Den resistiva töjningsgivarens historia

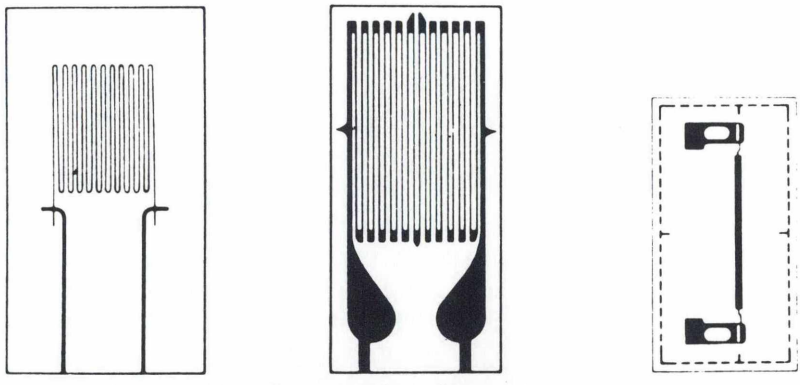
Av Knut Fristedt

Förutom transistorn har troligen ingen annan enskild uppfinning haft ett så vittgående och varaktigt inflytande på mättekniken som den limmade resistiva töjningsgivaren. Den har under de senaste fem årtiondena dominerat den experimentella hållfasthetstekniken och huvuddelen av marknaden för kraft-, vikt-, tryck- och accelerationsmätgivare.

En resistiv töjningsgivare är i princip ett ohmskt motstånd som limmat på ytan av ett objekt följer ytans mekaniska töjning och svarar mot denna med en motståndsändring. Ett icke ledande skikt isolerar motståndselementet, som kan vara av metall eller av halvledarmaterial (fig 1 och 2), från underlaget och överför samtidigt underlagets töjning. Givarens geometriska utformning bestämmer mätriktningen.

Motståndsändringen kan vid konstant temperatur uttryckas med

$$\triangle R/R = g \cdot \varepsilon = g \cdot \sigma/E$$

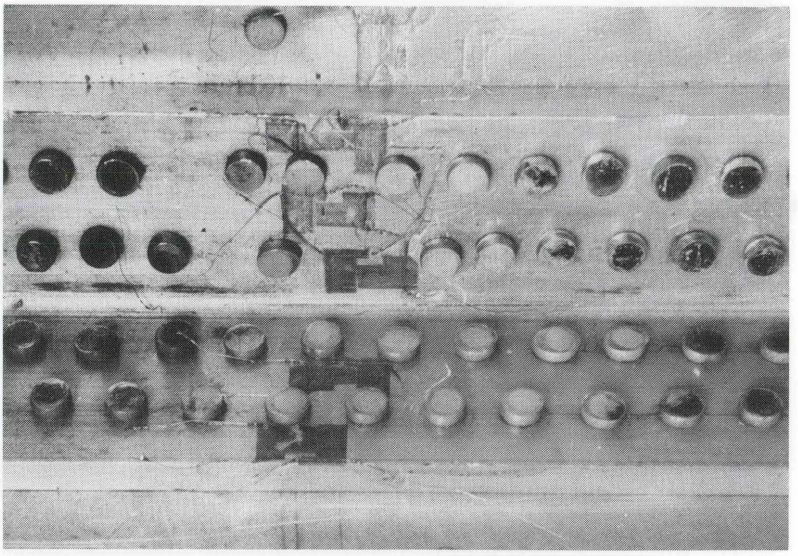


1. Den resistiva töjningsgivarens tre huvudtyper:

Till vänster den ursprungliga trådtöjningsgivaren bestående av en tunn tråd formad till ett galler och limmad mot ett papper.

I mitten folietöjningsgivaren, som idag är den vanligast förekommande typen. Den består av ett galler fotoetsat ur en metallfolie. Underlaget är epoxy eller polyimid.

Till höger en töjningsgivare av halvledartyp. Den består av en p- eller n-dopad kristall av kisel med en bestämd kristallografisk riktning upplimmad på ett plastunderlag.



2. Ett nitat balkelement med ett antal trådtöjningsgivare av FFA typ limmade på plats. Från slutet av 40-talet.

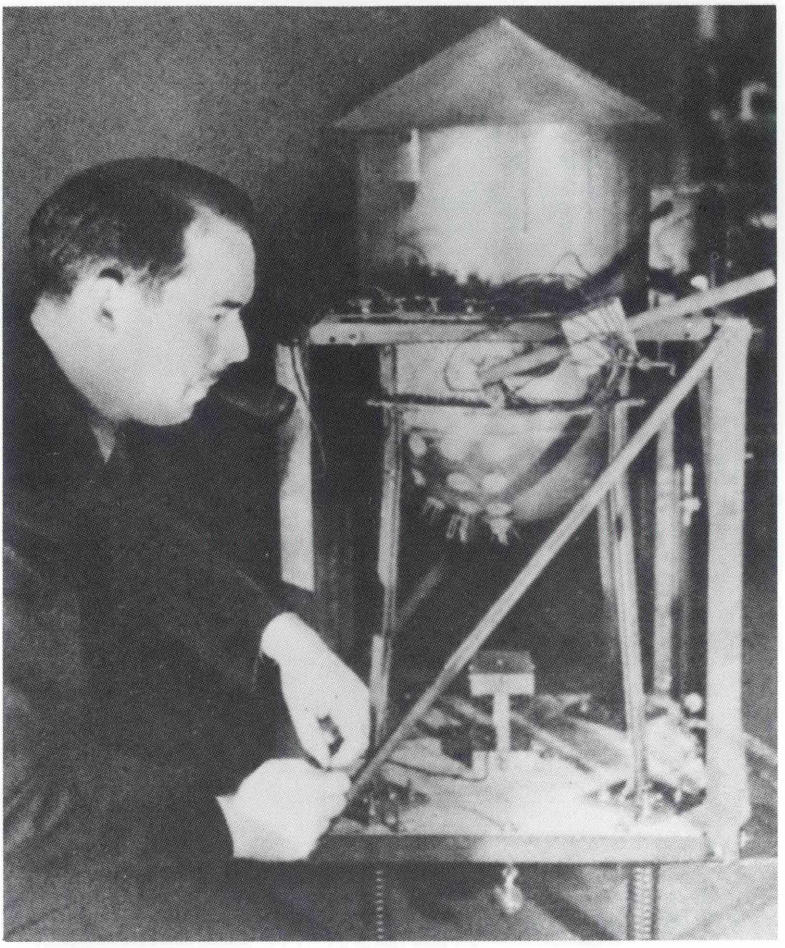
där $\triangle R$ = den av töjningen orsakade motståndsändringen
R = givarens begynnelsemotstånd
ε = underlagets mekaniska töjning
σ = underlagets mekaniska spänning
E = underlagets elasticitetsmodul
g = givarens töjningskänslighet eller gaugefaktor

Gaugefaktorn är ungefär 2 för mångkristallina metaller och ligger i området −130 till 175 för halvledande enkelkristaller.

Som alla ohmska motstånd reagerar resistiva töjningsgivare också mer eller mindre för temperaturändringar. Detta är en oönskad motståndsändring som kan undertryckas med en lämplig bryggkoppling.

Amerikanen E E Simmons deltog under 1936 i en undersökning vid CalTech (California Institute of Technology) av stötkrafter vid pendelförsök och föreslog efter ett antal misslyckanden med andra mätmetoder att man skulle limma en tunn motståndstråd av Advance (företaget Driver-Harris handelsnamn på legeringen konstantan) på försöksanordningens dynamometer. Mätsignalen visade sig vara tillräckligt stor för att kunna registreras på ett oscilloskop och mätresultatens repeterbarhet var över förväntan.

Knappt två år senare och utan vetskap om Simmons arbete fick A C Ruge (fig 3) professor vid MIT (Massachusetts Institute of Technology) under sina studier av jordbävningssäkra strukturer för vattentankar idén att limma en tunn motståndstråd i form av ett galler på en



3. A C Ruge uppfann oberoende av Simmons föregående arbete den limmade trådtöjningsgivaren 1938, när han försökte mäta de mekaniska spänningarna i en skalad modell av en vattentank utsatt för simulerade vertikala jordbävningskrafter.

av sina dynamiskt skalade modeller. Även han använde Advance och lyckades få reproducerbara resultat över förväntan.

Simmons tillskrevs så småningom den grundläggande uppfinningen av den limmade resistiva töjningsgivaren i ett patent beviljat 1942. De fysikaliska förutsättningarna för givaren och dess tillämpningar hade emellertid klarlagts långt tidigare.

Tiden före år 1900

1678 publicerade Robert Hook sin upptäckt att en fjäders förlängning är direkt proportionell mot den belastande kraften och att inom det elastiska området det ursprungliga tillståndet återfås när kraften upphör. Detta är fortfarande den mekaniska huvudregeln för alla mätgivare med resistiva töjningsgivare som avkännande organ. Det skulle

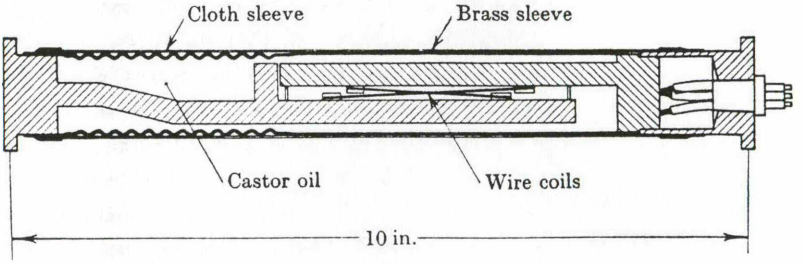
emellertid dröja nästan två sekler innan motsvarande elektriska kunskaper blev tillgängliga.

Ohms upptäckt av sambandet mellan ström, spänning och motstånd (1827) tillät Wheatstone att utveckla sin brygga (1843) för mätning av små motståndsändringar. Engelsmannen Thomson (senare Lord Kelvin) arbetade längs samma linjer och 1856 publicerade han sin upptäckt att motståndet hos trådar av järn och koppar ändrades vid mekanisk belastning inom det elastiska området och återgick till sitt ursprungsvärde när belastningen upphörde. Han betraktade effekten som icke önskvärd och drog aldrig slutsatsen att den kunde användas för mättekniska ändamål. Landsmannen Tomlinson fortsatte dessa försök och rapporterade 1883 sina resultat i den form vi idag kallar töjningsgivarkänslighet eller gaugefaktor.

Formuleringen av de hållfasthetstekniska samband som man utnyttjar vid mätningar med limmade resistiva töjningsgivare gjordes också för länge sedan. Begreppet elasticitetsmodul (endimensionell) är förknippat med Robert Young (1807) och spännings- och deformationstillstånden vid flera dimensioner med fransmannen Cauchy. Till den matematiska elasticitetsteorin bidrog också Saint-Venant och Poisson. Den senare har sitt namn förknippat med begreppet tvärkontraktion. Grunderna för analys av plana spännings- och töjningsfält publicerades av tysken Clebsch 1862, och därmed återstod endast att ge analysen en mer praktisk form och att skapa lämpliga mätverktyg för att kunna utföra allmänna experimentella hållfasthetsundersökningar.

Tiden 1900 till 1940

1908 visade tysken Lindeck att motståndet hos en metalltråd lindad runt ett rör och fixerad med schellack ändrades proportionellt mot trycket i röret. Han använde sig olyckligtvis av manganintråd, som har en låg gaugefaktor, men kunde konstatera att utslaget var linjärt och mätbart vid högre tryck. Han föreslog att metoden skulle prövas vid konstruktion av tryckmätgivare, men varken han själv eller någon annan tog upp idén. 1917 byggde tysken Nernst en tryckmätgivare



4. R W Carlsons fritrådsextensometer från 1932. Den användes med framgång vid mätning av lokala töjningar i stora betongkonstruktioner. (Bilden ur Experimental Stress Analysis av G S Holister.)

bestående av en kolv som belastade och sträckte ett fritrådsystem. Han lyckades att på detta sätt mäta trycket i en förbränningsmotor på elektrisk väg.

En extensometer ungefär 250 mm lång och av fritrådtyp för mätning av töjningar huvudsakligen i betongkonstruktioner konstruerades och patenterades i Amerika av R W Carlson i början av 30-talet (fig 4). Ungefär samtidigt utförde amerikanen Kearns töjningsmätningar på flygplanspropellrar, varvid han limmade grafitmotstånd nedslipade till tunna skivor på provobjekten. Trots stor hysteres och temperaturberoende ansågs mätningarna vara framgångsrika. En vidareutveckling av detta koncept var professor deForests Ess-strip, som bestod av en bakelitfilm impregnerad med grafit. Några år senare användes grafitgivare också i Tyskland.

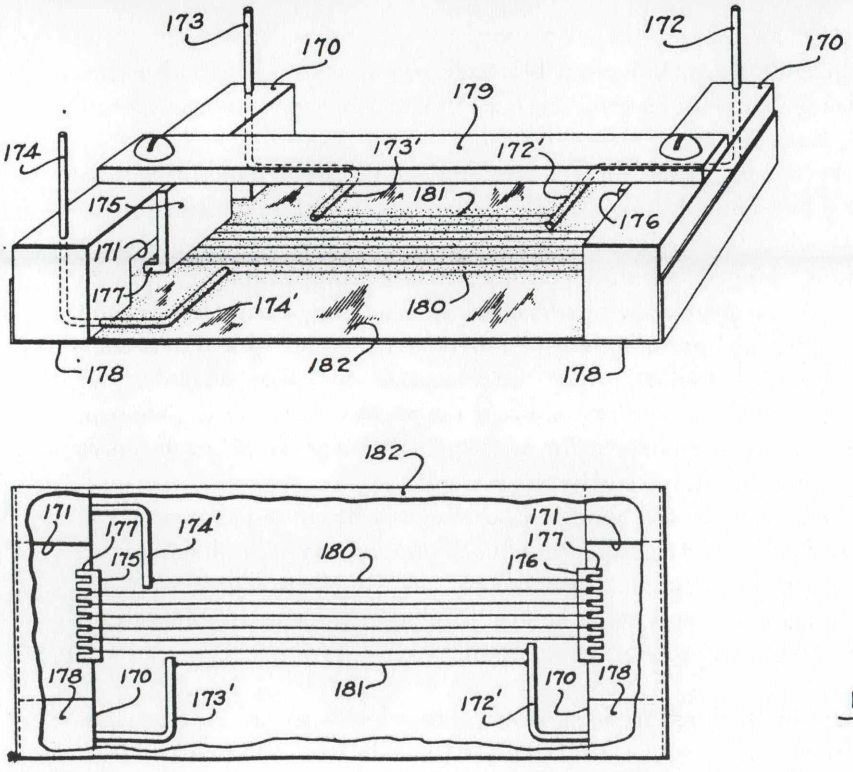
Utan vetskap om Simmons och Ruges arbeten undersökte tysken Czerlinsky 1938 egenskaperna hos fria trådar utsatta för dragning och fann att konstantan (Advance) var det lämpligaste materialet, ett resultat som i stort gäller än idag. Någon tysk resistiv töjningsgivare gav dock hans arbete ej upphov till.

Trådtöjningsgivarens patentering

Ruge insåg tidigt att hans konstruktion bestående av ett trådgaller limmat vid ett papper, som i sin tur kunde limmas vid ett provobjekt, hade ett kommersiellt värde. Genom sin kollega deForest fick han hösten 1939 kontakt med Frank Tatnall (fig 5) som hade en lång yrkesgärning som försäljare av utrustningar för materialprovning vid Baldwin-Southwark (senare Baldwin-Lima-Hamilton eller BLH). En överenskommelse träffades, som innebar att BLH skulle söka patent i Ruges namn mot att ensamrätten till försäljning av dennes trådtöjningsgivare (fig 6), som den resistiva töjningsgivaren då kallades, tillföll BLH.



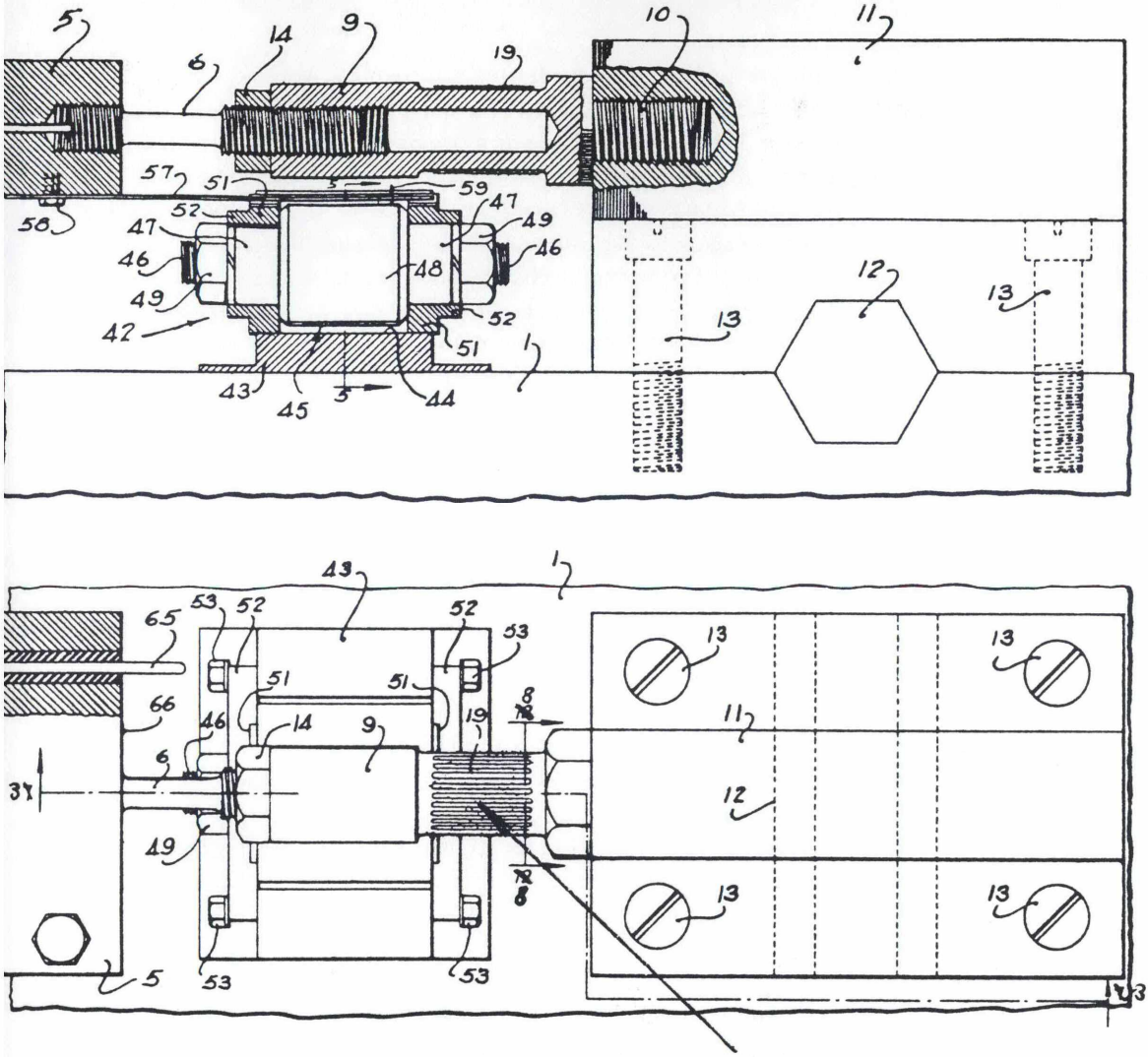
5. Frank Tatnall vid BLH var från 1940 och under mer än två årtionden den resistiva töjningsgivarens främste agitator. Att givaren fick en så snabb spridning var till stor del hans förtjänst.



6. Ruges ursprungliga resistiva töjningsgivare med ett trådgaller upplimmat på ett papper. Efter det givaren limmats vid ett provobjekt avlägsnades stödkonstruktionen. I samband med givartypens utveckling övergavs den senare.

Under patentärendets förberedelser kom det fram att Simmons givare (fig 7) redan publicerats vid en mätteknisk konferens i juni 1938 och att denne sålunda hade prioritet. Till att börja med var Simmons ovillig att söka patentskydd emedan han ansåg givaren vara oväsentlig. Genom Tatnalls insatser kom ett möte till stånd mellan alla i frågan inblandade. Härvid beslutades att BLH i Simmons namn skulle söka ett grundläggande patent gällande idén att limma en motståndstråd mot ett objekt och använda motståndsändringens beroende av töjningen som mätinformation och i Ruges namn ett tilläggspatent gällande givargeometri och idén att limma tråden på ett papper, som i sin tur kunde limmas mot ett provobjekt. Vid mötet kom man också överens om att BLH mot ersättning till uppfinnarna skulle ha ensamrätt på givarnas marknadsföring. Patentansökningarna lämnades in 1940 och beviljades 1942 respektive 1944.

CalTech gjorde anspråk på drygt hälften av Simmons ersättning men frändömdes rätten till detta i en rättegång med motiveringen att Simmons vid uppfinningens tillkomst var studerande vid CalTech och ej anställd. För Simmons del innebar domen att han blev ekonomiskt



7. Simmons dynamometer för mätning av stötkrafter vid pendelförsök. Pilen visar dynamometerkroppen med den fram- och återgående motståndstråden.

oberoende för resten av sitt liv. Han deltog ej mer i den resistiva töjningsgivarens utveckling eller gjorde någon ytterligare insats inom den experimentella hållfasthetstekniken.

Ruge måste genom sin anställning vid MIT erbjuda uppfinningen till sin arbetsgivare. Till hans lycka svarade patentkommittéen vid MIT att han kunde behålla sin uppfinning emedan den föreföll att vara av ringa kommersiellt intresse. Detta gjorde att också Ruge så småningom blev en välbärgad man. Som en parentes må nämnas att man år 1983 enbart i USA framställde resistiva töjningsgivare till ett marknadsvärde av cirka 10 miljarder kronor.

Tiden 1940 till 1950

I början av 1940 tillverkade flygindustrin på Amerikas västkust sina egna trådtöjningsgivare. Den grundläggande informationen för denna verksamhet torde ha kommit från både CalTech och MIT. BLH kunde inte hävda någon prioritet då de sökta patenten ännu ej var beviljade. De hade ej heller till att börja med en tillräcklig produktion av givare igång för att kunna möta efterfrågan. När patenten beviljats, kunde man fortfarande ej hävda prioritet på grund av det pågående andra världskriget; man fick vänta tills efter krigsslutet 1945.

Under tiden utvecklades trådtöjningsgivaren liksom lim, fuktskyddsmedel och verktyg till industriprodukter av Ruge och hans medhjälpare. Bland annat tog man fram en givartyp, inbakad i bakelit, som bättre stod emot fukt än pappersgivarna. 1940 tillverkade man 100 givare, och redan 1942 var man uppe i en produktion av 100 000 enheter.

Användningen av trådtöjningsgivare som avkännande organ i mätgivare för kraft och vikt tog under denna tid fart. Dock dröjde det ännu ett par årtionden innan sådana mätgivare kunde krönas och användas i handelstekniska sammanhang. BLH föreskrev vid försäljningen av sina givare att dessa av kunden ej fick användas i någon form av permanent mätgivare. Detta gjorde att många sökte sig andra vägar. Statham startade till exempel en framgångsrik tillverkning av tryckmätgivare och accelerometrar efter samma linjer som Carlsons fritrådgivarpatent.

Trådtöjningsgivaren föddes i USA, och det dröjde till efter krigsslutet 1945 innan den började spridas över världen. Ett undantag var England, där man redan hösten 1940 tillverkade enkeltrådgivare med pappersunderlag. Om detta var en engelsk originalidé eller om man byggde på amerikansk information, är ej klart. Från 1941 tillverkades givare liknande BLH:s vid företaget Tinsley. Andra typer baserade på vävningsteknik framställdes vid Rolls Royce. Det tredje landet i ordningen med egen tillverkning av givare torde ha varit Sverige. Detta behandlas längre fram.

Tiden 1950 till 1960 folietöjningsgivaren

Introduktionen av folietöjningsgivaren i början av 50-talet representerar förmodligen det största enskilda utvecklingssteget i den resistiva töjningsgivarens historia. Trådgallret ersattes därvid med ett galler fotoetsat ur en tunn metallfolie, tidigare sammanvalsad med en isolerfolie av araldit (senare andra plaster). Metoden innebar att man kunde ersätta ett manuellt tillverkningsförfarande med ett maskinellt och den öppnade en väg för tillverkning av praktiskt taget varje tänkbar form av givargeometri. Mot slutet av 50-talet gav den också upphov till två omvälvande patentprocesser i USA.

1952 började den engelska flygplanfirman Saunders-Roe att tillverka foliegivare. Skälet till företagets insats var inte brist på givare utan irritation över att tillgängliga givartyper så ofta gick sönder

genom utmattning. Foliegivaren kurerade emellertid inte detta problem till att börja med. Det var först senare efter amerikanska insatser på etsningsområdet, som utmattningsproblemet något så när löstes.

Den ursprungliga fotoetsningsprocessen också känd som tryckt krets teknik utarbetades av det engelska företaget Technigraph Printed Circuits, som också patentsökte densamma. I USA startade BLH 1954 tillverkning av fotoetsade givare utan någon licens, och ett par år senare följde TMS (Tatnall Measurement Systems) i spåret. Det senare företaget hade bildats med Frank Tatnall som ledare efter det denne lämnat BLH och hade som målsättning att göra allt vad BLH gjorde men bättre. BLH stämde TMS för patentintrång 1957, emedan de ansåg att Simmons patent också måste gälla för motståndselement av metallfolie.

Avgörande patentprocesser

I sin plädering före domens avkunnande ett år senare började domaren med frågan om Simmons patent egentligen representerade någonting nytt, eftersom tråd som motståndselement redan använts av Carlson och eftersom Kearns hade limmat motståndselement av grafit på sina propellrar. Han konstaterade dock att innan Simmons idé att limma en tråd mot en yta var känd hade många utan speciell framgång försökt mäta mekaniska töjningar på flera olika sätt. Efter offentliggörandet hade Simmons idé accepterats helt, och detta ansåg domaren vara ett bevis på att Simmons idé var unik och att patentet måste anses gälla även om tråden ersattes av en metallfolie.

BLH vann sålunda processen, men i nästa andetag förklarade domaren att BLH förverkat rätten till patentet på grund av missbruk och skulle förlora detsamma. Bakgrunden till detta var BLH:s skriftliga förbehåll vid leverans till en kund, att denne endast fick använda den köpta givaren som ett tillfälligt mätinstrument och icke i någon form av permanent mätgivare. Något lagligt stöd för ett sådant förbehåll fanns ej, och därför förlorade BLH patentet till följd av "missbruk". Något allvarligt ekonomiskt avbrott innebar dock ej detta för BLH, ty endast ett år återstod av skyddstiden när domen avkunnades, och TMS kunde återuppta sin tillverkning av foliegivare.

1959 fick Technigraph patent i England på sin etsningsprocess och trodde sig därmed kunna avtvinga ett antal amerikanska företag stora licensavgifter. Man öppnade samma år en process mot Bendix Corp och väntade sig en lätt seger. Bendix advokater letade emellertid fram ett amerikanskt patent från 1939 gällande en elektrisk orgel, och i denna skrift fanns samma tryckta kretskortsteknik som Technigraph åberopade, beskriven som en tillverkningsmetod för orgelns elektriska system.

Därmed fanns inte några skyddande patent kvar. Vem som helst som ville kunde nu tillverka resistiva töjningsgivare av tråd eller folie.

Halvledartöjningsgivaren

Ett annat viktigt utvecklingssteg under 50-talet var den resistiva töjningsgivaren av halvledartyp. I samband med grundläggande forskning kring transistorteknologi vid Bell Telephone Lab påvisades 1953 den piezoresistiva effekten i enkelkristaller av germanium och kisel. Detta gav upphov till den resistiva halvledargivaren, som genom dopning kan ges mycket stora både positiva och negativa g-faktorer. Mot slutet av 50-talet startade flera företag tillverkning av sådana givare utan att träffa några licensavtal med Bell Telephone Lab. Detta företag antog dock ej utmaningen och någon motsvarighet till de beskrivna patentprocesserna gällande konventionella töjningsgivare uppstod aldrig.

Självtemperaturkompenserande givare

Under TMS utveckling av folietöjningsgivare gjordes upptäckten att man kunde påverka temperaturberoendet hos givare av Advance eller Karma genom en i förväg gjord värmebehandling av folien. Detta gav upphov till självtemperaturkompenserande givare, en egenskap som är utomordentligt användbar vid hållfasthetstekniska undersökningar.

TMS:s (senare omdöpt till Budd Instrument Div) mycket omfattande utvecklingsarbete avsatte också miniatyriserade folietöjningsgivare med en aktiv yta av $0{,}6 \times 0{,}6$ mm^2 och ett motstånd av 350 ohm. I och med detta hade fotoetsningstekniken nått en hög grad av mognad och blivit standardmetoden för framställning av konventionella, resistiva töjningsgivare, en position som metoden försvarar än idag.

1960 och framöver

Under 60-talets första år tillmätte man den limmade resistiva halvledargivaren en lysande framtid. Högt pris, olinjäritet, stort temperaturberoende och framför allt tillkomsten av billiga och stabila förstärkare, som kunde ta hand om de konventionella givarnas små signaler, gjorde att framtiden blev helt annorlunda.

Istället för att limma enskilda halvledargivare på ett objekt (t ex ett membran i en tryckmätgivare) lärde man sig att diffundera in hela Wheatstonebryggor i kiselplattor, som sedan direkt kunde fungera som både avkännande och mätande organ. Tekniken, som fordrar stora serier för lönsamhet, dominerar idag marknaden för tryckmätgivare.

1963 fick amerikanen Denyssen patent på en metod att stansa ut motståndsgaller ur en folie. Han kunde härigenom framställa givare ur material som inte kunde fotoetsas. Denyssen använde sig av en platina-wolfram legering med g-faktorn 4,5. Dentronics, som företaget kallades, tillverkade givare under ungefär 10 år. Det köptes upp av ett företag, som med framgång använde stansningstekniken till att framställa magnethuvuden.

Den idag marknadsledande tillverkaren av konventionella resistiva töjningsgivare Micro Measurement (MM) bildades 1962 av personal

som lämnade Budd Instrument Div, och tog detta företags tillverkningsprogram med sig. MM har vidareutvecklat både folieframställnings-, sammanfognings- och fotoetsningstekniken så att givare med mycket högt motstånd (4 000 ohm) kan framställas utan att givarnas aktiva yta behöver bli stor ($1{,}5 \times 1{,}5$ mm^2).

Ända sedan 40-talet har man sökt göra givare användbara för höga temperaturer. Den mest framgångsrika typen användbar upp till 450 C togs fram i början av 60-talet av Microdot. Den består av en motståndstråd inpackad med hjälp av magnesiumoxid i ett smalt rör av rostfritt stål. Vid användning svetsas röret fast vid provobjektet. För ännu högre temperaturer finns idag kapacitiva givare.

Stathams tryckmätgivare och accelerometrar med fritrådsystem började under 60-talet att betraktas som gammalmodiga. För att behålla sin marknadsandel satsade företaget på utveckling av tunnfilmsgivare, som i princip är konventionella foliegivare med högt motstånd. Tillverkningsmetoden fordrar stora serier och innebär att man på t ex ett membran i en tryckmätgivare genom vakuumförångningsteknik (sputtering) först anbringar ett isolerande skikt (aluminiumoxid) och sedan ett tunt skikt av metall (Advance eller Karma). Därefter fotoetsar man en Wheatstonebrygga i metallskiktet. Tekniken ger mycket tunna folier och sålunda små givare med högt motstånd. Metoden används också för framställning av avkännande organ i billiga massframställda hushålls- och badrumsvågar.

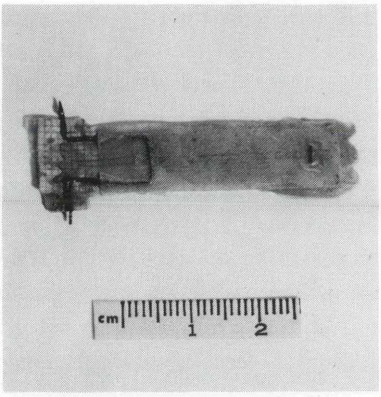
Behovet under senare år av billiga tryckmätgivare till bilmotorer har givit upphov till tjockfilmstekniken. Härvid belägger man tryckmätgivarmembranet med ett isolerande keramiskt material, för på ett metalliskt gallermönster med silkscreenteknik och bränner ihop det hela vid hög temperatur. Metoden förutsätter stora serier och kan automatiseras.

FFA-givaren en svensk töjningsgivare

Flygtekniska Försöksanstalten (FFA) inrättades 1940 med uppgift att bistå den växande svenska flygindustrin. För hållfasthetstekniska mätningar förfogade man från början över ett antal Huggenberger Tensometrar. De var mekaniska, med visuell avläsning, och kunde ej användas i dolda utrymmen. Genom tekniska tidskrifter kände man till nyheten trådtöjningsgivare, men det pågående kriget förhindrade import av sådana.

Under sommaren 1945 strax efter krigsslutet fick FFA, förmodligen genom SAAB tillgång till några trådtöjningsgivare och en mätbrygga från BLH. Detta gav Gotthard Gustafsson, som förestod den mättekniska sektionen vid FFA, möjlighet att bekanta sig med nyheten.

Hösten 1945 sändes Gustafsson på en resa till USA för att skaffa sig så mycken information som möjligt om trådtöjningsgivare och deras instrumentering. Han blev väl mottagen vid BLH och fick studera



8. Prototypen till FFA-givaren tillverkad i december 1945. Två längsgående 0,0015″ Advancetrådar, tvärgående 0,4 mm koppartrådar och ett mm-papper som underlag. Aktiv längd 24 mm, motstånd 50 ohm.

både tillverkning och användning av givare. Han lärde sig att den använda tråden var oisolerad, 0,001″ tjock och framställd av Advance. Med sig hem hade han en liten rulle isolerad, 0,0015″ tjock tråd, några färdiga trådtöjningsgivare och BLH:s instruktioner om hur dessa kunde installeras och användas.

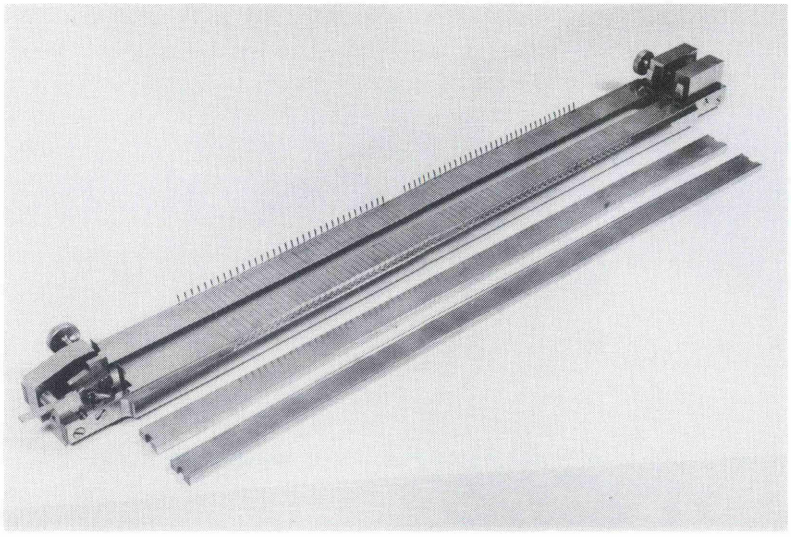
Gustafsson var emellertid en idérik uppfinnare och ville göra sina egna trådtöjningsgivare. För att komma runt BLH:s patent med en fram- och återgående sammanhängande tråd konstruerade Gustafsson en givare bestående av längsgående parallella trådar och fastlödda grövre tvärtrådar. Konstruktionen innebar, att givarens tvärkänslighet blev liten och att töjningskänsligheten blev oberoende av givarlängden. Båda dessa egenskaper bedömdes vara värdefulla.

Redan i december 1945 hade Gustafsson och hans assistent Gösta Scherling* med hjälp av den hemförda tråden tillverkat och provat givaren i fig 8. Ett jämförande prov med en BLH givare visade att konceptet fungerade, och detta inspirerade till fortsatt utvecklingsarbete, vilket också uppmuntrades av FFA:s ledning.

FFA-givarens utveckling

Lämplig tråd fanns endast i USA. Efter diverse svårigheter fick man under 1946 hem ett parti oisolerad Advancetråd av rätt diameter från Driver-Harris. Hur inköpet i detalj gick till och vilka vägar man utnyttjade, är höljt i dunkel. Idén att ersätta det isolerande papperslagret med en genomskinlig folie, åstadkommen genom att man sprutade ett lackskikt på ett underlag, föddes också under 1946 och kom att i stort bestämma givarens slutliga konstruktion och även tillverkningsmetoden. Den genomskinliga lackfolien underlättade också givarens orientering på ett provobjekt.

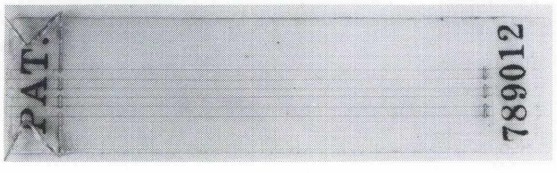
Det stod tidigt klart att tillverkningen skulle bli manuell med inslag av underlättande jiggar och verktyg. Under 1946 och början av 1947 konstruerades en jigg i princip lik den i fig 9. Den bestod av en ställning på vilken man kunde spänna upp tvärtrådar och längsgående



9. Jigg för tillverkning av FFA-givare. Längd ungefär 0,8 m. Den ena linjalen var mjuk och användes som mothåll vid tvärtrådarnas avskärning. Den andra linjalen var hård och bildade underlag för det påsprutade lackskiktet. Normalt tillverkades 24 givare samtidigt på en linjal.

trådar och löda samman dessa till ett galler. Tvärtrådarna kapades sedan på så många ställen att önskade sammanhängande trådslingor bildades. Båda dessa processer utfördes under mikroskop. En i förväg med lack sprutad linjal trycktes upp mot trådgallret, och med ytterligare lacksprutning åstadkom man en isolerande inneslutning av trådslingorna. När lacket torkat och hårdnat skalade man av den tillverkade remsam av givare från linjalen med ett stämjärn och klippte upp den till individuella givare. Givarkonstruktionen patentsöktes av Gustafsson hösten 1947, och patent beviljades två år senare (fig 10). I efterhand kan man säga att patentet troligen ej skulle ha beviljats om BLH bevakat sina intressen.

Under sina studier av olika trådlegeringar kom Gustafsson 1949 i kontakt med en ny legering med handelsnamnet Karma. Specifika motståndet var tre gånger så högt som för Advance, och då oisolerad tråd med diametern 0,001″ gick att få, kunde man framställa mycket



10. Den färdigutvecklade FFA-givaren. Motstånd 120 ohm. Genom att variera längden och antalet parallella trådar kunde givare för olika ändamål tillverkas.

kortare givare än förr med bibehållet givarmotstånd. Att gaugefaktorn var något högre än för Advance var också en fördel. Med facit i hand kan man konstatera att Gustafsson använde Karma cirka 10 år före andra tillverkare av resistiva töjningsgivare.

Bärfolien bestod ursprungligen av cellulosalack men ersattes ganska snart av polymeriserande lack (golvlack). 1950 provade Gustafsson epoxy, och med detta som utgångsmaterial skapades ett lim, som döptes till V-lim och som än i dag används av företaget SEG-Instrument.

FFA-givaren på FFA

På FFA fanns två områden för resistiva töjningsgivare, som mätgivare vid hållfasthetsundersökningar på flygplanstrukturer och som avkännande organ i kraftmätgivare, företrädesvis i vindtunnelvågar. FFA:s tillverkning av givare uppgick under 1947 till något hundratal, men behovet var större, och man var fortfarande hänvisad till viss import. Produktionstakten ökade emellertid och under 50-talet var FFA i stort sett självförsörjande. Gustafsson arbetade också under denna tid intensivt med att utveckla en givarvariant för högre temperaturer, baserad på användning av fritrådsystem och keramiskt lim. Denna verksamhet mer eller mindre självdog, när utvecklingen av svenska flygmotorer upphörde.

Behovet av geometriskt mindre givare gjorde sig allt mer gällande och då FFA-givaren ej praktiskt kunde göras kortare än 5 mm (3 mm aktiv längd), måste man söka sig ut på marknaden. Under 50-talets senare del hade det amerikanska företaget TMS lyckats framställa mycket små givare med hjälp av fotoetsningsteknik. Dessa givare motsvarade bättre FFA:s behov, och 1963 beslöt FFA:s ledning att man skulle lägga ner den egna givartillverkningen och satsa på inköp utifrån. En bidragande orsak var kanske också att Gustafsson detta år pensionerades från sin befattning och lämnade FFA.

FFA-givaren utanför FFA

Under 40-talets senare år började den svenska industrin alltmer att uppmärksamma FFA:s och Gustafssons insatser på töjningsgivarområdet. En konsultverksamhet byggdes upp, och alla givare man kunde avvara såldes, under 1949 ungefär ett tusental. 1950 slöts ett avtal mellan Gustafsson och FFA, där den förre tillerkändes rätten att själv tillverka och sälja givare till kunder utanför FFA.

I början av 50-talet inledde Gustafsson ett samarbete med Huggenberger i Schweiz, som tillät denne att tillverka givare på licens och marknadsföra dessa internationellt. I samband med detta introducerades namnet GH-givare, där GH står för Gustafsson-Huggenberger. Samarbetet upphörde av okänd anledning i början av 60-talet.

1965 sålde Gustafsson sin egen utrustning för givartillverkning till SEG-Instrument AB, som fortfarande tillverkar GH-givare för sitt eget behov.



11. Gotthard Gustafsson uppfinnare av FFA-givaren.

Gotthard Gustafsson

Gotthard Gustafsson (fig 11) föddes den 14 november 1902 och dog den 5 mars 1975. Efter att ha arbetat i sin fars byggnadsfirma, där han bland annat murade fabriksskorstenar, studerade han teoretisk och teknisk fysik vid universitetet i Lund och på KTH i Stockholm. Han blev fil lic 1937 och civ ing 1945. Han tjänstgjorde som amanuens vid KTH mellan 1933–41 och arbetade vid FFA som chef för den mättekniska avdelningen från 1941 till sin pensionering 1963. Han var en ledande auktoritet inom töjningsmättekniken och anlitades av svensk industri som konsult. Gustafsson intresserade sig också för andra områden inom fysiken såsom malmprospektering med magnetiska metoder. Vid sin bortgång arbetade han med konstruktion av en avancerad Wankelmotor.

Gotthard Gustafssons minne hedrades tillsammans med andra pionjärers vid den limmade resistiva töjningsgivarens 50-årsjubileum den 19 oktober 1988 i samband med "IMEKO XI World Congress" i Houston, USA.

* Gösta Scherling arbetade som Gustafssons assistent under hela utvecklingsarbetet med FFA-givaren och bidrog ofta med praktiska problemlösningar. Redogörelsen om FFA-givaren bygger på de minnesanteckningar han gjorde 1978–79.

Källor och litteratur

Carlson, R W, U S patent 2 036 458.

Dean, M, Semiconductor and Conventional Strain Gages, Academic Press, New York 1962.

Dorsey, J, "Very High Resistance Bonded Foil Strain Gages", Preprint, IMEKO 9th World Congress, Berlin 1982.

Gall, M W, "Early Days of the Resistance Strain Gauge", Preprint, 1988 BSSM Measurement Lecture.

Gustafsson, G, Svenskt patent 126 420.

"History of Strain Gages, Brittle Coatings and Loadcells, 50 Year Jubilee", Preprints from Sessions of TC3 and TC15 at the IMEKO XIth World Congress in Houston, USA, Oct 19 1988.

Nielsen, H A, From Locomotives to Strain Gages, Vantage Press, New York 1985.
– "The Ten Dollar Loadcell", Exp Tech, Feb 1988.
Ort, W, "Eine Neue Technologi zur Herstellung von Dünnfilm-Denungsmesstreifen", HBM Messtechnische Briefe, 13, 1977.
Ruge, A C, U S patent 2 360 972.
Simmons, E E, U S patent 2 292 549.
Smith, C S, "Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon", Phys Rev, 94, 1954.
Tatnall, F G, Tatnall on Testing, Chapman & Hall, London 1966.
Timoshenko, S P, History of Strength of Materials, McGraw-Hill, London 1953.

The History of the Bonded Resistance Strain Gauge

Summary

The bonded resistance strain gauge was invented by the Americans E E Simmons and A C Ruge, independently of each other, at the end of the 1930s. Both needed to be able to measure dynamic mechanical stresses and there was no suitable gauge. Ruge soon realised the commercial value of the gauge and developed it into an industrial product. The company BLH (Baldwin – Lima – Hamilton) took care of marketing the product, and since the beginning of the forties the gauge has steadily increased in importance. Today it is the most important tool in the study of the strength of materials and, as a measuring device it dominates the market for force-, weight-, pressure- and acceleration gauges.

The resistance strain gauge consisted originally of a thin wire shaped into grid form and called a wire strain gauge. At the beginning of the 1950s the foil strain gauge was made and today it dominates the market. It is made by photo-etching a metal foil which is bonded to an insulating plastic foil.

The semi-conductor strain gauge, which is a by-product of transistor development, is nowadays mass produced as pressure and acceleration gauges, but it is also integrated in cheap household and bathroom scales.

As early as 1945 Sweden was in the process of developing her own wire strain gauge. The reason for this was that the aircraft industry was in need of equipment for testing the strength of materials and it was difficult to import such equipment. This work was carried out at the Aeronautical Research Institute of Sweden (FFA) under the direction of Gotthard Gustafsson.

The birth and development of the resistance strain gauge is described together with some of the patent disputes which took place.