheten ($=n$) mot en ytladdningstäthet (n_s). Totala antalet

elektroner i en provbit blir därför $n l_x b_y t_z = n_s l_x b_y$ dvs $n t_z = n_s$ och vi får $R_H=B/(n_s q)$ (oberoende av provets geometri!!!). För små magnetfält observeras ett linjärt $R_H(B)$ -beroende (klassiskt område) medan för höga fält (och låga temperaturer) fås en total avvikelse, man får den trappstegsformade kvant-Hall-effekten. Om R_H hade varit beroende av provets geometri skulle noggrannheten i R_H begränsas av förmågan att mäta provets linjära dimensioner.

Kvant-Hall effekt

Kvantiseringen av Hallelffekten beror på att man vid höga B -fält får ett annat kvantiseringsschema än för låga fält. Laddningsbärarna tvingas in i cirkulära banor, cyklotronorbitaler, som är kvantiserade i den mening att cirkelbanans omkrets måste svara mot ett helt antal ($=i$) partikelvåglängder. Motsvarande energivärden är $\epsilon_i = \hbar \omega_c (i - 1/2)$ där $\omega_c = eB/m =$ cyklotronfrekvensen (m =laddningsbärarnas effektiva massa).

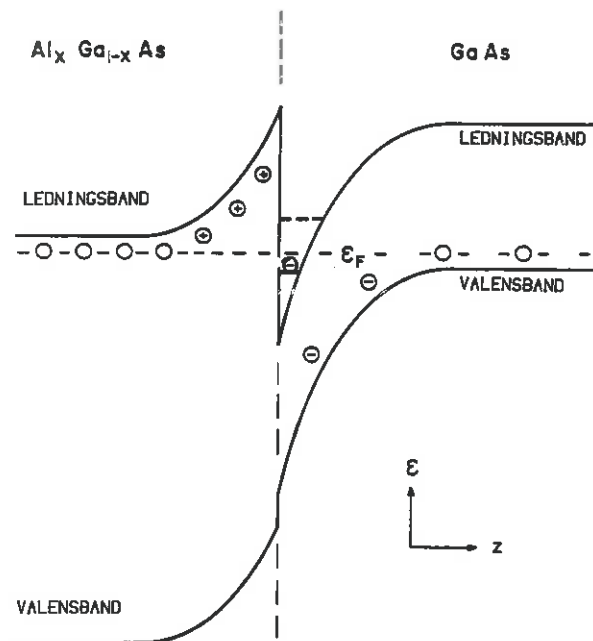
Antalet laddningsbärare som kan ha samma energi begränsas av Pauliprincipen, som säger att två elektroner som tillhör samma system inte kan vara i samma tillstånd ($=$ ha alla kvanttal lika). Antalet elektroner ($=n_i$) i en nivå ϵ_i (sk Landau-nivå) kan bestämmas genom att fastställa hur många cyklotronorbitaler som finns per ytenhet. Resultat blir $n_i = qB/h$.

Om i Landaunivåer är helt fyllda fås således $n_s = i n_i$ dvs

$$R_H = \frac{B}{n_s q} = \frac{B}{i n_i q} = \frac{B}{i(qB/h)q} = \frac{h}{iq^2}$$

vilket är plåtarnas R_H -värden. Eftersom n_s är en konstant blir plåtarnas utsträckning i denna beskrivning $=0$. För att plåtarna skall få en utsträckning krävs något mera. Om man förutom Landaunivåerna också har andra, sk bundna, elektrontillstånd ($=$ tillstånd med elektroner som ej bidrar till strömtransport) fås en breddning av Hallplattan.

Om man ökar magnetfältet så mycket att lägsta Landau-nivån är helt fylld och sedan börjar minska fältet kommer elektroner från 1:a Landaunivån att tvingas upp i högre liggande bundna nivåer. Antalet strömförande elektroner blir färre men den förväntade minskningen av strömmen kompenseras exakt med ökad hastighet hos laddningsbärarna. (Någon nöjaktig teoretisk tolkning av detta faktum finns ej i dagsläget.) Detta gör att Hallmotståndet blir konstant till dess Landaunivå 2 börjar besättas osv. Dessutom visar det sig att resistansen längs provet antar mycket låga värden för B -fält med Hallplatta eftersom laddningsbärarna ej kan spridas då inga tomma energinivåer finns inom räckhåll.



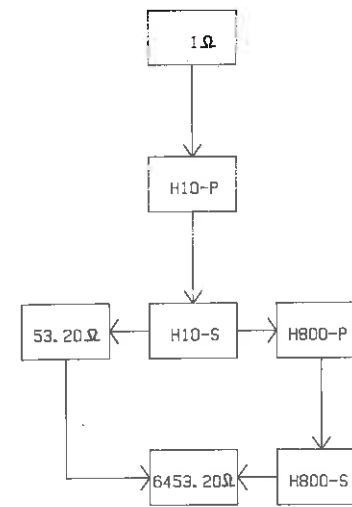
Figur 5. Energinivåer i heterostrukturer.

Tvådimensionellt prov

Det två-dimensionella system som kommit till mest användning utgörs av sk heterostrukturer av $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ - GaAs ($x \approx 0.3$). För n -dopad $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ och sparsamt p -dopad GaAs erhålls i övergångsområdet en potentialficka (fig 5) med elektroner bundna vinkelrätt (z -riktningen) mot kontaktytan medan elektronerna kan röra sig fritt i kontaktplanet, dvs man har en 2-dimensionell elektrongas (=2DEG). Det finns andra metoder [1] att erhålla en 2DEG men fördelen med GaAs är att effektiva massan m är liten vilket leder till höga ω_c -värden. Höga ω_c -värden och därmed stora Landausplittringar ger möjligheter att utföra kvant Hall-mätningar utan att behöva använda extremt höga fält och extremt låga temperaturer.

Mätförfarande

Det mätförfarande som tillämpas är i princip likartad för samtliga laboratorier som arbetar med kvant-Halleffekten. Eftersom 1Ω :s normalerna och kvant-Hall-apparaturen inte kan jämföras direkt måste jämförelsen göras via ett referensmotstånd R_R ($\approx 6453,2 \Omega$). Jämförelsen R_H/R_R kan göras i mer eller mindre komplicerade bryggor. Mätprincipen bygger på att samma ström går genom R_H och R_R varefter spänningarna över R_H ($=U_H$) och R_R ($=U_R$) jämföres med en tredje spänning $=U_0$ ($\approx U_H, U_R$)



Figur 6. Resistansskalning från R_H till 1Ω .

$$U_H = IR_H = U_0 + \Delta_H$$

$$U_R = IR_R = U_0 + \Delta_R$$

$$R_H/R_R \approx 1 + (\Delta_H - \Delta_R)/U_0$$

Referensmotståndet R_R jämförs därefter med den nationella ohmen. Den jämförelsen sker med hjälp av sk Hamonboxar (fig 6). En Hamonbox består av ett antal identiska motstånd som antingen parallellkopplas eller seriekopplas. I första steget används en $10 \times 10 \Omega$ Hamonbox. Med motstånden parallellt fås $H10-P=1 \Omega$, i serie fås $H10-S=100 \Omega$. $H10-S$ jämförs därefter dels med en $8 \times 800 \Omega$ Hamonbox kopplad $H800-P=100 \Omega$ och dels med ett 53.20Ω motstånd. Slutligen kopplas $H800-S=6400 \Omega$ vilket i serie med 53.20Ω ger ett 6453.20Ω :s motstånd uttryckt i Ω , att jämföras med R_R och därmed R_H .

Litteratur

1. Tord Claesson och Staffan Rudner: Mättekniska aspekter av den supraledande Josephson-effekten, Svensk mätplatsskalender 1982.
2. Lars Frank: Kalla fakta, Metrologen 5, 1987.
3. J. C. Gallop: The Impact on Superconducting Devices on Precision Metrology and Fundamental Constants, Metrologia vol 18, Nr 2, 1982.
4. Olof Beckman: Nobelpriset i fysik 1985, Kosmos 1986.
5. Mats Jonson: Kvant-Hall-effekten - ett möte mellan mikrokosmos och makrokosmos, NFR årsbok 1984.



Statens provningsanstalt (SP) är ett nationellt laboratorium för en lång rad storheter i Sverige, bland annat de elektriska. För dessa storheter sker nu en övergång för att utnyttja Josephson-effekten. Inom ramen för ett nordiskt samarbetsprojekt har en spänningsreferens som bygger på Josephson-effekten redan tagits fram. För närvarande genomförs ett STU-finansierat forsknings-samarbete mellan Chalmers Tekniska Högskola, Fysikinstitutionen och SP för att också kunna utnyttja den kvantiserade Halleffekten vid bestämningen av resistansenheten.

HÅKAN NILSSON (f 1949). Han är civilingenjör med examensår 1974, CTH, och arbetar sedan 1978 vid Statens provningsanstalt i Borås. Sedan 1981 är han ansvarig för det nationella laboratoriet, riksmätplatsen, för elektriska likströms- och lågfrekvensstorheter i Sverige.

JOHN VALLIN (f 1935), docent, f. dr i fysik (Uppsala 1967). Arbetade 1967-70 vid General Electric Research and Development Center, USA. Sedan 1970 universitetslektor i fysik vid Chalmers Tekniska Högskola. Sabbatsår vid EPFL Lausanne Schweiz (75-76) och ASEA i Västerås (80-82). Vallins arbetsområde är fasta tillståndets fysik speciellt punktdefekter i halvledare och isolatorer och Jahn-Teller effekten. På senare år har Vallin alltmer intresserat sig för tillämpad fysik inom metrologi och energiomvandling.