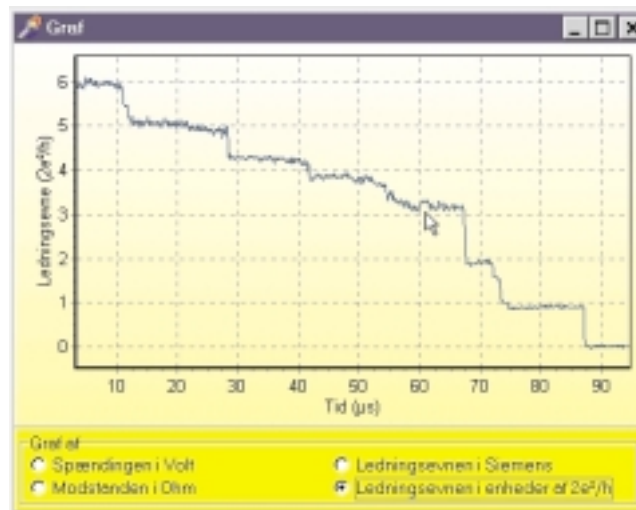
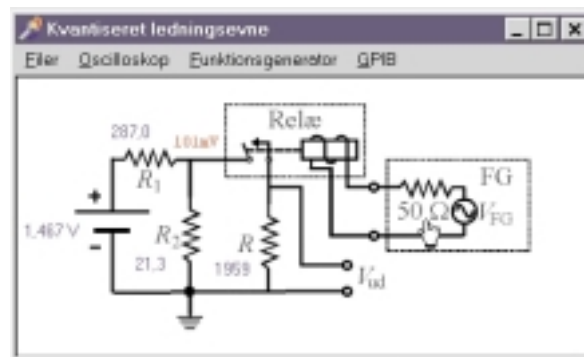


Skolefysikprojekt

*Udvikling af en brugervenlig opstilling til observation
af kvantiseret ledningsevne i en relækontakt*

Kim Hansen

December 1999



Indhold

1	Indledning	2
2	Teori	3
3	Opstilling	3
3.1	Dannelsen af nanokontakter i et relæ	3
3.2	Udgangsspændingen	4
3.3	Beregning af ledningsevnen	5
3.4	Oscilloskopet og funktionsgeneratoren	5
4	Computerstyring af opstillingen	6
4.1	Dataoverførsel og kommunikation med General Purpose Interface Bus	6
4.2	DELPHI og WINDOWS-programmering	6
5	Øvelsesprogram	7
5.1	Etablering af kredsløbets parametre	7
5.2	Kontrolpanelet	8
5.3	Indstilling af funktionsgeneratoren	9
5.4	Problemet med kontaktprel	9
5.5	Avanceret trigning og observation af kvantiseret ledningsevne	10
6	Mulige forbedringer af opstillingen	12
7	Konklusion	13

1 Indledning

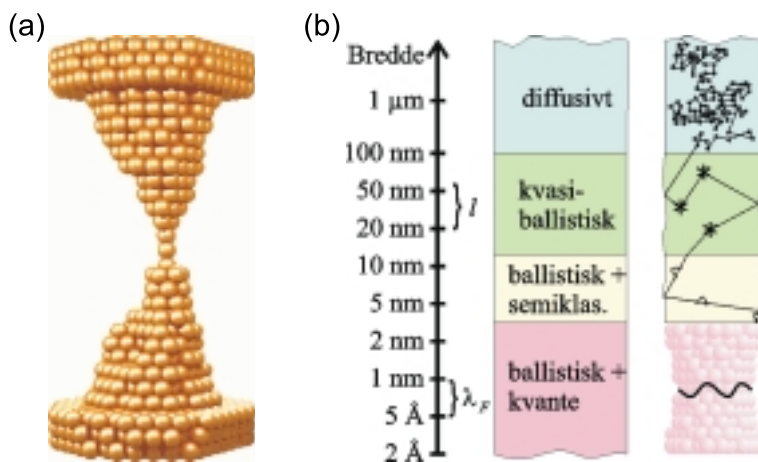
Jeg har i løbet min tid som Ph.D. studerende på Institut for Fysik og Astronomi arbejdet meget med at måle de elektriske egenskaber af metalkontakter med en diameter ned til et enkelt atom — såkaldte nanokontakter, se fig. 1(a). Da størrelsen af sådanne kontakter er meget mindre end den middelfri vejlængde l for elektronerne og sammenlignelig med de strømbærende elektroners de Broglie- eller Fermibølgelængde λ_F er de elektriske transportegenskaber væsentligt ændrede for nanokontakter i forhold til tilsvarende makroskopiske kontakter, som illustreret på fig. 1(b).

En af de mest fremtrædende og interessante fænomener, man kan observere i de mindste atomare kontakter, er, at ledningsevnen $G = R^{-1}$ ofte er tæt på et helt antal af den såkaldte *fundamentale kvanteenhed for ledningsevne*

$$G_0 = \frac{2e^2}{h} \approx 77,48 \mu\text{S} \approx \frac{1}{12,9 \text{ k}\Omega} \quad (1)$$

hvor e er elementarladningen og h er Plancks konstant. Man siger løst, at ledningsevnen er *kvantiseret* i enheder af G_0 . Kvantiseringen følger af ledningselektronernes bølgeegenskaber, som beskrevet i teori afsnittet.

Ud over et godt digitaloscilloskop kræves der intet særligt udstyr for kvalitativt at studere dette kvantefænomen. Ønsker man mere kvantitative resultater kræver det, at man kan styre oscilloskopet



Figur 1: (a) Øjeblikbillede fra en computersimulation af en guldnanokontakt, der strækkes. Kontakten består på sit tyndeste sted af en kæde af tre guldatomer. Beregningerne er udført ved CAMP, DTU. (b) Illustration af de forskellige transportregimer, der gennemløbes, når diameteren på en kontakt gradvist formindskes. Det diffusive regime er det, der kendes for makroskopiske legemer, hvor modstanden R er bestemt af geometrien og resistiviteten (som bestemt ved l). Når en ledning får en diameter, der er sammenlignelig med eller mindre end l , bliver spredning af elektroner på kontaktens sider af større og større betydning og bevægelsen bliver gradvist ballistisk. I dette regime afhænger modstanden ikke længere af resistiviteten. For kontakter, der har en udstrækning, som er sammenlignelig med λ_F , bliver elektronernes bølgeegenskaber vigtige. Da en ledningselektron er begrænset til udelukkende at bevæge sig inde i metallet, bliver der pålagt grænsebetingelser på dens bølgefunktion på kanten af kontakten. Dette giver anledning til dannelsen af stående bølger på tværs af tråden — elektronens tværgående bevægelse bliver kvantiseret. De angivne intervaller på l og λ_F passer med værdierne for metaller som guld, sølv, kobber og natrium ved stuetemperatur.

fra en PC. Ydermere skal man kunne overføre data fra oscilloskopet til videre analyse på PCen. Det er oplagt at opbygge en sådan opstilling på instituttet og lade eksperimentet indgå i den vifte af tilbud, vi udbyder til besøgende gymnasiaster.

Denne rapport beskriver de første spæde skridt i den retning. Udviklingen af computerstyringsdelen er for omfattende til at blive dækket fuldstændig inden for rammerne af et skolefysikprojekt. Færdiggørelsen af denne del af opstillingen vil i stedet blive udbudt som et bachelorprojekt.

2 Teori

Som nævnt i indledningen er ledningsevnen for de mindste metalliske nanokontakter kvantiseret i enheder af G_0 , som er givet ved ligning (1). Den blotte tilstedeværelse af h i udtrykket for G_0 indikerer, at forklaringen på kvantiseringen skal findes i kvantemekanikkens verden, eller sagt på en anden måde — i bølgeegenskaberne for de ledningsbærende elektroner.

Det viser sig, at antallet af ledningskvanter en nanokontakt kan bære, er nært knyttet til λ_F . Diameteren af f.eks. et guldatom svarer ret nøje til $\lambda_F/2$. For en enkelatomar guldkontakt som vist i fig. 1(a) vil ledningselektronerne defor kunne danne en stående bølge med knude i kanten af atomet og bug i midten. Denne ‘grundtilstand’ vil have bølgelængden $\lambda \approx \lambda_F$. En enkelt svingningstilstand bidrager til den totale ledningsevne med $G_0 T$, hvor $0 \leq T \leq 1$ kaldes for transmissionssandsynligheden. For tilstrækkeligt *adiabatiske* (bløde) kontaktgeometrier er $T = 1$. Jo mere ru kontaktgeometrien er, jo mindre bliver T . For den ret adiabatiske kontakt, der er vist på fig. 1(a) kan man regne ud, at $T \approx 0,95$, så ledningsevnen bliver $G \approx 0,95 G_0$ svarende til en modstand på ca. 13,5 k Ω .

For en diatomar kontakt er der udover ‘grundtonen’ (nu med bølgelængde $\lambda \approx 2\lambda_F$) også plads til en ‘overtone’ ($\lambda \approx \lambda_F$), så der nu er to svingningstilstande, der bidrager til ledningsevnen. Jo større kontakten er, jo flere tilstande bliver tilladte og jo større bliver ledningsevnen. Mere generelt kan man skrive ledningsevnen af en nanokontakt som

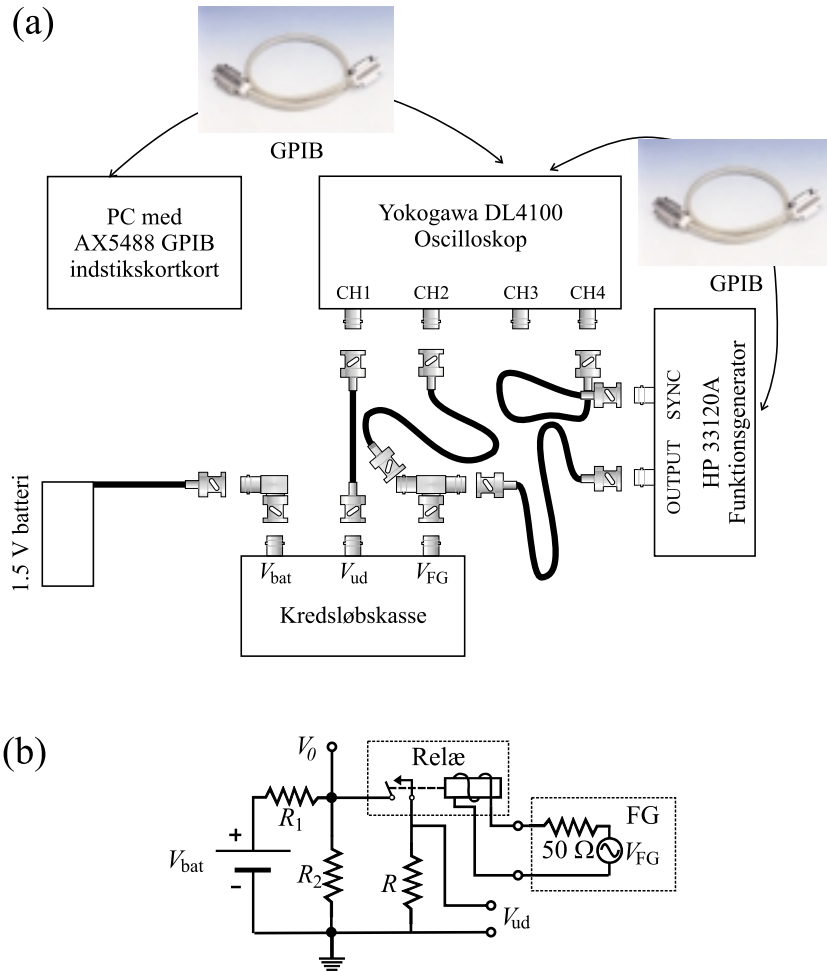
$$G = G_0 \sum_{i=1}^N T_i \quad (2)$$

hvor T_i er transmissionssandsynligheden for den i te svingningstilstand i kontaktens tyndeste tværsnit, og N er antallet af tilladte tilstande. Dette centrale udtryk kaldes for *Landauers formel* [1, 2, 3]. I en adiabatisk kontakt er $T_i = 1$ for $i = 1 \dots N$, og vi ser af Landauers formel, at $G = N G_0$ [4]. Ledningsevnen for adiabatiske kontakter er altså kvantiseret i enheder af G_0 ! For mere realistiske kontaktgeometrier er transmissionssandsynlighederne af de tilladte tilstande generelt lidt mindre end én [5]. Til gengæld kan ellers forbudte tilstande bidrage til ledningsevnen med små transmissionssandsynligheder, der er lidt større end nul. I praksis betyder dette, at de mindste nanokontakter vil have en ledningsevne, der oftest er lidt mindre end et helt antal G_0 , omend denne tommelfingerregel gradvist bryder sammen for $N > 3$.

3 Opstilling

3.1 Dannelsen af nanokontakter i et relæ

Den til dette projekt designede opstilling er vist i fig. 2. Det centrale element i opstillingen er det elektromekaniske relæ, der sidder sammen med tre modstande i et simpelt elektrisk kredsløb [fig. 2(b)] i kredsløbskassen vist på fig. 2(a). I relæet åbner og lukker man kontakten ved at påvirke et bevægeligt kontaktanker med en magnetisk kraft fra en indbygget spole. Når kontakten er lukket



Figur 2: (a) Opstilling og (b) diagram af kredsløbskassen og dens forbindelser til omgivende apparatur.

er der god mekanisk kontakt mellem de to elektroder, og strømmen kan løbe forholdsvis uhindret igennem mange små punktkontakter mellem elektroderne.

Idet kontakten åbnes, bevæger ankeret sig væk fra den faste modelektrode og de små punktkontakter brydes meget hurtigt en efter en. I under $\frac{1}{1000}$ s vil der, lige inden kontakten endeligt afbrydes, kun være en enkelt punktkontakt tilbage. Denne sidste kontakt strækkes og bliver til en nanokontakt lignende den, der er vist i fig. 1(a) for til sidst at gå itu [6, 7]. I opstillingen benyttes et relæ af typen RS fra Matsushita Automation Controls, som har vist sig at være særligt egnet til denne type eksperimenter, idet kontaktmaterialets hovedbestanddel er guld [6].

3.2 Udgangsspændingen

Under kontaktafbrydelsen falder ledningsevnen. Dette kan vi følge ved at påtrykke en spænding over kontakterne vha. 1,5 V batteriet og spændingsdeleren R_1 og R_2 . Herved løber der en strøm I gennem nanokontakten, som giver anledning til et spændingsfald V_{ud} over modstanden R . Tidsudviklingen af ledningsevnen følges ved at måle $V_{ud}(t)$ med et hurtigt digitaloscilloskop [6, 7]. Hvilespændingen

V_0 over den åbne relækontakt er givet ved

$$\boxed{V_0 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{\text{bat}}} \quad (3)$$

Modstandene i spændingsdeleren er valgt til $R_1 = 287 \Omega$ og $R_2 = 21,3 \Omega$, så hvilespændingen V_0 over den åbne relækontakt er ca. 100 mV. De lave værdier af R_1 og R_2 sikrer, at V_0 kun falder med ca. 1% når kontakten lukkes.¹ Vi kan derfor med rimelighed regne V_0 for konstant. Til gengæld belastes batteriet noget, og man skal huske at afkoble det efter udførelsen af eksperimenterne.

3.3 Beregning af ledningsevnen

Strømmen I , der løber gennem relækontakten med ledningsevnen G og modstanden R passerer den totale modstand $G^{-1} + R$. Strømmen opfylder derfor Ohms lov

$$V_0 = (G^{-1} + R)I$$

så I er givet ved

$$I = \frac{V_0}{G^{-1} + R}$$

Udgangsspændingen er igen givet ved Ohms lov som

$$V_{\text{ud}} = RI = \frac{V_0}{1 + (GR)^{-1}} \quad (4)$$

Strømmålermodstanden R er i opstillingen valgt til 1,96 k Ω . Størrelsen af R er en afvejning mellem udgangsspændingens størrelse og tidsopløsningen τ , som er begrænset af R og strøkapacitansen C_p på udgangen via $\tau \approx RC_p$. Jo større R , jo større udgangsspænding og jo værre tidsopløsning. Den valgte værdi af R er passende, *såfremt* koaxialkablet mellem V_{ud} og oscilloskopets CH1 er meget kort (5–10 cm fra ende til anden)! Med et almindeligt langt kabel bliver C_p så høj, at skarpe strukturer i tidsudviklingen udtværes.²

Ledningsevnen G kan isoleres fra ligning (4), og vi får

$$\boxed{G = \frac{1}{R} \frac{V_{\text{ud}}}{V_0 - V_{\text{ud}}}} \quad (5)$$

3.4 Oscilloskopet og funktionsgeneratoren

Under en kontaktafbrydelse måles V_{ud} 1000 gange af oscilloskopet i løbet af typisk 100 μs . Disse målinger overføres vha. en såkaldt General Purpose Interface Bus (GPIB) til PC'en, hvor spændingerne f.eks. kan omregnes til ledningsevnen i kontakten vha. ligning (5) og vises som en $G(t)$ graf. GPIB forbindelsen benyttes også til at styre diverse indstillinger på oscilloskopet via PC'en.

Et større antal kontaktafbrydelser studeres ved at påtrykke relæspolen et lavfrekvent (0,2–2 Hz) periodisk sinussignal overlejret med et jævnspændingssignal fra en funktionsgenerator: Relæet åbner ved en lidt lavere spænding end den lukker. Et vigtigt element i eksperimentet er at få indstillet amplituden af sinussignalet og jævnspændingen, så spolespændingen går meget langsomt under

¹I et Thevenin ækvivalensdiagram svarer V_{bat} , R_1 og R_2 til et spændingsforsyning med tomgangsspænding V_0 og indre modstand $(R_1^{-1} + R_2^{-1})^{-1} \approx 20 \Omega$, som udgør ca. 1% af R .

²Et almindeligt koaxialkabel har en kapacitans på 100 pF/m, så med et 1 m kabel bliver tidsopløsningen 0.2 μs svarende til typisk 20 datapunkter.

åbnespændingen. Herved bliver kontaktåbningen blidest mulig, og tidsudviklingen af nanokontaktens ledningsevne varer længere tid. Visse af funktionsgeneratorens indstillinger kan ligeledes stilles fra PC'en via en GPIB forbindelse.

Det benyttede oscilloskop meget dyrt (ca. 80.000 kr.) og har talrige avancerede faciliteter. Den benyttede funktionsgenerator er ligeledes kostbar (ca. 15.000 kr.). Jeg har alligevel valgt at benytte dette avancerede forskningsudstyr, fordi jeg i forvejen er fortrolig med det, og dermed kunne bruge størstedelen af den begrænsede tid på at få computerstyringen op at stå. Jeg forsøgte også i de indledende faser at benytte et mindre avanceret Hameg storage oscilloskop med mulighed for GPIB tilslutning, som allerede forefandt i skolefysiklaboratoriets apparatursamling. Dette var hurtigt nok til formålet, men viste sig ikke at være tilstrækkeligt fleksibelt mht. til triggningsfaciliteter.

Jeg har også haft lejlighed til at benytte et Tektronix TDS 210 oscilloskop (6.500 kr.) i opstillingen, som viste sig at være fuldt ud tilstrækkeligt. Desværre var der på det pågældende oscilloskop ikke mulighed for at tilslutte eksterne enheder, men det kan monteres for ca. 1.400 kr. Der er heller ingen speciel grund til at benytte en funktionsgenerator, som kan styres via GPIB, det gør det bare 'sjovere' arbejde med, fordi man så kan styre alt fra PC'en. En ganske almindelig funktionsgenerator er tilstrækkelig. Hvis man ikke har oscilloskopet i forvejen er det dog stadig en betragtelig investering, som vil være for kostbar for et typisk gymnasielaboratorium, hvis oscilloskopet ikke samtidig skal benyttes i andre eksperimenter. Investeringen kan bedre retfærdiggøres i forbindelse med en fast opstilling på instituttet, som vil blive benyttet af mange besøgende gymnasiater.

4 Computerstyring af opstillingen

4.1 Dataoverførsel og kommunikation med General Purpose Interface Bus

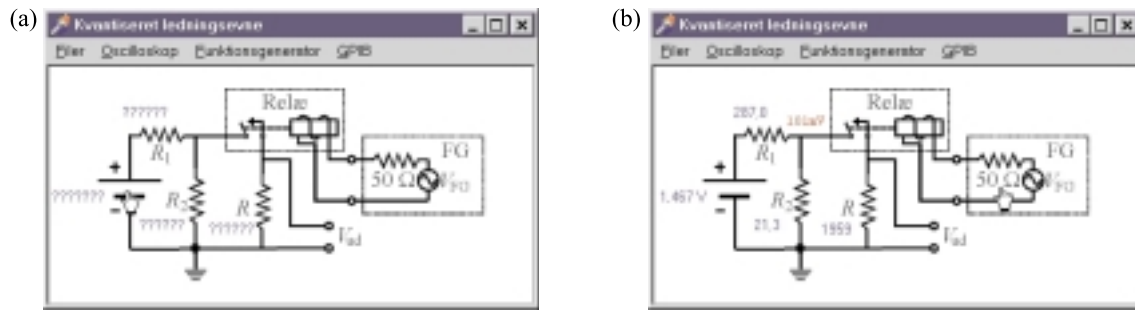
Som tidligere nævnt fordrer kvantitative studier af kvantiseret ledningsevne, at man kan overføre data fra oscilloskopet til en computer, som kan gemme og behandle de rå data. En mulighed er at benytte seriel overførsel via en COM-port på en PC til dataoverførslen. Jeg har imidlertid dårlige erfaringer med denne form for kommunikation, idet dataoverførslen tager umanerlig lang tid. Ydermere kan man kun tilslutte ét instrument for hver COM port. Et bedre alternativ er at installere et GPIB indstikskort³ i PC'en, hvorved man får adgang til hurtig parallel dataoverførsel og styring af op til 15 enheder på samme tid. Stikket på et GPIB kabel er udformet, så man kan sætte flere stik oven på hinanden, ligesom telefonstik.

De GPIB indstikskort, der typisk benyttes i forskningsmiljøer er meget avancerede og hurtige, og derfor også temmeligt dyre, omkring 4.500 kr. Jeg fandt dog et kort af lidt ældre model fra det taiwanesiske firma Axiom med typenr. AX5488 til 1.400 kr. Dette blev indkøbt via Danbit til formålet. Desværre var den medfølgende dokumentation mildest taget mangelfuld og vildledende, men efter en del emailkorrespondence med hovedkontoret i Taiwan, fik jeg endelig de nødvendige drivere tilsendt med tilhørende dokumentation.

4.2 Delphi og Windows-programmering

Jeg har tidligere haft god erfaring med at styre oscilloskopet og funktionsgeneratoren vha. selvudviklede PASCAL programmer under et MS-DOS operativsystem. Omend dette operativsystem er meget stabilt giver det dog også en temmelig kedelig og utidssvarende tekstbaseret brugergrænseflade. Jeg har derfor i dette projekt taget skridtet og lavet et styreprogram med det visuelle program-

³Man kan nu også få et 'smart' kabel, som sættes i printerporten og ender i et GPIB stik i den anden ende. Herved slipper man for besværet med at installere et kort i PC'en, og samtidig får man høj fleksibilitet, idet kablet kan benyttes på alle PC'ere. Prisen er desværre ret pebret, 3.700 kr!



Figur 3: (a) Brugerfladen, der dukker op ved opstart. Spørgsmålstegnene på diagrammet indikerer manglende modstands- og spændingsværdier, som studenten skal finde inden han kan gå videre med øvelsesprogrammet. (b) Efter etablering af kredsløbsparametrene får man ved at klikke på funktionsgeneratoren adgang til et kontrolpanel til funktionsgeneratoren og oscilloskopet, som benyttes i resten af øvelsen.

meringssprog DELPHI i et WINDOWS 95/98 miljø. DELPHI er en objektorienteret videreudvikling af PASCAL, som er meget brugervenligt.

Der er dog visse tekniske komplikationer i forbindelse med styring af eksterne enheder fra et program i WINDOWS 95/98. Jeg vil ikke her kede læseren med alle de perfide detaljer. Dog vil jeg nævne, at kommunikationen med GPIB kortet foregår noget mere besværligt og indirekte end i et MS-DOS miljø. WINDOWS 95/98 er meget restriktiv, hvad angår kommunikation med eksterne enheder. Man kan ikke adressere dem direkte, men er nødt til at lade kald til kortet gå over en såkaldt driver i form af en DLL fil. For at kalde rutinerne i driveren, skal man gå gennem et såkaldt language-interface til det programmeringssprog, man har valgt — i dette tilfælde DELPHI. Dette language-interface er i sig selv besværligt at bruge, så jeg har implementeret endnu et 'lag' (bibliotek) oven på det, som gør kaldene til kortet mere overskuelige og lettere at forstå, og som automatisk håndterer fejlmeddelelser. Ovenpå dette bibliotek følger apparatspecifikke biblioteker til funktionsgeneratoren og oscilloskopet, som indeholder procedurer til f.eks. at indstille amplituden på signalet fra funktionsgeneratoren eller bede oscilloskopet om at begynde at sende data til PCen. Øverst i hierakiet ligger hovedprogrammet som styrer både oscilloskop og funktionsgenerator, initialiserer AX5488 kortet ved opstart, aflæser værdien af skydeknapper, tegner grafer mm.

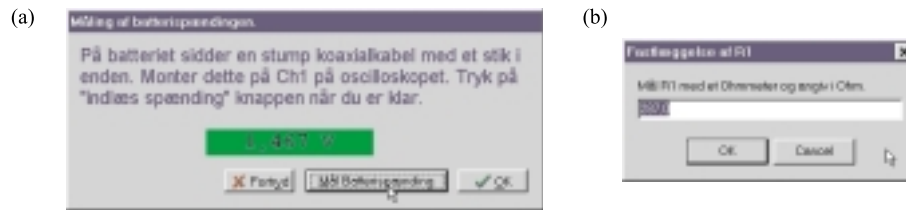
5 Øvelsesprogram

Inden man starter programmet (som hedder KVANTISERET), skal man have tændt for oscilloskopet og funktionsgeneratoren. Under programstarten indstilles oscilloskopet og funktionsgeneratoren via programmet til en standardindstilling, som er et godt udgangspunkt for det videre forløb i øvelsen. Efter dette dukker brugergrænsefladen op, som vist i fig. 3(a).

5.1 Etablering af kredsløbets parametre

For at kunne beregne nanokontakternes ledningsevne, er det jf. ligning (3) og (5) nødvendigt at kende modstandsværdierne og batterispændingen i diagrammet på fig. 2(b). Disse skal findes, inden man kan gå videre. Når man klikker på spørgsmålstegnene eller komponenterne bliver man stillet over for små opgaver/måleprogrammer på skærmen som der er givet eksempler på i fig. (4).

F.eks. dukker instruksenen i fig. 4(a) op, når man klikker på batteriet. Her benytter man oscil-



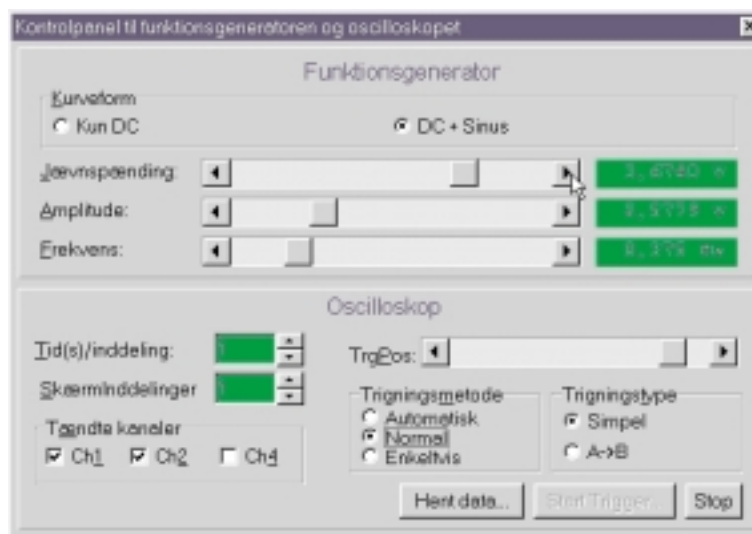
Figur 4: Eksempler på opgaver i forbindelse med bestemmelsen af kredsløbets parametre. (a) Bestemmelse af batterispændingen. (b) Bestemmelse af R_1 .

oskopets muligheder for automatisk måling af den spændingens middelværdi. Målingen af modstandene forgår med et almindeligt multimeter med testledninger, som sættes på modstandene, der sidder i kredsløbskassen på fig. 2(a). Dette punkt er ikke særligt brugervenlig i denne prototypeopstilling, idet komponenterne sidder i en fuglerede i kassen, men ved sammenligning med diagrammet skulle det være muligt at finde de relevante modstande. Om ikke andet giver det studenten en mulighed for at få et bedre indblik i, hvordan kredsløbet er opbygget, og hvis det skulle blive for uoverskueligt, kan man blot vælge standardværdien, som er angivet i dialogboksen.

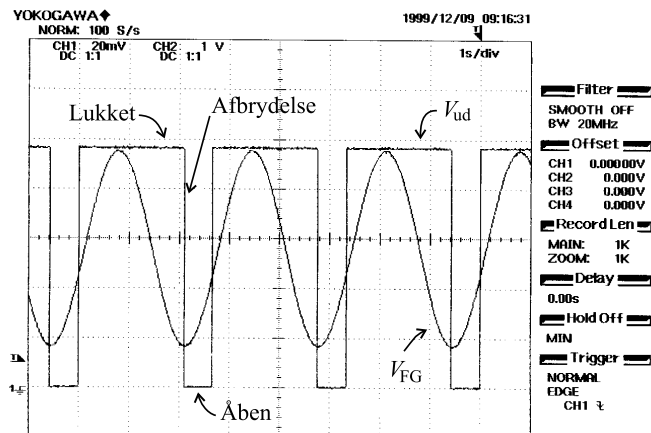
Efterhånden som man bestemmer parametrene bliver de indskrevet på diagrammet, som vist på fig. 3(b). Når man har bestemt V_0 , R_1 og R_2 beregnes værdien af V_0 vha. ligning (3), og vises i diagrammet. Efter målingen af den sidste parameter R , skal man klikke på funktionsgeneratoren for at komme videre i øvelsesprogrammet.

5.2 Kontrolpanelet

Når man klikker på funktionsgeneratoren, dukker kontrolpanelet vist på fig. (5) op, hvor man har forskellige muligheder for at styre funktionsgeneratoren og oscilloskopet. Når panelet første gang aktiveres er funktionsgeneratorens kurveform indstillet på Kun DC. Med skydeknappen Jævnspænding kan man nu glidende indstille den spædning der påtrykkes relæspolen via funktionsgeneratoren.



Figur 5: Kontrolpanelet.



Figur 6: Øjebliksbillede af oscilloskopets skærm ved den endelige indstilling af funktionsgeneratorens parametre for blidest mulige kontaktafbrydelser.

Forløbet af funktionsgeneratorspændingen kan samtidigt observeres på oscilloskopet, som er sat til 1 s/inddeling på tidsaksen og Automatisk trigning. Samtidig kan man se, hvorledes udgangsspændingen V_{ud} opfører sig. Når kontakten er åben, er $V_{ud} = 0$ V, hvilket ses af diagrammet på fig. 2(b) eller af ligning (4). Når kontakten derimod er lukket, er spændingen $V_{ud} \approx V_0$.

5.3 Indstilling af funktionsgeneratoren

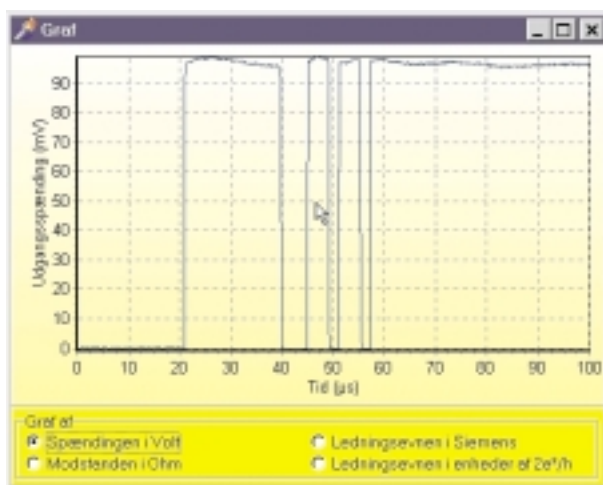
Man kan nu eksperimentere med jævnspændingsskydeknappen og se hvorledes relæet lukker (V_{ud} bliver høj) når spændingen skrues op, og åbner igen (V_{ud} bliver lav) når den sænkes et stykke. Dette giver en fornemmelse for åbne/lukkebetingelserne for relæet. Denne metode kan dog ikke bruges til at fastlægge åbne- og lukkespændingerne på spolen, eftersom funktionsgeneratoren skifter område flere gange, når man skruer op eller ned for spændingen. Dette medvirker, at der kommer kortvarige udfald eller pulser på udgangen, som får relæet til enten at åbne eller lukke for tidligt.

Som det næste skal man nu vælge DC + Sinus på panelet og skrue Amplitude op på 2–3 V. Ved at justere på Jævnspænding kan man nu få relæet til at åbne og lukke i takt med at sinusspændingen fra funktionsgeneratoren går op og ned. Frekvensen skrues lidt ned, så man bedre kan følge med i, hvad der sker på oscilloskopskærmen. Man skruer nu langsomt *op* for Jævnspænding indtil relæet netop holder op med åbne når spolespændingen er lavest. Herefter *sænker* man Jævnspænding i mindst mulige skridt, så åbne-lukke sekvensen netop vender tilbage.

Et øjebliksbillede fra oscilloskopets skærm ved den endelige indstilling er gengivet i fig. (6). Her ses det at den minimale funktionsgeneratorspænding er næsten sammenfaldende med kontaktafbrydelsen. Da bunden af en sinuskurve er meget flad, bevirker dette, at kontaktafbrydelsen bliver så blid som muligt. Herved forlænges levetiden af nanokontakterne.

5.4 Problemet med kontaktprel

Man kan nu begynde at se nærmere på kontaktafbrydelserne. På fig. (6) ser kontaktafbrydelserne ud til at de foregår instantant. Dette skyldes dog den benyttede tidsinddeling, som er 1 s/inddeling. Som tidligere nævnt foregår de interessante processer oftest i løbet af blot 100 μ s. Man skal derfor nu ændre på Tid(s)/inddeling på kontrolpanelet, så den bliver f.eks. 10 μ s. Vi er nu ikke længere interesserede i at se funktionsgeneratorsignalet, så kanal 2 på oscilloskopet slås fra via panelet.



Figur 7: Typisk forløb af udgangsspændingen, når trigningstype er sat til **Simpel**. Oscilloskopet har trigget på kontaktprel under lukningen af kontakten.

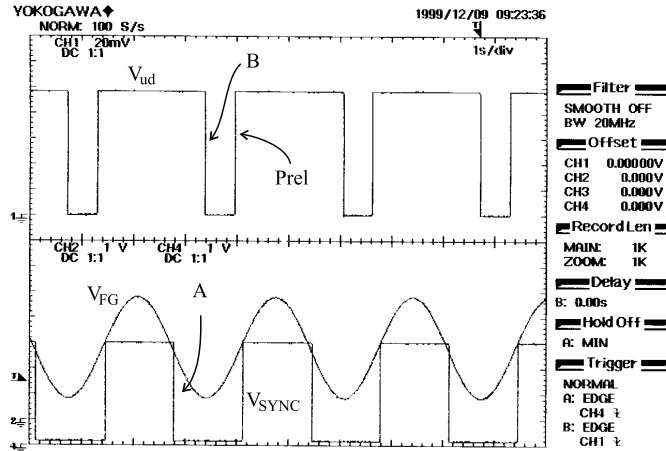
Man ser nu striber på skærmen hvor V_{ud} er enten høj eller lav. Vi er interesserede i kun at studere overgangen fra høj til lav (kontaktafbrydelsen). Dette gøres ved at indstille Trigningsmetode til **Normal**, hvorved oscilloskopet kun trigger når spændingen falder under 10 mV på CH1. Positionen af triggerpunktet kan justeres med skydeknappen **TrgPos**.

Man bemærker nu, at ca. hver anden spændingsmåling, der vises på oscilloskopet, ikke svarer til de afbrydelser, vi ønsker at studere. Et eksempel herpå er vist i fig. (7). Den viste graf fremkom ved først at trykke på **Stop** knappen på panelet for at stoppe datatagningen, og derefter på **Hent data...** knappen, som overførte data fra oscilloskopet til PC'en, hvorefter de blev vist i en graf. Til tider $< 20 \mu s$ er $V_{ud} = 0 V$ svarende til en åben kontakt, mens den til tider $> 57 \mu s$ er ca. 100 mV svarende til en lukket kontakt. Vi har altså her zoomet ind på processer, der foregår når kontakten sluttet. I det resterende tidsrum går spændingen op og ned flere gange, og oscilloskopet har trigget på første gang spændingen er gået lav ved $t = 40 \mu s$. Det, vi ser, kaldes for *kontaktprel* og opstår, når ankeret klapper ind i modelektroden. Kollisionen mellem de to elektroder er så voldsom, at ankeret når at springe tilbage et par gange i løbet af ca. $40 \mu s$ inden den falder helt til ro.

5.5 Avanceret trigning og observation af kvantiseret ledningsevne

Man kan benytte funktionsgeneratorens **SYNC** udgang sammen med trigningstypen **A→B** på kontrolpanelet til at frasortere den uønskede kontaktprel, som illustreret og forklaret på fig. (8). Dermed kan man nu endeligt fokusere på de interessante kontaktafbrydelser.

På dette tidspunkt af eksperimentet skal man væbne sig med tålmodighed, for i starten ser man ofte, at kontaktafbrydelserne forløber meget pludseligt over en tidsskala på omkring $1 \mu s$ uden at man observerer strukturer i udgangsspændingen. Det er som om elektroderne i begyndelsen ikke trækker en kontakt under afbrydelsen. Det skyldes formentlig, at der er et tynd lag af urenheder over elektroderne, som først skal skrubes væk eller gennembrydes for at trænge ned til det rene metal [6]. Efter gentagne afbrydelser vil man dog ofte observere en drastisk ændring i opførslen, hvor man pludseligt finder trappetrin i spændingen over en periode på ca. $100 \mu s$. Et eksempel på en sådan måling er vist i fig. 9, hvor både tidsudviklingen af modstanden i enheder af $k\Omega$ og



Figur 8: Øjebliksbillede af udgangsspændingen, funktionsgeneratorspændingen, og SYNC spændingen på oscilloskopet. SYNC signalet kan bruges til at definere en såkaldt A→B trigger på oscilloskopet. Begivenhed A indtræffer når SYNC signalet går lavt, mens begivenhed B indtræffer idet udgangsspændingen går lavt. Ved at vælge trigningstype A→B på panelet får man oscilloskopet til kun at vise spændingen når begivenhed A efterfølges af begivenhed B. Herved frasorteres den uønskede kontaktprel.

ledningsevnen i enheder af G_0 er vist til sammenligning for en bestemt afbrydelse.⁴

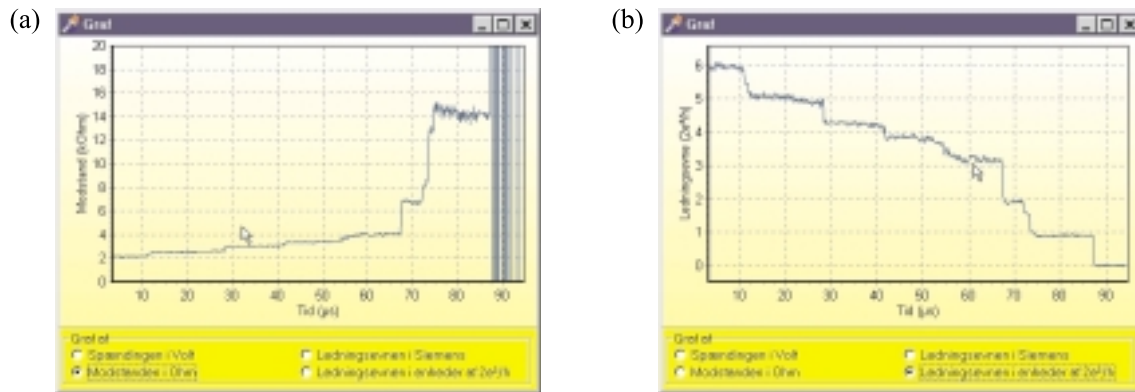
$G(t)$ grafen i fig. 9(b) er den mest interessante. Man ser her, at ledningsevnen gennemløber en række veldefinerede plateauer, hvor de fleste plateauer ligger tæt på et helt antal G_0 . Der ses tillige en række skarpe overgange mellem de enkelte plateauer. Den almindeligt accepterede fortolkning af denne opførsel er følgende [8]: Når en nanokontakt strækkes, forskydes atomerne i kontaktregionerne først væk fra deres ligevægtsposition, hvorved kontakten gradvist forlænges. Det mindste tværnsnitsareal i kontakten holdes næsten konstant under denne proces, hvorfor ledningsevnen er næsten upåvirket — ledningsevnen er på et plateau.

På et tidspunkt er atomerne blevet forskudt så langt væk fra deres ligevægtsposition, at kontakten bliver ustabil. Dette resulterer i en pludselig reorganisering af atomerne i kontaktregionen, hvorved kontakten bliver længere og ofte et atom tyndere. Dette giver anledning til det pludselige dyk i ledningsevnen. Igen strækkes kontakten gradvist, hvorunder et nyt plateau i ledningsevnen udvikles efterfulgt af endnu et dyk i ledningsevnen i forbindelse med en atomar reorganisering. Dette fortsætter, indtil vi når situationen vist i figur 1(a), som er en mulig kontaktgeometri lige før kontakten endeligt bryder til en ledningsevne på 0 G_0 .

I de sidste stadier af kontaktafbrydelsen er bevægelsen af elektronbølgerne på tværs af tråden i nogen grad kvantiseret, hvilket forskyder plateauerne mod hele værdier af G_0 . Det sidste plateau varer ca. 15 μ s og svarer til en enatomar kontakt. Ledningsevnen gennem denne kontakt er ca. 0,92 G_0 , hvilket er tæt på de beregnede 0,95 G_0 for kontakten vist i figur 1(a), som ganske givet svarer til en anden kontaktgeometri end den her målte.

Den skarpe iagtager vil have bemærket, at der er syv plateauer i ledningsevnen i figur 9(b) over et spænd i ledningsevne på 6 G_0 , hvilket måske kunne opfattes som et problem. Her må jeg blot pointere, at overgangene mellem de enkelte plateauer ikke nødvendigvis svarer til at en svingn-

⁴Dataoverførslen lykkes endnu ikke hver gang man trykker på Hent data... knappen. Faktisk er det endnu kun ca. hver fjerde gang, det sker fejlfrit. Jeg er overbevist om, at problemet kan løses, men jeg har ikke haft tid til at finde fejlen.



Figur 9: Målinger af tidsudviklingen af en kontaktafbrydelse i et relæ. (a) Modstanden i $k\Omega$ (b) ledningsevnen i enheder af G_0 . Tilfældig støj i signalet, efter kontakten er afbrudt, får den beregnede værdi af modstanden til at fluktuere mellem numerisk store positive og negative værdier.

ingstilstand bliver forbudt i tråden, men derimod til at kontaktens mindste tværsnit bliver et eller måske to atomer tyndere. I det hele taget viser det sig ved nærmere studier at hele kvantiseringsbilledet gradvist bryder sammen for $G > 3 G_0$, fordi vi ikke har at gøre med ideelle adiabatisk kontaktgeometrier.

6 Mulige forbedringer af opstillingen

Som tidligere nævnt er den her beskrevne opstilling ikke færdigudviklet og endnu ikke egnet til brug for besøgende gymnasiater. Her er opremset en række mangler og ønskelige forbedringer.

- Funktionsgeneratoren og oscilloskopet, der er benyttet her, er kostbart forskningsudstyr, som kun er udlånt til dette projekt. Der skal anskaffes eller findes andet passende udstyr. Som tidligere beskrevet kan mindre gøre det. Efterfølgende skal der implementeres et nyt bibliotek (unit) i DELPHI til at styre det andet oscilloskop. Samtidig skal hovedprogrammet tilpasses, idet styringen højst sandsynlig skal foregå på en anden måde.
- Fuglereden af komponenter i kredsløbskassen bør udskiftes med et mere gennemtænkt design, hvor det f.eks. er muligt at bruge et andet relæ.
- Der skal udarbejdes en elevvejledning.
- Styreprogrammet bør forbedres på følgende områder
 - Der bør være mulighed for at gemme indsamlede data i et eller flere passende formater, som studenten kan tage med sig hjem.
 - Der bør være mulighed for at printe grafer ud.
 - Dataoverførsel fra oscilloskopet foregår ikke særligt stabilt. Denne del af programmet skal ses efter i sømmene.
 - Designet af brugergrænsefladen er ikke helt gennemtænkt. F.eks. burde man nok dele kontrolpanelet for funktionsgeneratoren og oscilloskopet i et panel for hvert instrument.

- Under Filer i hovedmenuen er der et punkt, der hedder **Snyd lidt**. Når man trykker på den, indskrives diagrammets parametre fra en tidligere måling automatisk i diagrammet, så man hurtigt kan komme videre i øvelsesprogrammet. Denne facilitet har jeg benyttet flittigt under udviklingen af programmet, så jeg kunne komme til kontrolpanelet. Den bør selvfølgelig ikke findes i den endelige version ...
- Programmet tjekker i sin nuværende form ikke om der opstår fejl i kommunikationen mellem PCen og instrumenterne. Programmet kværner blot videre, hvilket kan resultere i at f.eks. oscilloskopet går ind i en ‘dead lock’, så den må slukkes og tændes igen og øvelsesprogrammet starte forfra.
- Når brugeren har fundet kredsløbets parametre, bliver han ikke gjort opmærksom på, at han kun kan komme videre ved at klikke på funktionsgeneratoren.

Der er derfor nok at gå igang med for en bachelorstudent ...

7 Konklusion

En fungerende opstilling til demonstration af kvantiseret ledningsevne i relæer er blevet opbygget. Opstillingen kan styre et digitaloscilloskop og en funktionsgenerator via en PC udstyret med et GPIB kort. Brugeren styrer opstillingen fuldstændig fra PCen via et DELPHI program i et WINDOWS 95/98 miljø.

Opstillingen er en prototype på en fast opstilling, der skal indgå i instituttets vifte af tilbud til besøgende gymnasieklasser. Færdigudviklingen af forsøget udbydes som et bachelorprojekt, med dette projekt som springbræt. DELPHI programmet er endnu ikke færdigudviklet og fejlfrit, men kan benyttes under vejledning.

Den viste måling af ledningsevnen i en brydende relækontakt i figur 9(b) synes at indikere, at ledningsevnen til en vis grad er kvantiseret i enheder af ledningskvantet $G_0 = 2e^2/h$. For nærmere at studere, i hvor høj grad ledningsevnen er kvantiseret, bør man indsamle data fra et større antal afbrydelser og lave et histogram over fordelingen af ledningsevnen [9]. Dette var ikke muligt indenfor tidsrammen af projektet. Det kunne ligeledes være interessant at lave målinger med andre relæer, for at studere hvilken betydning kontaktmaterialet har [6].

Litteratur

- [1] R. Landauer, IBM J. Res. Dev. **1**, 223 (1957).
- [2] M. Büttiker, Y. Imry, R. Landauer, and S. Pinhas, Phys. Rev. B **31**, 6207 (1985).
- [3] M. Büttiker, IBM J. Res. Dev. **32**, 63 (1988).
- [4] M. Brandbyge, J. Schiøtz, M. R. Sørensen, P. Stoltze, K. W. Jacobsen, J. K. Nørskov, L. Olesen, E. Lægsgaard, I. Stensgaard, and F. Besenbacher, Phys. Rev. B **52**, 8499 (1995).
- [5] M. Brandbyge, K. W. Jacobsen, and J. K. Nørskov, Phys. Rev. B **55**, 2637 (1997).
- [6] K. Hansen, E. Lægsgaard, I. Stensgaard, and F. Besenbacher, Phys. Rev. B **56**, 2208 (1997).
- [7] H. Yasuda and A. Sakai, Phys. Rev. B **56**, 1069 (1997).
- [8] G. Rubio, N. Agraït, and S. Vieira, Phys. Rev. Lett. **76**, 2302 (1996).

- [9] L. Olesen, E. Lægsgaard, I. Stensgaard, F. Besenbacher, J. Schiøtz, P. Stoltze, K. W. Jacobsen, and J. K. Nørskov, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 2147 (1995).