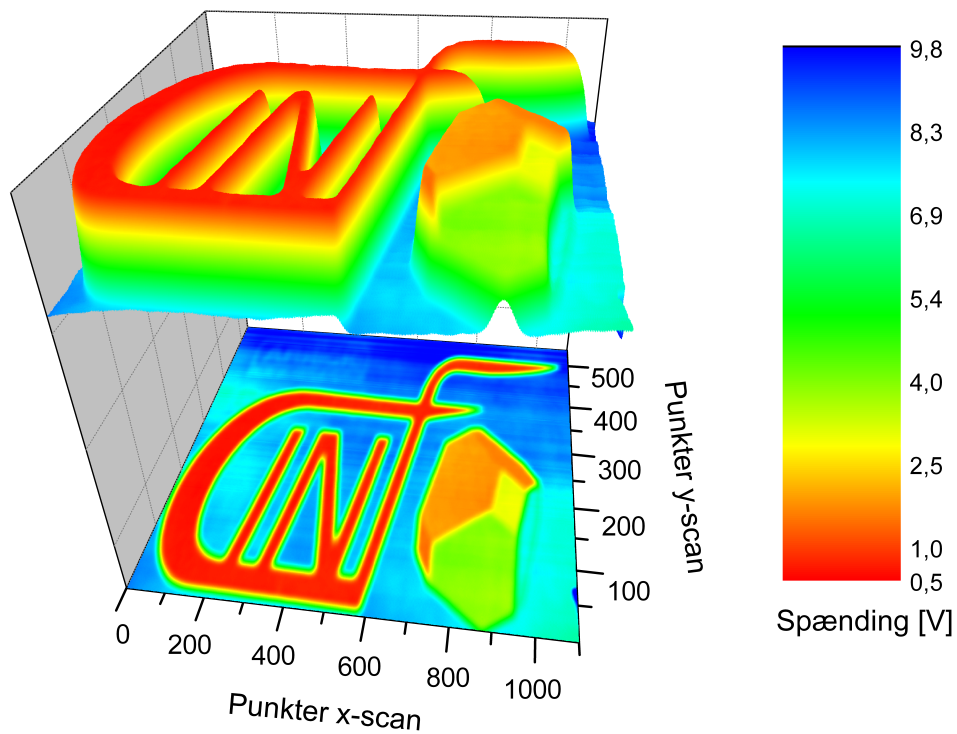


# FUNGERENDE MODEL AF ET SCANNING PROBE MIKROSKOP

---

FAGPROJEKT I FYSIK OG NANOTEKNOLOGI



JACQUELINE TROSBORG, *s072141*  
THOMAS LEHRMANN CHRISTIANSEN, *s072157*  
ADAM CARSTEN STOOT, *s072165*

VEJLEDER: JANE H. NIELSEN  
DTU FYSIK  
19. JUNI 2009



## Resumé

I moderne naturvidenskab og teknik er undersøgelsen af overflader og strukturer på mikro- og nanoskalaen af stor betydning. Scanning probe mikroskopi er i denne forbindelse et vigtigt værktøj, der bruges i vid udstrækning inden for mange felter, både i forsknings- og udviklingsøjemed. En forståelse af de fysiske principper, der ligger til grund for denne mikroskopiform, er altafgørende for at kunne udnytte dens potentiale til fulde. En måde at opnå denne indsigt på, er ved at konstruere en model af et scanning probe mikroskop; herved ledes man gennem de elementer, der er essentielle for at et sådant mikroskop kan fungere efter hensigten.

Denne rapport er skrevet på baggrund af et fagprojekt på retningen Fysik og Nanoteknologi på DTU, hvor en model af et scanning probe mikroskop er blevet udviklet og konstrueret. Scanningssystemet bestående af stepmotorer og et xyz-bord er blevet indkøbt til formålet, og fokus har derfor været på udvikling af den fornødne software, samt valg og optimering af prober. Igennem projektet har der været flere kandidater til prober, men valget faldt på følgende tre: En grammofonpickup, en kommercielt tilgængelig afstandssensor bestående af en IR-diode og en fotodetektor, samt en selvkonstrueret nåleprobe til at måle spændingsfordelinger. Virkemåden af disse prober er gennemgået i detaljer, særligt grammofonpickuppen, der krævede tilføjelse af et mindre elektrisk kredsløb samt støjoptimering af signalet, før målinger kunne foretages.

Softwaren er blevet udviklet med LabView, og en stor del af arbejdet er blevet lagt i at optimere serielkommunikationen mellem stepmotorernes styringsboks og computeren, således at scanninger kan foretages med rimelig hastighed. Herudover er programmet udviklet, så der kan scannes i tre scanningsmodes: Konstant højde, konstant signal med PI-styring samt en simpel "punktscanningsmode". Disse tre scanningsmetoder er hver afprøvet for en eller flere af proberne, og resultatet af scanningerne er dokumenteret og analyseret i rapporten.

Modellen demonstrerer mange kendetegn ved scanning probe mikroskopi, herunder vigtigheden af i detaljer at kende signalet fra ens probe, forskellen ved brug af forskellige prober, fordele og ulemper ved forskellige scanningsstrategier samt eksempler på probens egen indflydelse på billedet såsom tipfoldning. Med dette viser modellen med tydelighed både de forcer og de faldgruber, der ligger i scanning probe mikroskopi, og tjener herved formålet at illustrere koncepterne bag dette vigtige redskab.

Herudover har modellen opnået en eksistensret i sig selv i forbindelse med nåleproben. Med denne er det muligt systematisk og præcist at kortlægge spændingsfordelingen over en ledende overflade, samtidig med at topografien bliver kortlagt over et stort område på helt op til  $522 \text{ cm}^2$  – en sådan scanning i disse dimensioner er ikke mulig med kommercielt tilgængelige scanning probe mikroskoper. Hermed viser modellen sig fungerende som andet end bare en model; nemlig et praktisk anvendeligt scanning probe mikroskop.

# Indhold

<b>1</b>	<b>Introduktion</b>	<b>1</b>
1.1	Hvad er scanning probe mikroskopi? . . . . .	1
1.2	Krav til en model af et scanning probe mikroskop . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Proberne</b>	<b>3</b>
2.1	Valg af probe . . . . .	3
2.2	Den kommercielle afstandssensor . . . . .	4
2.3	Grammofonpickuppen . . . . .	6
2.4	Nåle-proben . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Scannerens mekaniske opbygning</b>	<b>11</b>
3.1	Krav til den mekaniske opbygning . . . . .	11
3.2	Arrick Robotics' xyz-bord . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Programmering og styring med LabView</b>	<b>13</b>
4.1	Kommunikation med C4 . . . . .	13
4.2	Den overordnede struktur af programmet . . . . .	13
4.3	De enkelte modes . . . . .	14
4.3.1	Den kommercielle afstandssensor . . . . .	14
4.3.2	Grammofonpickuppen . . . . .	16
4.3.3	Den elektrisk ledende nål . . . . .	16
<b>5</b>	<b>Målinger med scanneren</b>	<b>17</b>
5.1	Oversigt over scanninger . . . . .	17
5.2	Den kommercielle afstandssensor . . . . .	18
5.2.1	Konstant højde . . . . .	18
5.2.2	Konstant signal . . . . .	20
5.3	Grammofonpickuppen . . . . .	20
5.4	Nåleproben . . . . .	22
5.5	Opsummering . . . . .	23
<b>6</b>	<b>Konklusion</b>	<b>25</b>
<b>A</b>	<b>Eksempel på forskellige overfladetolkninger</b>	<b>28</b>
<b>B</b>	<b>Tabel over benyttede LabView-kommandoer</b>	<b>29</b>
<b>C</b>	<b>LabView-programmets frontpanel/GUI</b>	<b>30</b>



*INDHOLD*

<b>D</b>	<b>LabVeiw-programmet</b>	<b>31</b>
<b>E</b>	<b>Tabel over brugte figurer</b>	<b>36</b>
<b>F</b>	<b>Matlab script</b>	<b>37</b>

# Kapitel 1

## Introduktion

### 1.1 Hvad er scanning probe mikroskopi?

Da de første optiske mikroskoper blev udviklet i slutningen af det 16. århundrede, åbnede det for en hel ny og ukendt verden, der hidtil ikke havde været synlig for det menneskelige øje [1]. Efterhånden som linser og mikroskopkonstruktioner blev forbedret, blev den mulige forstørrelse og opløsning bedre og bedre, og snart udgjorde bølgelængden af synligt lys den største begrænsning. Denne begrænsning blev brudt med Ernst Ruskas transmissions elektronmikroskop i 1933, der udnyttede elektronernes korte de Broglie bølgelængde til at sænke diffraktionsgrænsen yderligere [2]. Elektronmikroskopet gjorde det dermed muligt at udforske strukturer helt ned på nanometer- og ångstrømskalaen, og sammen med det optiske mikroskop har det givet anledning til utallige videnskabelige opdagelser. De to typer mikroskoper er teknologisk set meget forskellige, men fælles for dem er, at det er elektromagnetiske bølger, der bliver brugt til at give information om overfladens struktur. Teknologiske fremskridt og nytænkning gav imidlertid for små 30 år siden plads for en helt ny type af mikroskoper, der bygger på et fundamentalt anderledes koncept.

I 1981 blev denne nye form for visualiseringsmetode introduceret med scanning tunnel mikroskopet (STM) [3]. Ved at udnytte den stærkt afstandsafhængige kvantemekaniske tunnelerings effekt, kunne man få en strøm til at løbe mellem en overflade og en meget spids tip kaldet proben. Med hjælp fra præcisionen af piezomotorer kunne man i et fint mønster scanne proben hen over overfladen og løbende registrere afstanden mellem de to; dette enten ved at måle størrelsen af den strøm, der løb mellem probe og overflade, eller ved hjælp af en feedbackløkke at regulere højden af proben, så strømmen forblev konstant. Denne nye form for mikroskopi satte startskuddet til udviklingen af en lang række af sådanne mikroskoper, der under et blev kendt som scanning probe mikroskoper (SPM).

Den store styrke ved scanning probe mikroskopi frem for andre former for mikroskopi er, at et væld af fysiske vekselvirkninger kan benyttes. I STM'et medfører tunnelerings stærke afstandsafhængighed, at overfladens topografi bliver afbildet ved scanningen, dog under indflydelse af overfladens elektronstruktur. I et andet hyppigt brugt SPM, atomic force mikroskopet, måles kraften mellem proben, en tynd cantilever, og overfladen, for på denne måde at gengive topografien sideløbende med flere andre overfladegenskaber. Alt efter hvilken fysisk vekselvirkning, der benyttes, vil forskellige egenskaber ved overfladen blive afsløret, og et SPM kan derfor skræddersys til netop den egenskab, man ønsker at undersøge. Dette inkluderer egenskaber, der ikke ville kunne kortlægges med optisk mikroskopi eller elektronmikroskopi.

Begrænsningen ved SPM'et ligger i selve scanningsprocessen. Ved at bruge en procedure,

hvor der scannes over tid, vil der være en tidslig forsinkelse fra det første til det sidste punkt på billedet af overfladen. Dette gør SPM'er sårbare overfor tidslige variationer i overfladen, der kan inkludere alt fra termisk drift af den betragtede prøve til kemiske ændringer i overfladen. Herudover stiller SPM'er forskellige krav til prøvens beskaffenhed. Som eksempel vil et STM kun virke på ledende overflader.

Trods disse begrænsninger er SPM'et et hyppigt anvendt visualiseringsværktøj, som finder anvendelse inden for mange grene af teknisk og naturvidenskabelig forskning og udvikling. At forstå virkemåden i SPM'et er derfor vigtigt for at kunne udnytte dets potentiale til fulde, og heri ligger motivationen for dette fagprojekt, hvor virkemåden gennemgås via konstruktionen af en fungerende model af et SPM.

## 1.2 Krav til en model af et scanning probe mikroskop

Formålet med dette projekt er altså at fremstille en fungerende model af et SPM. En model skal i sagens natur ikke nødvendigvis kunne udføre visualiseringsopgaver af samme kvalitet som et 'ægte' SPM. Snarere skal den illustrere princippet i SPM'et vha. en teknisk forsimplet, men identisk fungerende opstilling. Derfor er det vigtigt at præcisere, netop hvad der betragtes som kerneelementerne i et SPM, således at modellen kan indeholde disse og derved blive troværdig.

**Proben** Først og fremmest skal modellen indeholde den centrale del i ethvert SPM, nemlig en probe. Der skal findes en fornuftig og brugbar fysisk vekselvirkning mellem proben og prøven, som kan visualisere prøvens overfladeegenskaber; det være sig eksempelvis topografiske, elektriske eller magnetiske. Med brugbar menes især at signalet skal være entydigt. En vekselvirkning er selvsagt ubrugelig i et SPM, hvis ikke en given tilstand af prøven svarer entydigt til en bestemt signal.

**Scanningssystem** Hernæst skal modellen indeholde et scanningssystem, der kan holde proben og vha. software bevæge den i forhold til prøven i et fast mønster, så det ønskede udsnit af prøven bliver scannet. Da man i kommercielle SPM'er hyppigt benytter et feedbacksystem til, sideløbende med den 2-dimensionelle scanning, at regulere probens afstand til prøven, skal scanningssystemet altså samlet set kunne bevæge sig i 3 dimensioner.

**Visuel tolkning af data** Endelig skal data fra scanningen kunne oversættes til et billede, så vekselvirkningen mellem prøve og probe kan tolkes visuelt.

Dette er de 3 grundlæggende elementer, som modellen i sidste ende skal indeholde for at kunne illustrere princippet i et SPM. Herudover er det selvfølgelig ønskværdigt, at modellen opnår en opløsning og en effektivitet, så den kan udføre praktisk anvendelige scanninger.

I det følgende vil udviklingen af modellen blive gennemgået med fokus på proben, da denne udgør det primære fysiske aspekt af modellen. Dog vil også programmeringsfasen blive gennemgået, både fordi denne udgør en stor del af arbejdet med projektet, men også fordi det er her, de rå data fra den fysiske vekselvirkning indsamles og oversættes til de billeder, man som bruger præsenteres for. Afslutningsvis vil billederne fra den færdige, funktionelle model blive gennemgået og analyseret, og effekten af forskellige scanningstrategier vil blive berørt. Med dette vises resultatet af arbejdet på modellen, der gerne skulle give et indblik i de dele, der udgør et af de vigtigste værktøjer til undersøgelse af materialers overfladeegenskaber; scanning probe mikroskopet.

# Kapitel 2

## Proberne

### 2.1 Valg af probe

Den centrale del i ethvert SPM er proben. Det er vekselvirkningen mellem proben og overfladen, som bliver afbildet under scanning, og det er derfor udelukkende denne vekselvirkning, der afgør, hvilke egenskaber ved prøven, der bliver visualiseret. Der findes mange typer kommercielt tilgængelige SPM'er, der udnytter hver sin probe til at afbilde den ønskede egenskab. Disse egenskaber kan være alt fra kapacitative over magnetiske til termiske [3]. Listen over vekselvirkninger og probetyper er principielt kun begrænset af kreativiteten, og dette gør scanning probe mikroskopi til et meget alsidigt værktøj. Det er dog vigtigt at pointere, at selvsamme alsidighed gør det afgørende at forstå den valgte vekselvirkning og probe til bunds; en scanning foretaget med een probe giver ikke samme resultat som en scanning foretaget med en anden. En manglende forståelse af fysikken bag vekselvirkningen kan altså hurtigt lede til forkerte tolkninger og konklusioner på baggrund af de billeder, som scanningen har dannet. Dette ses ofte i forbindelse med STM, hvor det uden indsigt i de fysiske principper, der ligger til grund, er umuligt at vide, om det er overfladens topografi, elektrontæthed, atomnummer eller noget helt fjerde, der rent faktisk ses på scanningerne. Et eksempel på dette kan evt. ses på figur A.1 i bilag A, hvor der er vist 3 billeder af 3 forskellige atomtyper på en Ni-overflade taget med et STM.

Det er altså klart, at fysikken bag den probe, som vælges til modellen, skal forstås før en fornuftig tolkning af det færdige billede kan foretages. Den eneste anden begrænsning, der er i forhold til proben, er som tidligere nævnt, at signalet fra den skal være entydigt. To identiske tilstande af prøven må altså ikke kunne give to forskellige signaler. Det skal her understreges, at det ikke er et krav, at det omvendte gælder. To identiske signaler kan godt svare til to forskellige tilstande af prøven. Det er som før nævnt op til brugeren af SPM'et at tolke signalet rigtigt, hvilket kræver kendskab til både probe og prøve.

Igennem arbejdet med projektet er mange ideer til probe-prøve vekselvirkninger blevet luftet og afprøvet. Ideer, der spændte fra optiske målinger med et Michelson-interferometer til målinger med piezoresistive materialer. Der blev fokuseret på brugen af den lineært afstandsafhængige kapacitans, der kan måles mellem probe og prøve, hvis der påtrykkes en spænding over dem. Det viste sig dog, at en stor del af udfordringen bestod i selve fremstillingen af denne probe.

For at kunne koncentrere indsatsen omkring målingerne, flyttede fokus sig efterhånden over på sensorer, der allerede var fremstillet, og som kunne bruges med mere eller mindre tilpasning. Blandt disse var det optiske læsehoved fra en CD-afspiller. Inspirationen kom fra artikler [4], der dokumenterede, at det kunne lade sig gøre at benytte et sådant læsehoved til

nøjagtige afstandsmålinger. Problematikken i denne metode bestod imidlertid i, at det ikke er muligt at fremskaffe detaljerede oplysninger om tilslutningerne på et optisk læsehoved. Fremgangsmåden var derfor, vha. spændingsmålinger med LabView at monitorere signalerne, der blev sendt til de forskellige terminaler (16 for de mest simple læsehoveder), og derefter tolke hvortil de enkelte terminaler førte og hvilke spændinger, der var påkrævet. Vha. denne metode lykkedes det at identificere samtlige terminaler på et læsehoved, så det var klart hvor spoler, laserdiode og fotodioder var tilsluttet. Dog er laserdioder meget følsomme, og blot statisk elektricitet eller nettransienter kan brænde dem af. Netop dette var tilfældet under vores forsøg, og da læsehoveders tilslutninger varierer meget, selv inden for samme producenter, krævede nye læsehoveder helt nye forsøg. Derfor blev denne ellers lovende metode udelukket grundet den tid, det ville kræve at opnå succesfulde resultater.

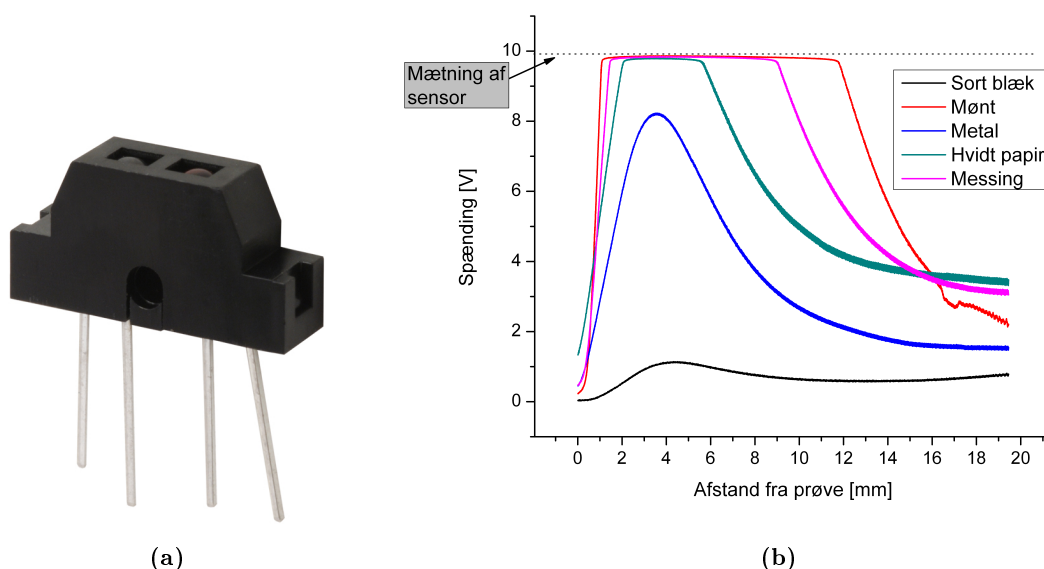
Det endelige valg af prober faldt på tre meget forskellige typer. Den ene er en kommercielt tilgængelig afstandssensor, der fungerer vha. en lysdiode og en fotodetektor. Denne sensor blev valgt som den sikre løsning, da det er et velgennemprøvet koncept. Den anden probe er pickuppen fra en grammofon. Denne blev valgt, da grammofonpickupper er designet til at registrere de meget små ujævnheder, som er i rillerne på en vinylplade. Det virkede derfor som en oplagt idé at benytte en pickup som probe i en model af et SPM. Endelig blev der konstrueret en nåleprobe til at måle spændingsfordelinger og topografi. Inspirationen til denne kom fra et igangværende forsøg på DTU, hvor proben kan bidrage med vigtig information.

I det følgende vil de tre probetyper blive gennemgået, og signalet fra dem vil blive forklaret ud fra den fysik, der ligger bag. Størst fokus vil være på grammofonpickuppen, da det er den, der er har været udsat for mest arbejde for at kunne bruges som probe.

## 2.2 Den kommercielle afstandssensor

Honeywells reflektive afstandssensor HOA0149, se figur 2.1a, er købt hos RS components og udgør den første af de tre anvendte prober. At bruge en kommercielt tilgængelig afstandssensor som probe er oplagt som “den sikre løsning”, idet det er en velgennemprøvet metode til at registrere afstande og derfor vil være en probe, der er let at implementere og få topografisk information fra. Afstandssensoren fungerer i hovedtræk ved, at en IR-diode udsender infrarødt lys, som reflekteres mod prøveoverfladen og herefter bliver opfanget af en NPN fototransistor [5]. En fototransistor er blot en standard bipolar transistor med en stor reverse-biased base-collector junction, hvori elektroner og huller genereres, når transistoren modtager fotoner. Dette skaber en strøm,  $I_L$ , fra collector til base, som igen vil skabe en collector strøm,  $I_C$ , givet ved  $I_C = (1 + \beta)I_L$ , hvor  $\beta$  er common-emitter current gain [6]. Spændingen over emitter-collector terminalerne vil derfor falde jo mere lys, der modtages. Ved at koble fototransistoren til et spændingsdelerkredsløb med en resistor, over hvilken spændingen måles, kan intensiteten af det reflekterede lys registreres.

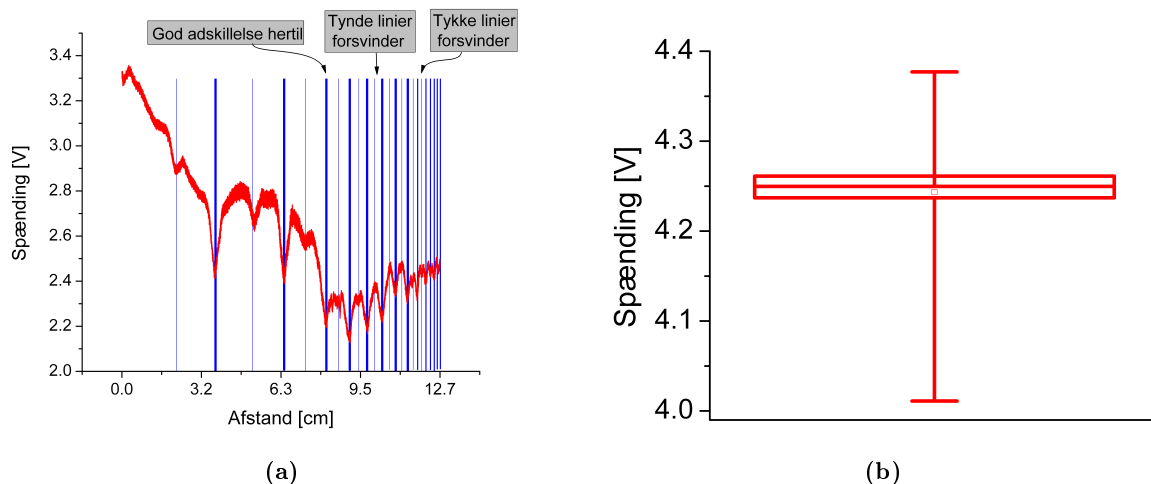
Forskellige overflader reflekterer forskelligt, og sensorens afstandsafhængighed vil derfor være afhængig af typen af overflade. På figur 2.1b ses afstandsafhængigheden for fem forskellige overflader, som denne probe er blevet brugt på. Udfladningen af graferne ved 10 V skyldes, at der kun er lagt 10 V over fototransistoren, og dette er derfor det maksimalt mulige udslag. Bemærk, at formen af signalerne er ens med et peak omkring 4 mm fra overfladen, mens størrelsen af signalerne varierer meget. Det skal yderligere bemærkes, at signalerne ikke ændrer sig monotont. Dette medfører, at målinger skal foretages enten inden for 4 mm fra prøven eller over 4 mm fra prøven, da signalerne ellers ikke vil være entydige; et af de basale krav til proben. Vores målinger blev alle foretaget over 4 mm fra prøven, men peaket stiller krav til, at overfladen ikke ændrer sig for pludseligt; dette ville uønsket kunne bringe signalet over på



**Figur 2.1:** (a) Billede af den kommercielle afstandssensor, HOA0149 fra Honeywell. IR-dioden og fototransistoren ses ved siden af hinanden. (b) Afstandsafhængigheden af signalet fra sensoren på forskellige typer overflader, som er blevet brugt som prøver. Udfaldningen ved 10 V skyldes mætning af sensoren. Det ses, at signalet ikke er monotont, når afstanden til overfladen krydser ca. 4 mm. Ydermere ses effekten af et større interaktionsområde ved større afstande, idet kurven for det sorte blæk stiger igen ved store afstande grundet omkringliggende hvidt papir.

den anden side af peaket, og dermed give flertydige udlæsninger.

Det IR-lys, som udsendes fra dioden, bliver udsendt i en kegleform, således at interaktionsområdet med overfladen stiger proportionalt med afstanden fra den. Denne effekt ses på afstandsmålingen for sort blæk, se figur 2.1b, som i modsætning til de andre målinger stiger et stykke fra prøven. Dette skyldes, at målingen blev foretaget med hvidt papir omkring, og langt fra overfladen stiger interaktionsområdet, så noget af det mere reflekterende hvide papir kan ses. Dette interaktionsområde begrænser selvfølgelig opløsningen af denne probe. På figur 2.2a er vist signalet fra proben, når den føres hen over sorte linier på hvidt papir med en tykkelse på skiftevis 1 mm og 2 mm. Afstanden mellem linierne reduceres mod højre på figuren, og det ses tydeligt hvordan linierne bliver sværere og sværere at adskille grundet interaktionsområdet. Den mindste afstand mellem de tykke linier, som kan adskilles, er 4 mm, og dette kan bruges som et mål for opløsningen af sensoren. Det skal bemærkes, at dette er et groft estimat, der vil ændre sig alt efter prøvens refleksionsgrad og detaljernes tykkelse. Opløsningen vil selvfølgelig også forbedres jo tættere på prøven, proben kommer, da interaktionsområdet herved mindskes. Under scanningerne, som gennemgås i kapitel 5, er effekten af dette illustreret på en af prøverne. Reproducerbarheden af målingerne skal også være god, hvis der skal kunne foretages pålidelige målinger. På figur 2.2b ses 164 gentagne målinger taget med afstandssensoren. Målingerne er foretaget ved at måle signalet i et givent punkt, flytte proben, og derefter retunere den, så den kan måle samme punkt igen. Det ses, at målingerne svinger noget, hvilket kan forklares med, at proben har rokket sig en anelse under bevægelsen. Dette vil være nok til at se den afvigelse i værdierne, som opserveres. Dog er afvigelserne inden for det acceptable område, og burde ikke i større grad begrænse probens pålidelighed.



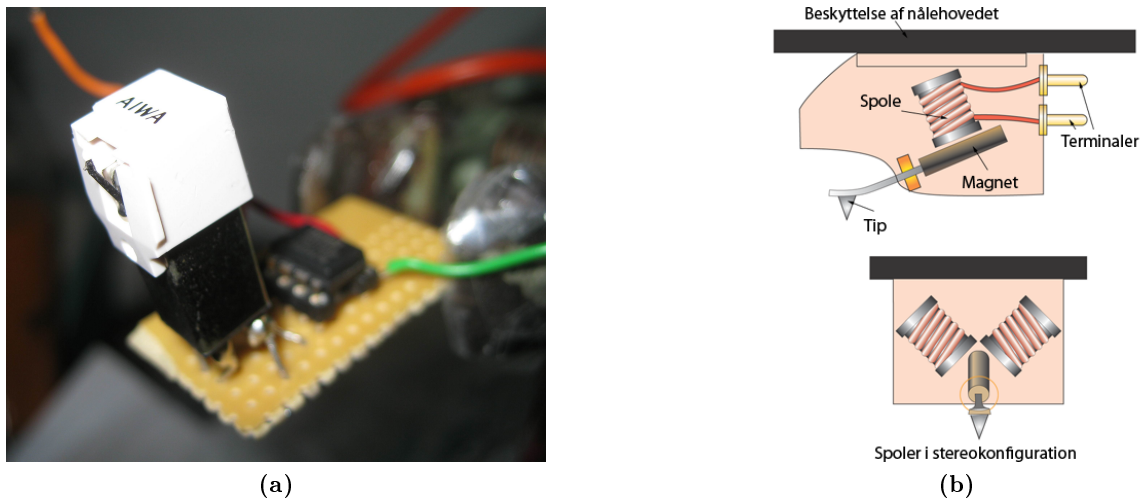
**Figur 2.2:** (a) Signalet fra afstandssensoren, når den føres hen over linier af henholdsvis 1 mm og 2 mm tykkelse med variende afstand mellem dem. Der ses en klar udflydning af linierne grundet interaktionsområdet, og denne udflydning medfører, at linierne bliver mere og mere uadskillelige mod højre. Dette viser begrænsningen i opløsningen. (b) Repeterbarheden af en spændingsmåling taget for 164 målinger. De ydre bars angiver maks. og min. værdierne, boksen angiver standardafvigelse og den lille firkant angiver middelværdien. Det ses, at der er acceptabel reproducerbarhed af målingerne.

Samlet set må det forventes, at denne probe vil have en begrænset opløsningsevne, som vil være afhængig af både afstanden til prøven og refleksionerne af denne. Dog vil målingerne være reproducerbare og forholdsvis pålidelige, men det vil kræve et kendskab til prøven at tolke probens signaler korrekt.

## 2.3 Grammfonpickuppen

Et af de mest anvendte SPM'er er atomic force mikroskopet (AFM). Dette mikroskop benytter sig af en probe bestående af en meget tynd tip, som i AFM'ets mest simple scanningsmode, det såkaldte "contact-mode", er i direkte kontakt med prøvens overflade. Med direkte kontakt menes det nærmeste, som tippet kan nærme sig grundet de frastødende kræfter nær overfladen. Herefter scannes tippet hen over prøven, og kraften fra overfladen bliver dermed afbildet [7]. At lade en tynd spids scanne hen over en prøve som i AFM'et er en oplagt idé til probe. På makroskopisk skala vil der effektivt set være direkte kontakt mellem tip og prøvens overflade, og derfor vil en sådan probe være oplagt til at afbilde prøveoverfladens topografi. Ved at bruge pickuppen fra en grammofon får man netop en probe med en spids tip, der er lavet til at registrere de meget små ujævnheder, der er i rillerne på en vinylplade. Hvis signalet fra pickuppen kan bruges på en fornuftig måde, burde det derfor være muligt at afbilde selv små ændringer i en prøves overfladetopografi.

Pickuppen, der blev benyttet som probe, er en AIWA pickup taget fra en gammel AIWA PX-E70E grammofon. Pickuppen, som kan ses på figur 2.3a, består af en tip, som er monteret på et skærmet hus via en arm. Da det ikke var muligt at åbne det skærmede hus uden at ødelægge pickuppen, er pickuppens opbygning estimeret ud fra den antagelse, at opbygningen er identisk med pickupper af typen "moving-magnet". Antagelsen er velbegrundet, da andre typer end denne kun monteres på dyrere grammofoner end den benyttede. I en "moving-magnet" pickup er der på tippens arm monteret en magnet inde i huset [8]. Over magneten sidder to spoler, se figur 2.3b, hvori der induceres en spænding, når tippet og



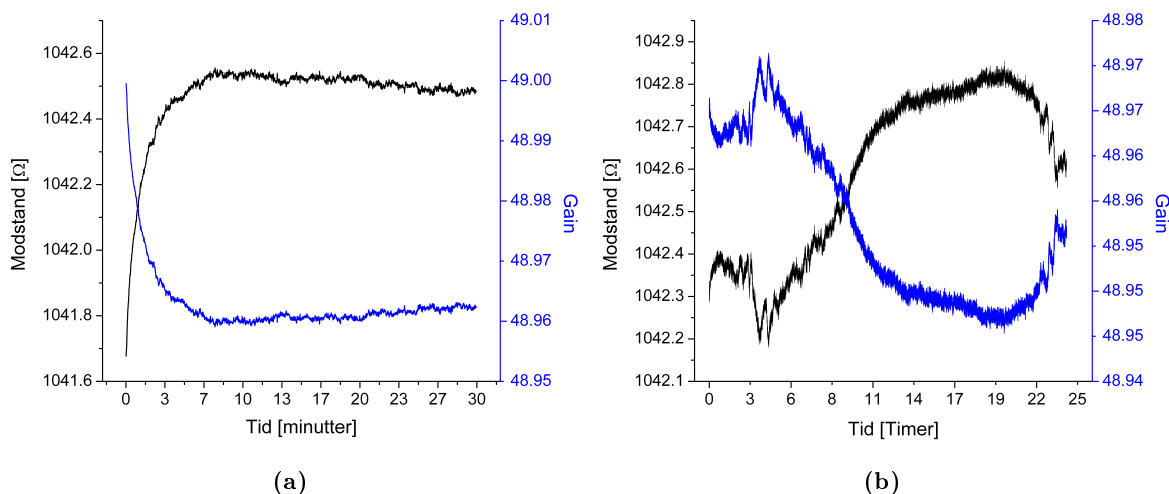
**Figur 2.3:** (a) Billede af den gramfonpickup, der blev brugt som probe. Pickuppen er monteret på et print, hvor signalet fra pickuppen forstærkes via en instrumentalforstærker bestående af 3 operationsforstærkere. (b) Virkemåden i en moving-magnet pickup [8]. Når nålen bevæger sig, induceres der en spænding i spolerne grundet ændringen i magnetfeltet. Denne spænding måles over de 2 terminaler, der hører til hver spole. Spolerne er i probe-opsætningen forbundet i serie, da stereosignalet ikke skal anvendes.

dermed magneten bevæges. Opsætningen med to spoler bruges for at kunne afspille et stereosignal, så vibrationer mod venstre giver signal til venstre spole og dermed venstre kanal. Ligeså gælder for den højre, hvorved stereosignalet opstår. Som probe er det ikke relevant, om signalet kommer fra højre eller venstre kanal. Derfor blev terminalerne til højre og venstre kanal serieforbundet, således at signalet kun afhang af tippens vertikale udslag.

En spole inducerer en spænding, når den magnetiske fluxtæthed ændrer sig over tid; størrelsen af det spændingssignal, som modtages fra pickuppen, er dermed afhængigt af hvor hurtigt tippet bevæger sig, og ikke hvor langt tippet har bevæget sig. Da det er sidstnævnte størrelse, som er interessant i forbindelse med topografimålinger, kan signalet fra pickuppen ikke bruges direkte. I stedet må man ty til en af følgende to løsninger: Enten kan man sætte en vekselspænding over spolen og vha. en Wheatstone-bridge måle den ændring i amplituden, som vil komme, når magnetens afstand fra spolen ændrer dens induktans. Dog vil man her få en oscillerende probespids, og dermed effektivt set lave en tappingmode [7], der er en avanceret løsning. Alternativt kan man benytte den inducerede spænding direkte og finde magnetens og dermed tippens afstand fra spolen ved at integrere den inducerede spænding over tid. Valget faldt på sidstnævnte løsning, der dog er sårbar overfor drift i signalet, da selv en lille fejl hurtigt vokser, når der integreres over tid. Derfor blev en stor del af arbejdet lagt i at optimere kredsløbet, så støjen og driften blev holdt på et minimum.

Den vigtigste del af pickup-probens kredsløb er den forstærker, der skal forstærke den svage inducerede spænding op til et målbart niveau. Hvis forstærkeren driver eller forstærker uønsket støj, kan dette hurtigt drukne det ønskede signal. I første omgang blev forstærkningen udført med en traditionel operationsforstærker, men da denne viste sig at have en vis drift og nulpunktsforskydelse, blev den skiftet ud med en Burr-Brown INA114 instrumentalforstærker. Denne består af 3 operationsforstærkere, hvor de 2 af dem fungerer som input buffere, mens den sidste foretager den egentlige forstærkning. I en instrumentalforstærker er modstandenes værdier matchede så præcist som muligt, hvilket medfører lav common-mode gain, lav drift





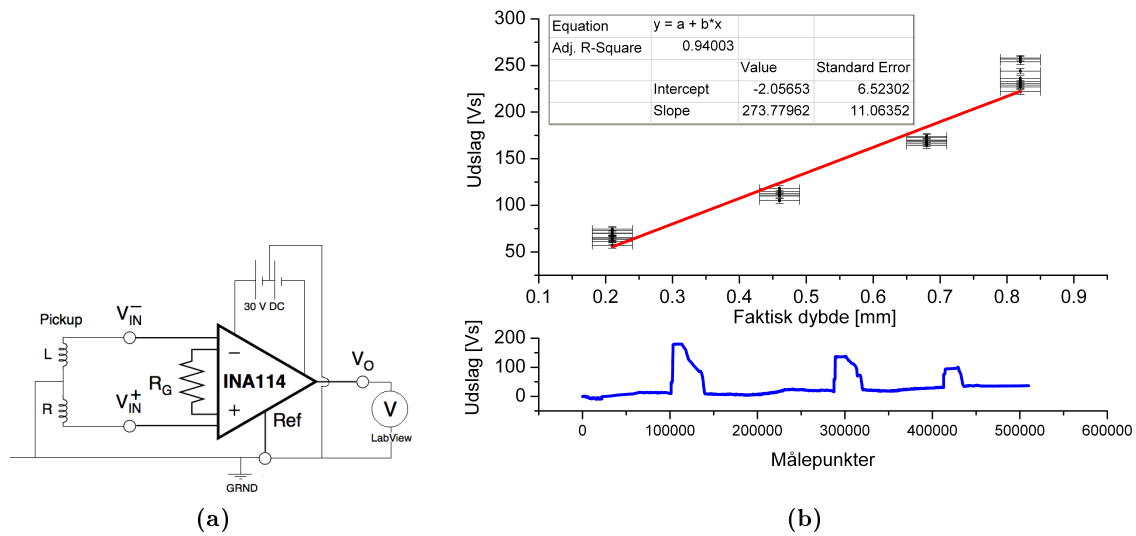
**Figur 2.4:** (a) Modstands- og gainvariationen under opstart. Det ses, at værdierne stabiliserer sig hurtigt efter den første lille opvarmning af modstanden. (b) Modstands- og gainvariation over 24 timer (med starttidspunkt 10:30). Den naturlige temperaturfluktuation af lokalet medfører kun minimale variationer i forstærkningen.

og lav støj. Forstærkningsgraden styres vha. en enkelt modstand,  $R_G$ , som forbindes til 2 af instrumentalforstærkerens ben. Forstærkningen,  $G$ , vil da være givet ved  $G = 1 + \frac{50 \text{ k}\Omega}{R_G}$  [9]. Værdien af  $G$  blev valgt, så det opnåede signal var størst muligt uden at overskride  $\pm 10 \text{ V}$ , idet datakortet, som spændingen skulle måles med, dermed ville mætte. Den modstand,  $R_G$ , der viste sig at give den mest optimale forstærkning, havde værdien  $1.061 \text{ k}\Omega$ , resulterende i en forstærkning på ca. 49 gange.

En vis drift af instrumentalforstærkeren er uundgåelig, og vil primært skyldes ustabile spændingskilder og temperaturafhængige ændringer i komponenternes værdier. Den eneste variabel, vi reelt havde en mulighed for at kontrollere, var modstanden  $R_G$ . En temperaturafhængig drift af denne ville medføre en tilsvarende drift af forstærkningen. Ændringen i modstands- og forstærkningsværdien over tid for den brugte modstand kan ses på figur 2.4a og 2.4b. Som det ses, vil værdien stabilisere sig efter kort tid, og vil kun svinge en anelse grundet temperaturvariationer. Derfor må denne del af kredsløbet siges at være optimeret så godt, som det er muligt.

Svage signaler, som det fra pickuppen, er meget sårbare over for udefrakommende støj. For at minimere denne sårbarhed er pickuppen og instrumentalforstærkeren loddet på et print, se figur 2.3a, så signalvejen fra pickup til forstærker er mindst mulig. Herved minimeres mængden af støj, som kan opsamles inden forstærkeren, og som derved vil blive forstærket sammen med signalet. Dette gav en klar forbedring af signal-støj forholdet. Yderligere forbedret blev det af, at instrumentalforstærkerens spændingskilder samt forstærkeren og pickuppen fik fælles jord. Ved at lade datakortet og LabView måle differentielt med svævende jord kunne støjniveauet reduceres en anelse mere, da en jordsløjfe dermed blev brudt. Det endelige kredsløb, som er illustreret på figur 2.5a, var hermed optimeret til at videresende signalet fra pickuppen, og yderligere støjreduceringer måtte om nødvendigt foretages vha. elektriske filtre.

Afstandskalibreringen af pickuppen er foretaget vha. en messingplade, hvori der er udfræset 5 riller med rektangulær profil og varierende dybde. Ved at føre pickuppen hen over de 4 første riller 10 gange er deres profil blevet afbildet, som det ses på figur 2.5b. Den 5.



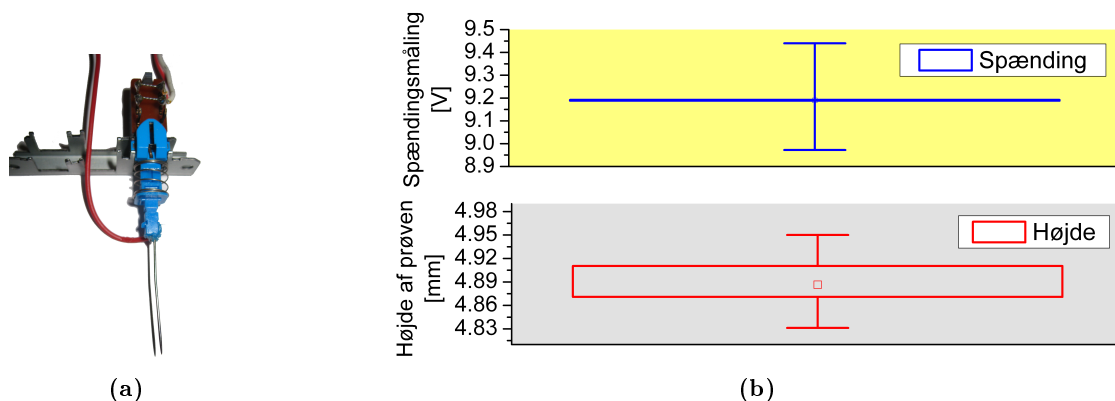
**Figur 2.5:** (a) Diagram over det elektriske kredsløb, som pickuppen blev brugt i. (b) Øverst ses en måling af 4 riller i en messingplade med kendte dybder inden for de viste errorbars. Det tilsvarende udslag er plottet, og den lineære regression viser, at der ikke er en tydelig lineær sammenhæng. Dog er signalet monotont og dermed entydigt. Spredningen på en enkelt måling er større end for de andre prober, men stadig acceptabel. Nederst ses et profilbillede af de 3 mindste riller. Der ses tydelig tipfoldning på de to dybeste riller, et velkendt fænomen fra AFM.

rille blev ikke benyttet, da den var for dyb til at pickupnålen kunne ramme bunden. Afstandsafhængigheden kan ses på figur 2.5b, hvor både usikkerheden på rillernes faktiske dybde og udslagets størrelse er medtaget. Det ses, at afstandsafhængigheden er monotont, men også at den ikke kan antages at være helt lineær. Dette er at forvente, da en lineær sammenhæng kræver, at magneten er meget større i udstrækning end spolen, så magnetfeltet er konstant aftagende. Dette er ikke tilfældet. Det ses også, at målingerne er nogenlunde reproducerbare, men at der er en vis afvigelse, som dog er inden for det acceptable. Bemærk, at profilbilledet af de 3 mindste riller på figur 2.5b afslører et velkendt fænomen fra AFM'et på de 2 dybeste af disse 3 riller, nemlig tipfoldning. Ordet dækker over det fænomen, at tippens form afbildes sammen med prøvens, hvis strukturerne er små nok. For de dybe riller kan nålens tip ikke nå helt ned, uden at armen når at røre kanten af rillen. Derfor har afbildningen af de dybe riller en form, der ikke svarer til deres faktiske. Opløsningen af proben svarer, hvis der ses bort fra denne tipfoldning, til tippens kontaktareal med prøven, som er estimeret til ca. 0.2 mm i diameter.

Denne probe har mulighed for at gengive meget små detaljer af prøvens overflade, som skal være generelt flad grundet pickuppens lille mekaniske dynamikområde. Som det ses, er den mindste rille på figur 2.5b klart defineret i profilbilledet. Derudover stilles der ingen krav til prøven. Dog er probens signal sårbart over for drift, og dette er dens største svaghed.

## 2.4 Nåle-proben

Den sidste af proberne er nåleproben, se figur 2.6a. Den består af en synål, som er monteret på en kontakt taget fra den grammofon, hvorfra grammofonpickuppen også blev taget. På selve nålen er der påloddet en ledning, hvorved potentialet af nålen kan måles fra en afstand.



**Figur 2.6:** (a) Billede af nåleproben. Nålen er monteret på en kontakt, som fungerer som sikkerhed og afstandsbuffer under scanninger mens potentialet af nålen måles via den påloddede røde ledning. (b) Reproducerbarheden af spænding- og højdemålinger taget for 500 målinger af samme punkt. De ydre barer viser maks. og min. værdier, boksen viser standardafvigelse, og den lille firkant angiver middelværdien. Det ses at reproducerbarheden er yderst god, både for højde- og spændingsmålinger.

Kontakten tjener to formål: Dels gør den, at nålen kan fjedre tilbage ca. 1 cm, når en kraft påvirker spidsen af den, og dels sluttet kontakten, når nålen har bevæget sig førnævnte afstand. Begge funktioner er yderst nyttige, når proben skal bruges på scanningsudstyret. Det giver en vis sikkerhedsmargin, så prøven ikke ødelægges af nålen, samtidig med at scanningen kan afbrydes af kontakten, hvis nålen skulle fortsætte for langt.

Ved at sænke nålen ned på en ledende overflade og måle potentialeforskellen i forhold til en reference, kan spændingsfordelingen på overfladen kortlægges ud fra et antal målepunkter, der kun er begrænset af brugerens ønsker (og tid). Herudover er det muligt at bestemme topografien af overfladen, hvis det registreres af scanningsystemet, hvor langt nålen skal sænkes, inden der opstår elektrisk kontakt med overfladen. Det er dermed muligt at fastlægge en ledende prøves spændingsfordeling og topografi i een og samme scanning. Opløsningen er tilligemed meget høj, da den kun er begrænset af enten nålespidsens areal eller scanningsystemets opløsning.

Målingerne vil i høj grad være repeterbare, se figur 2.6b, særligt i forbindelse med spændingsmålinger, der kun vil indeholde usikkerheden på måleudstyret, i dette tilfælde datakortet. Repeterbarheden af topografimålinger vil især være afhængig af usikkerheden på det brugte scanningsudstyr. Ydermere skal man være opmærksom på, at spændingsforskellen mellem nål og prøve vil resultere i tilfælde, hvor nålen registrerer en spænding inden den rent faktisk rører overfladen, en effekt der vil være mere udtalt for høje spændinger. Hvis den dielektriske styrke af luften mellem prøve og probe antages at være  $20 \text{ kV/cm}$  [10], vil den indbyrdes afstand approksimativt skulle være  $5 \mu\text{m}$  for en spændingsforskel på  $10 \text{ V}$  før ladning vil kunne ledes gennem luftgabet. Dette er mindre end opløsningen af scanningsystemet, der vil blive gennemgået i kapitel 3, men det medfører, at man evt. må føre proben tættere på prøven end afstanden svarende til det første signal for at få korrekt spændingsudslag.

Denne probe vil altså potentielt kunne give meget højt opløselige billeder med stor repeterbarhed og nøjagtighed, både hvad angår spændingsmålinger og topografimålinger.

## Kapitel 3

# Scannerens mekaniske opbygning

### 3.1 Krav til den mekaniske opbygning

Når først proberne er blevet udvalgt, er næste nødvendige trin at vurdere hvilke mekaniske opbygninger, der kunne være mulige og realistiske for vores SPM. Der stilles følgende krav til apparaturet:

**Bevægelse i xyz-retningerne** Det kræves af den mekaniske opbygning, at det skal være muligt for den fastspændte probe at kunne bevæge sig i 3 dimensioner, således at et scanning-mønster kan opstå. Z-dimensionen er nødvendig i forbindelse med den feedbackløkke, som er implementeret i programmet i forbindelse med målinger med konstant signal og punktscanning (dette vil blive yderligere forklaret i kapitel 4).

**Motorsystem** Hver dimension skal kunne flyttes af en form for motor, som kan styres via et program, i dette tilfælde LabView. Motorernes position skal kunne bestemmes eksakt og reproducerbart.

**Stabilitet og entydighed** Det er vigtigt, at apparaturet er mekanisk stabilt, således at det giver entydige resultater.

**Opløsning** Opløsningen af apparaturet skal helst ikke være den begrænsende faktor i vores målinger. Således skal apparaturets opløsning optimalt set være sammenlignelig med eller bedre end sensorens opløsning.

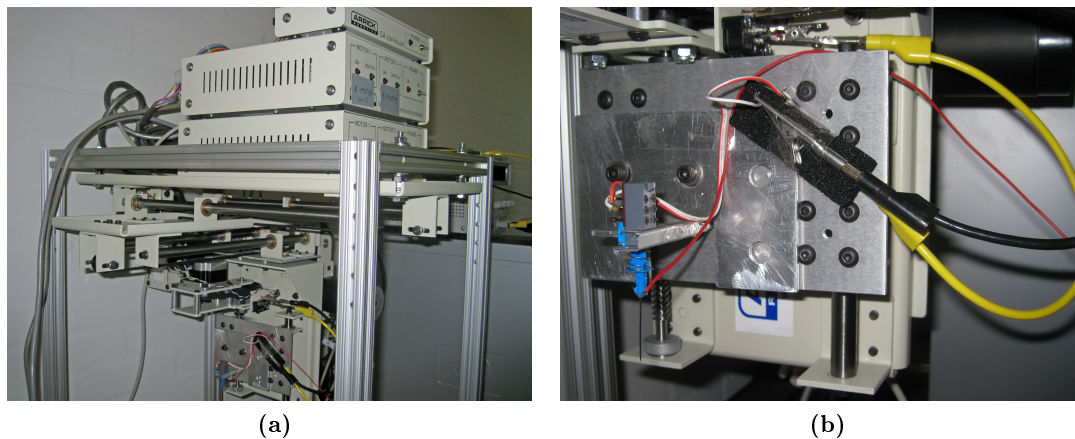
Der er to muligheder for motorsystem: Piezo-elementer eller stepmotorer. Piezoelementer er krystaller, der bliver elektrisk polariserede, hvis de udsættes for et mekanisk tryk. Man kan dermed inducere elektriske ladninger i ledere, der er fastgjort til siderne af en piezokrystal. Det omvendte er også tilfældet. Hvis man inducerer en ladning i to ledere, der sidder på hver sin side af en piezokrystal ved at lægge en spændingsforskel over lederne, vil krystallen ændre sin form. Således er piezoelementer selvsagt til brug i SPM'er, og bliver da også brugt i kommercielle STM'er og AFM'er, idet man præcist kan styre meget små – på nanoskala – udsving af piezoelementet [11]. Grunden til STM'ets relativt sene debut (1981 [12]) var netop, at det før opfindelsen af piezomotorer ikke var muligt at styre proben præcist nok. I denne model er det dog interessant at kunne følge med i scanningsprocessen, og således har piezoelementer et alt for lille arbejdsområde. Vores valg af motorsystem faldt derfor på stepmotorer.

En stepmotor er en særlig slags motor, der kan bevæge sig i enkelte trin, i vores tilfælde ned til  $0.9^\circ$  pr step. Hvert step bliver styret af magnetiske kerner inde i motoren, som bevirker at akslen bevæger sig til næste position/step. Ved at tænde og slukke disse kerner roterer motoren enten frem eller tilbage, og den tidsforsinkelse, der er mellem hvert step, bestemmer motorens hastighed. Proben bliver nu flyttet præcist til den ønskede position ved at sende det rette antal pulser til stepmotoren [13]. Der blev indkøbt en samlet løsning hos firmaet Arrick Robotics, da denne levede bedst op til ovenfor stillede krav.

### 3.2 Arrick Robotics' xyz-bord

Den mekaniske opbygning af 3D scanneren bestod af et stativ med et arbejdsområde på  $22 \times 22 \times 5 \text{ cm}^3$ , hvorpå der var fastgjort tre skinner, som tre stepmotorer kunne føre i henholdsvis x-, y- og z-retningen, se figur 3.1. Disse 3 motorer blev styret gennem to MD2 bokse, der indeholdt strømforsyning og et kredsløb til at drive motorerne. MD2 boksene modtog real-time kontrolimpulser fra en aktuator (C4 controller) der var koblet til computerens seriel port, og derved var det muligt at styre motorerne gennem programmer som LabView (se evt. kapitel 4).

Opløsningen for udstyret i x,y-retningen var af forhandler opgivet til  $0.002''$  pr  $0.9^\circ$  step. Dette mål var opnået ud fra en standardgearing på 2.5:1. I vores opstilling blev en 4:1 gearing benyttet, der ved brug af omregningsfaktoren  $1'' = 2.54 \text{ cm}$ , gav den maksimale opløsning af vores mekaniske apparatur til:  $0.002 \cdot 2.54 \frac{\text{cm}}{\text{step}} / 4 \cdot 2.5 = 0.003 \frac{\text{cm}}{\text{step}} = 30 \frac{\mu\text{m}}{\text{step}}$ . Desuden var opløsningen i z-retningen opgivet til  $0.00125''$  pr  $0.9^\circ$  step, altså:  $0.00125 \cdot 2.54 \frac{\text{cm}}{\text{step}} / 4 \cdot 2.5 = 0.00198 \frac{\text{cm}}{\text{step}} = 19.8 \frac{\mu\text{m}}{\text{step}}$ , hvilket giver en rimelig detaljegrad. Hver af motorene havde efter forhandlers oplysninger en usikkerhed på  $\pm 5\%$  pr step, altså en usikkerhed på  $\frac{30 \mu\text{m}/\text{step}}{100} \cdot 5\% = 1.5 \frac{\mu\text{m}}{\text{step}}$  for x,y-retningen og  $0.99 \frac{\mu\text{m}}{\text{step}}$  for z-retningen.



**Figur 3.1:** På figur (a) ses vores “3-axis robotic workcell” fra Arrick Robotics med tre stepmotorer, to MD2 bokse til at styre vores motorer, samt en aktuator (C4 controller), opstillet i et stativ. Vi ser skinnerne, der kan føre proben i alle tre dimensioner. På figur (b) ses hvorledes en probe, her nåleproben, er fastspændt på det mekaniske apparatur, således at den er klar til at scanne over vores arbejdsområde på op til  $22 \times 22 \times 5 \text{ cm}^3$ .

## Kapitel 4

# Programmering og styring med LabView

### 4.1 Kommunikation med C4

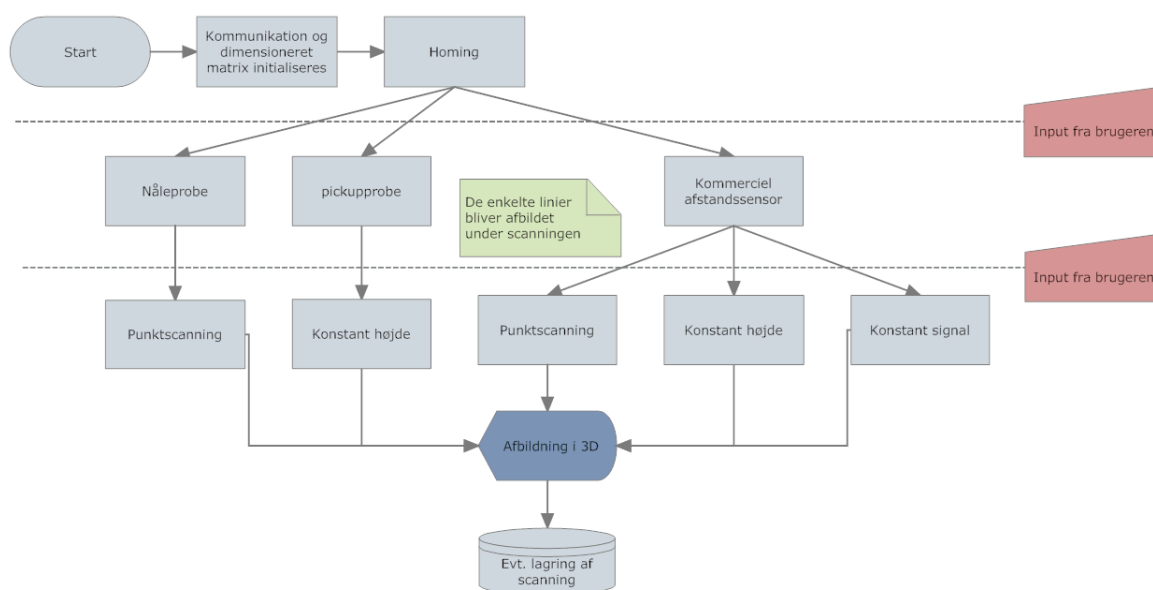
De før omtalte MD2-bokse skal have et konstant parallelt input for at styre motorerne. For at aflaste styrecomputeren, samt gøre kontrollen med motorerne lettere, blev en C4-boks brugt. Denne har to parallelporte, der hver kan styre en MD2-boks. C4-boksen giver altså mulighed for at styre 4 motorer – nok til de tre frihedsgrader, der er nødvendige for fuld tredimensionel kontrol. C4-boksen består af en 20 MHz processor, der tager sig af selve kontrollen, en seriel kommunikationschip af en type, der blev brugt i gamle modems, samt diverse førsteordens komponenter. C4-boksen kan altså styres ved hjælp af serielkommandoer, se evt. tabel B.1 i bilag B. Problemet med den måde kontrollen foregår på er, at det ikke kan lade sig gøre at regulere positionen af en motor, mens en anden kører. En kommando sendes, og først når denne er udført, er det muligt at sende en ny. En kontrolkode måtte skrives i LabView for at kontrollere tilbagesvaret på serielporten, og først når dette svar var modtaget, kunne en ny kommando sendes. Det er dog muligt at sætte to motorer til at bevæge sig samtidigt, så længe det kan sendes i een kommando (se tabel B.1). Altså måtte styringen, hvor det var nødvendigt, foretages ved kun at flytte en motor få steps i scanningsretningen for derefter at sende en ny kommando, der så indeholder højde-reguleringen, for eksempelvis at regulere scanningshøjden under en scanning.

Det skal nævnes, at med kontrollen af motorerne gennem C4-boksen, er det muligt, med en stop-kommando, at standse en motor, der kører i scanningretningen, inden bevægelsen er fuldført. Dog mistes den eksakte positionsinformation. Denne kontrolmetode er derfor ikke anvendelig til vores formål.

### 4.2 Den overordnede struktur af programmet

Programmet er opbygget således at det, uanset probe og scanningsmode, først initialiserer kommunikationen med de forskellige eksterne enheder (motorstyring, LabView-måleinterface og evt. spændingsforsyning til proben). Derefter initialiseres en matrix med nuller i de af brugeren satte dimensioner svarende til opløsning og størrelse af prøven. Så sættes alle bevægelsesdimensioner til at returnere til udgangspositionen, kaldet homing. Herefter deler selve programmet sig op i flere scenarier, se evt. figur 4.1.

For en bruger af SPM'et er probetype samt scanningsmode det første, der skal vælges i GUI'en. Dette styres i LabView-programmeringen via case-structures (yderst probetype



**Figur 4.1:** Flow-diagram der i grove træk viser sammenhængen i LabView-programmet. De røde bokse viser, hvor brugerinputtet, der er defineret inden programmet er blevet startet, bliver benyttet. Den blå boks angiver, hvor programmet giver et output til brugeren. Den grønne note er ikke et egentligt step i programmet, men illustrerer hvor i den tidlige udvikling brugeren også løbende får et output.

og herunder mode). Det er naturligvis ikke muligt at benytte alle scanningsmodes med alle probetyper, så i tilfælde af et valg af en mode, der ikke kan lade sig gøre, bliver brugeren gjort opmærksom på dette via frontpanelet, se bilag C. I tilfælde af, at brugeren vælger en mode, der kan lade sig gøre, udføres denne som beskrevet i afsnit 4.3. Imens vises linieinformation fra scanningen i frontpanelet.

Alle modes giver i output to matricer - en indeholdende geometrisk/reflektiv information, samt en med alternativ datainformation (i de fleste modes indeholder denne samme data som den geometriske matrix, men i tilfældet med nåleproben angiver denne et spændingsbillede). Den første matrix sendes så til en 3-dimensionel afbildning, og, i tilfælde af at brugeren har valgt dette, sendes begge matricer til en eller to filer (afhængigt af om den alternative information er relevant i den valgte scanningsmode).

## 4.3 De enkelte modes

Når en bestemt case er valgt af brugeren, starter den del af programmet, som case-strukturen beskriver. Fælles for alle cases er, at de først indledes med en nærmelse af proben til prøve i z-retningen. Scanningen foregår derefter linievis i x-retningen, og efter endt linie hæves pickuppen en smule, kører retur i x-retningen og flyttes til en ny linie i y-retningen. Denne procedure gentages til scanningen er færdig uanset probetype og mode.

### 4.3.1 Den kommercielle afstandssensor

Den kommercielle afstandssensor er, grundet sit relativt store dynamikområde nem at implementere. Samtidig, da der ikke er nogen fysisk berøring med prøven, er det mindre kritisk at kunne foretage en hurtig højderegulering. Disse egenskaber gør det muligt at benytte alle

følgende modes.

**Konstant højde** I denne mode nærmes prøven ved, et step ad gangen, at flytte sensoren i z-retningen og herefter tage en række målinger. Er gennemsnittet af disse målinger over det “set-point”, der er defineret af brugeren, stoppes tilnærmelsen, og selve scanningen igangsættes. Igen defineret af brugeren flyttes x-motoren nu et antal steps, hvorefter en række målinger foretages. Disse indskrives i den predefinerede matrix i de respektive passende celler. Når næste række af scanningen foretages, skrives der til celler i næste række i matricen. Efter den første række scannes alle følgende rækker ved samme z-højde som den første; der foretages altså ikke en nærmelse til prøven ved målinger her.

Denne mode udmærker sig ved en kort scanningsetid. Dog er der her ikke en fuldstændig lineær sammenhæng mellem de afbildede højder (se kapitel 2), og denne scanningsmode er kun velegnet til relativt flade prøver.

**Konstant signal** I konstant signal mode'en tilnærmes prøven som ovenfor beskrevet. En flytning af x-motoren foregår dog på en lidt anden måde. I stedet for blot at flytte på samme måde hver gang, sammenlignes outputtet fra sensoren med setpoint værdien, og z-motoren reguleres så med en afrundet værdi proportional med forskellen mellem disse. Her benyttes kommandoer for at flytte to motorer samtidig, se tabel B.1. Ud over den før beskrevne P-regulering er der også mulighed for at bruge PI-regulering. Integralledet kan tilføjes ved at tilføje en værdi til “ $T_i$ ” på frontpanelet. Denne regulering kan modvirke pludselige utilsigtede højdesvingninger. PI-reguleringer er proportional med den brugerdefinerede faktor  $G$ . Matematisk kan reguleringen udtrykkes ved sammenhængen

$$P(t) = G \left( E(t) + \frac{1}{T_i} \int E(t) dt \right)$$

hvor fejlen  $E(t) = U_{set} - U(t)$ ; altså forskellen mellem setpoint-værdien og den målte værdi. Standardværdier for  $T_i$  og  $G$  blev forsøgt estimeret ud fra en Ziegler-Nichols-metoden [14]. De fundne værdier viste sig ikke at være særlig anvendelige, og i stedet benyttede vi et visuelt estimat. For begge værdier fandt vi følgende parametre:  $T_i = 1000$  og  $G = 6$ .

Modsat scanninger ved konstant højde er det ikke sensorinformationen, men positionen af z-motoren, der udgør den lagrede højdeinformation. Denne fås ved at addere positionene af forrige punkt med reguleringen i det nye punkt. Når en linie er scannet færdig hæves z-motoren, og proben køres retur for at påbegynde næste linie. Ved at aflæse signalet fra proben sænkes denne, igen i modsætning til ved konstant højde, til signalet igen har opnået setpoint-værdien. Det første punkt i den nye række sættes til at være lig det sidste punkt i forrige række tillagt differencen mellem hævningsen og sænkningen af proben i forbindelse med linieskiftet.

Denne mode er næsten lige så hurtigt som konstant højde, og udmærker sig derudover ved at kunne scanne på prøver, der ligger skråt og har større højdeforskelle, så længe disse ikke er for bratte. Dog er der ved konstant signal det problem, at der bliver trukket spor efter højdeforskelle, hvilket vi vil kalde trailing. Dette gennemgås i kapitel 5.

**Punktscanningsmode** Punktscanningsmode'en er en meget langsom måde at scanne på. Her nærmes z-motoren til hvert enkelt punkt på samme måde, som prøven blev nærmet i starten af hver linie i konstant signal mode'en. Lagringen af informationen foregår som tidligere beskrevet. Her er det igen positionen af z-motoren, der giver højdeinformationen i den eksporterede matrix.



Punktscanningsmode'en er ekstremt langsom at benytte, men har ingen problemer med højdeforskelle og skrå prøver. Heller ingen trailing opstår ved denne mode. Vi har valgt ikke at foretage scanninger med denne mode, dels grundet scanningstiden, og dels grundet muligheden for at bruge de to andre modes der er mere oplagte for denne probe.

### 4.3.2 Grammofonpickuppen

Grammofonpickuppen reagerer, som beskrevet i afsnit 2.3, på hastigheden af tippet og ikke på positionen. Derfor er det nødvendigt at integrere over al tid for at få dennes position. Selv om der er blevet benyttet en god forstærker til behandling af signalet, kan drift dog ikke undgås. Derfor er der blevet brugt forskellige tricks for at undgå, at driften har for stor betydning. Det er også denne drift, der forhindrer kørsel ved konstant signal, da tilfældig drift ville kunne få pickuppen til at crashe ind i prøven.

**Konstant højde** Ved konstant højde nærmes probe til prøve ved under hvert step fra z-motoren at registrere amplituderne af det rå signal fra proben. På den måde undgås at driften har indvirken. Når pickupnålen rører selve prøven, vil denne blive udsat for en noget større bevægelse end ved bevægelse i fri luft, og proben stopper. Under den af brugeren definerede bevægelseslængde af x-motoren foretages en række kontinuerte målinger ved høj samplerate. Der integreres over disse, og herfra fås positionen af proben. Under efterfølgende bevægelser af x-motoren lægges integralet fra forrige punkt til det nye integrale.

Det viser sig, at motorerne udsender kraftig asymmetrisk elektrisk støj. Gennem målinger er dennes størrelse fundet, og den har vist sig at være konstant. Denne værdi fratrækkes alle værdier inden integralet tages. Uden denne korrektion ville alt signal drukne i drift.

Pickuppen er meget højdefølsom og giver derfor billeder af selv meget små topografiske detaljer. Det mekaniske dynamikområde er meget småt, og denne mode kan derfor kun bruges på meget flade prøver.

### 4.3.3 Den elektrisk ledende nål

Den elektrisk ledende nål er en multifunktionel probe, og scanninger med denne giver to ens dimensionerede matricer som output: Den primære geometriske information og et spændingsbillede. Et krav er naturligvis, at prøven er elektrisk ledende. Proben kan altså både bruges til at scanne metaloverflader for geometrisk information og andre devices/halvlederkomponenter for samtidigt at give et spændingsbillede.

**Punktscanningsmode** Som ved den kommercielle afstandssensor nærmes prøven indtil setpoint-værdien er overskredet. Da der arbejdes i steps, der er meget store i forhold til afstande, hvor ladninger kan foretage spring ved de benyttede spændinger (se kapitel 2), må det formodes, at den målte spændingsværdi er den samme som den reelle spændingsværdi på overfladen. Idet proben får et signal, lagres både denne information og højdeinformationen i antal steps i hver deres matrix. Proben hæves inden næste punkt scannes.

Punktscanningsmoden med den elektrisk ledende nål kan give meget højtopløselige billeder med store og pludselige højdeforskelle på prøven. Information om spændingsfordelingen over prøven kan udtrækkes, hvis denne er relevant. En stor ulempe er, at scanningstiden er meget lang.

# Kapitel 5

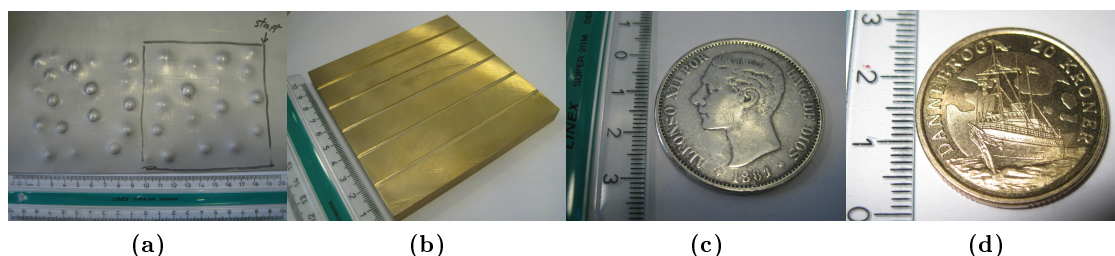
## Målinger med scanneren

### 5.1 Oversigt over scanninger

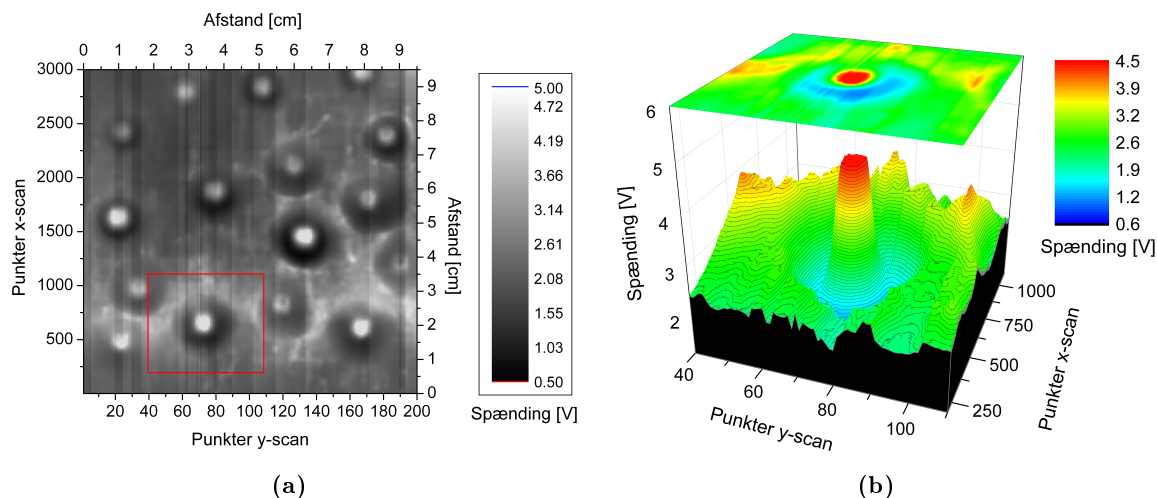
Under projektets forløb blev der primært scannet fire meget forskellige prøver, se figur 5.1, med de tre forskellige prober.

Prøverne blev valgt ud fra følgende kriterier: Der skulle være en prøve, som hver sensor ville kunne bruges på, men også en prøve, som kunne bruges til reference mellem de forskellige prober. Således skulle det være muligt at finde fordele og ulemper ved de forskellige prober, samt bestemme deres opløsning. De valgte prøver blev: En metalplade med buler i størrelsesordenen  $20 \times 20 \text{ cm}^2$  (figur 5.1a), en  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  messingplade med 5 riller af bredden 2 mm og med en dybde på henholdsvis 0.21 mm, 0.46 mm, 0.68 mm, 0.82 mm og 1.02 mm (figur 5.1b). Endelig var der to meget forskellige mønter. Den ene var en stor spansk mønt fra 1881 (figur 5.1c), og den anden en dansk jubilæumstyver (figur 5.1d).

Hver probe blev afprøvet i mindst et af de modes, der er gennemgået i afsnit 4.3. I tabel E.1 i bilag E, er der skabt et overblik over de mange billeder, der kom ud af dette, og som er vist i denne rapport. I det følgende vil de enkelte probers scanninger blive gennemgået hver for sig, og der vil blive vist et udsnit af de billeder, der er blevet scannet under projektets forløb.



**Figur 5.1:** Her ses de forskellige prøver, der blev brugt til scanningerne. På figur (a) ses den store metalplade med buler. Den sorte streg indikerer, hvor den kommercielle sensor har scannet. På figur (b) ses messingpladen, der blev brugt som reference mellem de 3 prober, hvor der ses præcist udfræsede riller. På figur (c) og (d) ses henholdsvis en spansk mønt fra 1881 og en dansk jubilæums 20 krone. Som det ses, er mønten fra 1800-tallet væsentlig større og har en bredere kant end den nutidige mønt.



**Figur 5.2:** På figur (a) ses metalpladen med buler scannet med den kommercielle afstandssensor ved konstant højde. Den liniestøj, der ses på billedet, skyldes at LabView-programmet var indstillet til at køre proben ned til den kunne registrere prøven ved hver linie, således havde proben kun konstant afstand til prøven i en enkelt linie før den skiftede. Senere blev det i programmet rettet til at proben kun kørte ned og registrerede i første linie, og derved forsvandt liniestøjen. Den røde firkant på figur (a), indikerer hvor 3D plottet på figur (b) kommer fra. Den centralsymmetriske dal omkring toppen viser tydeligt den lavere refleksion af de skrå kanter.

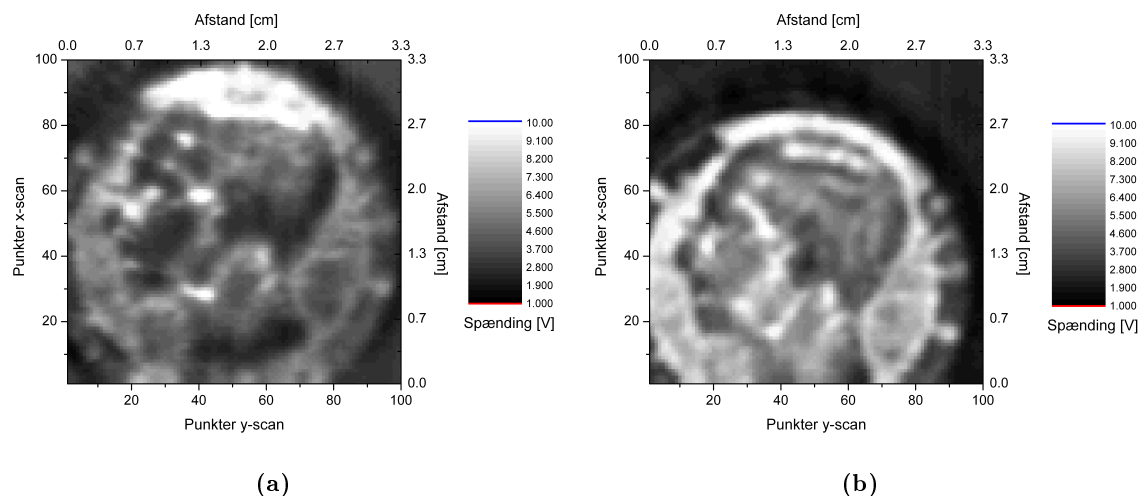
## 5.2 Den kommercielle afstandssensor

Den kommercielle afstandssensor blev brugt i to forskellige modes, konstant højde og konstant signal, som gennemgås i det følgende.

### 5.2.1 Konstant højde

Den mest simple mode rent programmeringsmæssigt var målinger ved konstant højde. Tidligt i projektets forløb blev scanningen på figur 5.2a taget. Det er af denne grund, at der ses en del liniestøj på billedet, da dette var en fejl i programmet, der først blev rettet senere i forløbet. Ved at have kendskab til prøven ses det også, at scanningen kan tolkes på flere måder. På figur 5.2b ses det tydeligt, at refleksionerne omkring kanterne af bulen har en langt lavere værdi end refleksionerne på pladens flade del. Dette skyldes, at siderne på en bule har en vinkel, der gør at det infrarøde lys reflekteres i en anden vinkel end den fototransistoren er bygget til at opfange. Derfor vil det for sensoren se ud som om siderne på bulen er lavere end bunden af pladen, selv om dette naturligvis ikke er tilfældet. Alt dette betyder, at scanningsbillederne, der fås fra den kommercielle afstandssensor, bør fortolkes inden de tages for gode varer, og det er således i nogle tilfælde også nødvendigt at kende prøvens udformning for at kunne tolke signalet rigtigt. Dette er også et reelt problem i mange kommercielle SPM'er (f.eks. ved STM), som diskuteres i kapitel 2. På figur 5.4a er det illustreret, hvorledes en scanning af en prøve kan fortolkes på to forskellige måder.

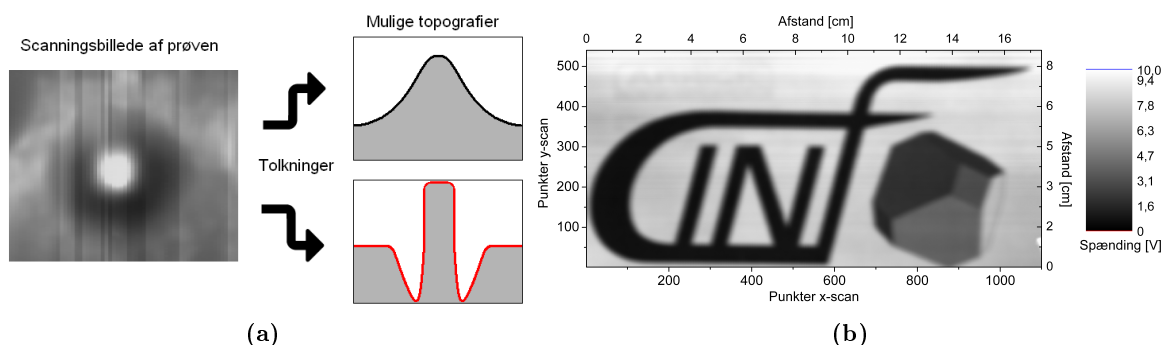
I scanningen på figur 5.2a, var reverse bias spændingen i kredsløbet ikke optimeret, og spændingsforsyningen kom fra en ekstern strømforsyning. Desuden var der sat en spænding på 4.6 V over IR-dioden, hvilken kunne gøres mindre for at komme tættere på prøven. Det ses i høj grad på figur 5.3 hvor stor betydning det har for scanningerne hvilken spænding, der arbejdes med. Ved at regulere denne spænding ned kommer afstanden med optimalt udslag



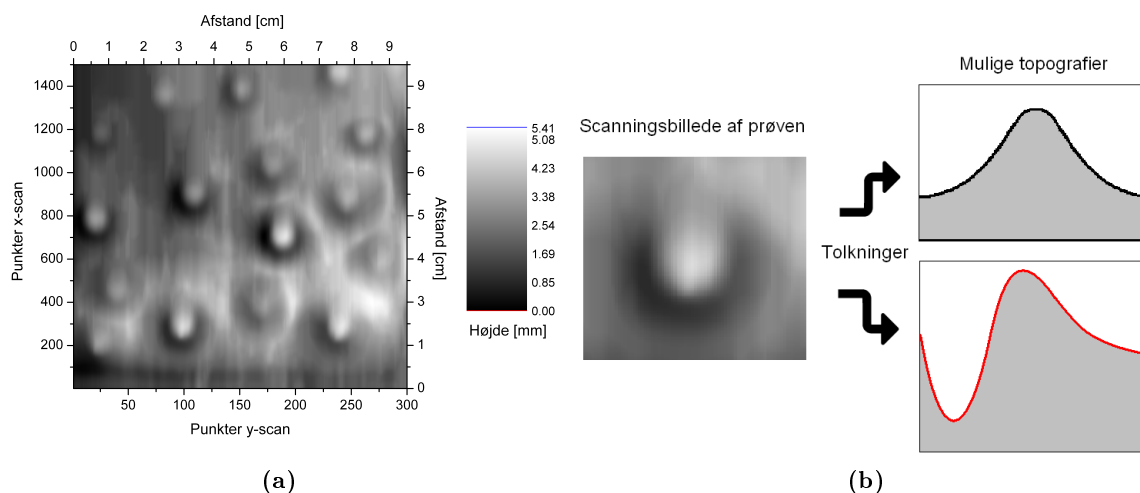
**Figur 5.3:** Mønten på figur (a) er scannet med en spænding over IR-dioden på 4.6 V, hvorimod mønten på figur (b) er scannet med en spænding på 1.2 V. Den ændrede spænding over sensoren bevirker at figur (b) er scannet med en langt kortere afstand til prøven end figur (a), og således er kontrast og opløsning forbedret.

tættere på selve prøven, og således mindskes interaktionsområdet (se evt. afsnit 2.2). Figur 5.3a er taget ved en spænding på ca. 4.6 V og figur 5.3b er taget ved en spænding på 1.2 V, og som forventet er det nemmere at skelne detaljer på figur 5.3b. Desuden blev reverse bias spændingen over fototransistoren også skiftet over til 10 V fra datakortet mellem billede 5.3a og 5.3b, hvilket øgede kontrasten i billedet.

Det er også muligt at scanne papir med skrift eller mønster, da refleksionsevnen af papir afhænger af dets farve (se evt. figur 2.1b). På figur 5.4b ses en scanning af et papir med CINF-logoet (det er også denne scanning, der er afbilledet på forsiden). Det ses tydeligt, at farverne på ”terningen” let kan skelnes fra hinanden, dog ses det også at der er en vis udflydning af logoet i kanten. Dette skyldes sensorens interaktionsområde, som beskrevet tidligere i rapporten.



**Figur 5.4:** På figur (a) er det illustreret hvorledes et scanningsbillede kan fortolkes på flere måder. Idet størrelsen af prøven tillader, at man med det blotte øje kan se hvilken fortolkning der er korrekt, er der intet problem, men i de fleste SPM'er er dette selvfølgelig ikke muligt. Der kræves altså et vist kendskab til prøven for at kunne fortolke scanningsbillederne rigtigt. På figur (b) ses en scanning af et papir med CINF-logoet. Farverne skelnes let fra hinanden, men der observeres også en vis udflydning i kanterne.



**Figur 5.5:** På figur (a) ses et scanningsbillede af et udsnit af prøven på figur 5.1a taget ved konstant signal. Der ses en tydelig skyggeeffekt når figuren sammenlignes med figur 5.2a. På figur (b) er denne trailing afbilledet med mulige fortolkninger af den faktiske topografi.

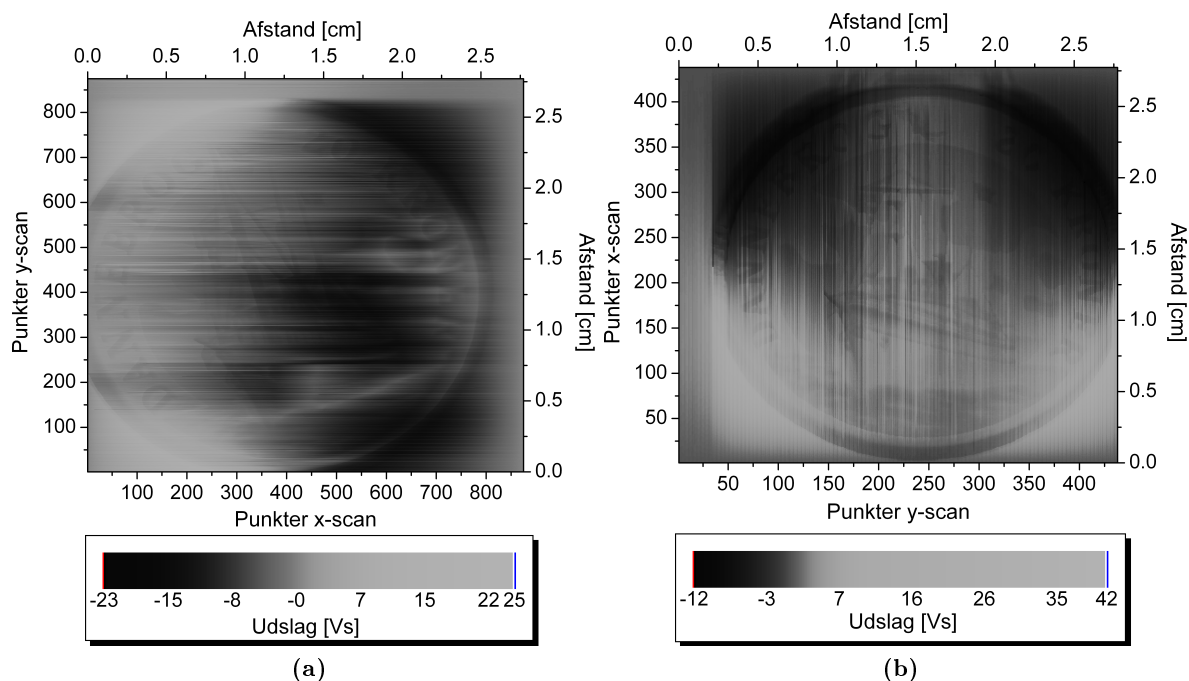
### 5.2.2 Konstant signal

Ved scanning i konstant signal opstår der samme problemer med refleksioner som i scanningmode'en konstant højde, bortset fra at sensorens ikke-lineære afstandsfhængighed fjernes (se afsnit 2.2). Dette bevirker, at det kun er stepstørrelsen, der afgør z-opløsningen. En anden positiv egenskab ved scanninger under konstant signal er, at der i princippet ikke er grænser for hvor store ujævnheder, der kan være på prøven. Det skal dog nævnes, at man bør være opmærksom på, at prøven ikke ændrer sig for pludseligt, så man ikke kommer over i sensorens modsatte signalområde, som nævnt i kapitel 2.

Problemet ved scanning i konstant signal ligger i PI-reguleringen, som ikke regulerer lige så hurtigt ned som op, grundet den asymmetriske afstandskurve (se afsnit 2.2). Dette giver den tydelige trailing som ses på figur 5.5a og 5.5b.

## 5.3 Grammofonpickuppen

Da de første målinger blev foretaget med grammofonpickuppen, stod det klart, at den kraftige elektriske støj fra scanningsudstyret gjorde det svært at få fornuftige billeder ud af scanningerne. Ved at analysere støjen kunne det konkluderes, at den kraftige støj kun opstod, når motorerne og blæseren kørte. Det var imidlertid ikke muligt at frasortere støjen med elektriske filtre, da både støjen og størstedelen af signalet lå under 10 Hz. Interessant nok viste det sig, at den mest generende støj bestod i en hævnning af middelværdien af den generelle støj. Dette viste sig som en ret linie i integralberegningen med en hældning, der svarede til forskydningen. Dog varierede denne hældning systematisk mellem 2-3 værdier under de forskellige x-scanninger, hvilket indikerede, at steppositionen af y-motoren havde indflydelse på hældningen. Da det med rimelighed kan antages, at grammofonpickuppen kun bruges på meget flade prøver, blev løsningen på problemet, at programmet efter en x-scanning kompenserede for hældningen ud fra antagelsen om, at første og sidste punkt på linien var i samme højde. Dermed blev samtlige linier lagt i samme plan, og nu var det muligt at få billeder fra pickuppen, se figur 5.6a, som viser en scanning af en dansk 20-krone. På trods af liniestøjen er ændringer i topografien afbildet, så selv små detaljer i skibet og skriften på mønten anes. Der

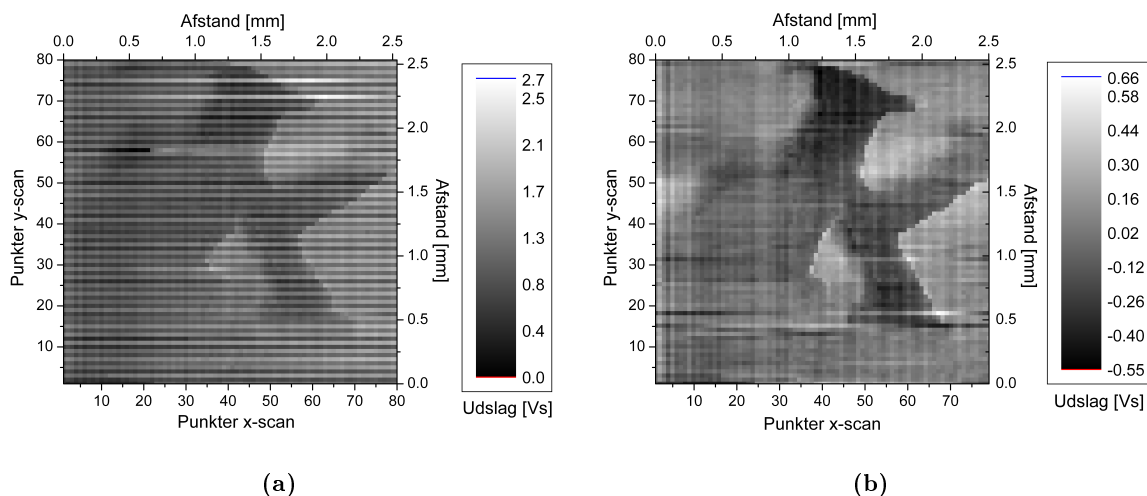


**Figur 5.6:** (a) Scanning taget med fuld opløsning af en dansk 20-krone. Der er kraftig liniestøj, men det anes, at møntens konturer er veldefinerede. (b) Samme 20-krone, men denne gang taget i halv opløsning i og med hver anden x-scanning sprunget over. Der ses en reducere af liniestøjen, men på bekostning af opløsningen.

ses også tydelige skyggeeffekter i møntens hjørner, som opstår, når tippet skal over møntens yderkant. Først afbøjes tippet til siden for derefter at “svirpe” op, resulterende i et kraftigere signal end normalt. Effekten ses også ved de første scanlinier, hvor mønten er “klippet” af, denne gang fordi tippet glider uden på møntens kant uden at svirpe op.

Liniestøjen er tydeligvis stadig meget dominerende, men bemærk at den reduceres væsentligt, når der køres 2 y-steps i stedet for et enkelt efter hver x-scanningslinie, se figur 5.6b. Igen et tegn på, at steppositionen af y-motoren har indflydelse på støjen. En mulig forklaring på dette kunne være, at y-motoren tager half-steps, og at de enkelte steps altså er parvist støjmæssigt forskellige. Ved kun at køre hverandet y-step halveres opløsningen imidlertid, hvilket også ses på figur 5.6b.

Ved nærmere eftersyn bemærker man, at linierne på billederne er skiftevis lyse og mørke. Dette kan der til dels kompenseres for ved at trække middelværdien af en given x-scanningslinie fra alle værdierne i den tilhørende vektor; dette er ikke en yderligere forringelse af informationskvaliteten, da der allerede een gang er foretaget en kompensering ud fra antagelsen om, at prøven er flad. På figur 5.7a og 5.7b ses en detalje fra mønten, både med og uden denne kompensering, som er foretaget vha. et script i Matlab (se bilag F), og der ses en klar forbedring af billedet. Dog vil kompenseringen ikke fungere nær så godt på mere variende overflader, som f.eks. scanningen af hele mønten, hvor området uden for mønten ligger generelt lavere end selve mønten. Det skal bemærkes, at ovenfor nævnte kompenseringer gør det umuligt at oversætte pickuppens udslag til en højde. Dog er dette i forvejen ikke rimeligt at gøre, da støjen gør usikkerheden for stor. Derfor er det også udslagene i V-s, der er angivet på scanningsbillederne. Ændringer i topologien vil dog kunne ses tydeligt, og prøben er derfor stadig meget brugbar i forbindelse med 2D information.



**Figur 5.7:** (a) En detalje fra 20-kroners mønten, som viser et k. Liniestøjen er her meget tydelig. (b) Samme billede som a, blot korrigeret vha. et script i Matlab, hvor middelværdien bliver trukket fra hver linie. Der ses en klar forbedring af billedet. Originalen ses på figur 5.1d.

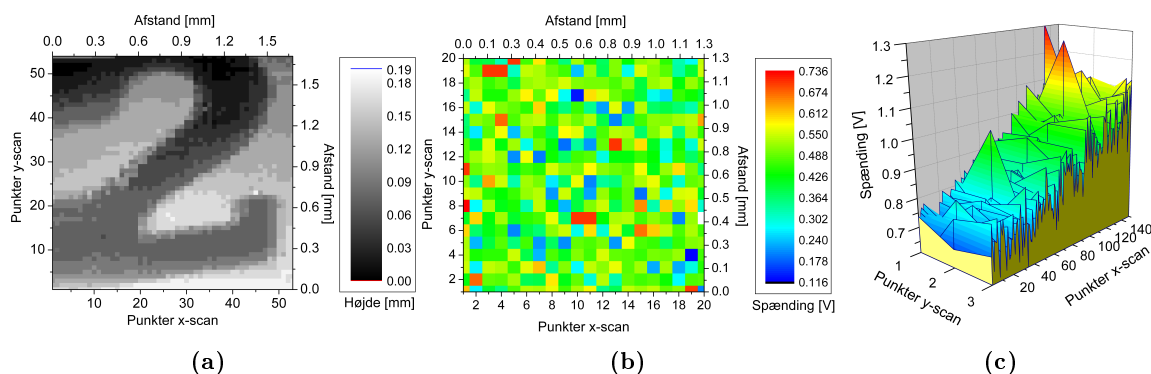
Det skal nævnes, at den observerede liniestøj ikke er unik for denne probe. Selv på state-of-the-art AFM'er ses der liniestøj, og der er derfor udviklet programmer som eksempelvis SPIP til at foretage billedbehandlinger med, så det ønskede signal fremtræder tydeligere. Det er imidlertid ikke muligt at fjerne støjen helt, da ikke al støjen er pænt lineær. Dog er den rimelig konsistent, hvilket igen indikerer, at det er motorerne og styreboksene, der er ansvarlig for hovedparten af støjen. En forbedring af billedkvaliteten kan derfor muligvis opnås ved at placere proben i et Faraday-bur, så den elektriske støj holdes væk.

## 5.4 Nåleproben

Nåleproben, som er beskrevet i kapitel 2, kan grundet sin virkemåde hverken bruges i konstant signal eller konstant højde modes. Det er altså kun muligt at bruge proben i punktscannings mode, hvor nålen langsomt nærmer sig prøven i alle punkter. At bruge proben i denne mode fik i stor udstrækning indflydelse på tiden, det tog at scanne en given prøve. Dog gav den meget præcise scanninger med god reproducerbarhed (se evt. figur 2.6b i kapitel 2), hvilket også var forventet, da det antages at nålens spids er mindre end stepstørrelsen. Dermed bliver stepmotorernes opløsning den begrænsende faktor.

På figur 5.8a ses et mål for, hvor præcise topografibildninger nåleproben kan opnå. Totallet er taget fra jubilæumsmønten (figur 5.1d), og er således af størrelsen  $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$ .

Nåleproben kan også kortlægge spændingsfordelingen over en prøve. Dette er ret unikt i det målestoksområde, der arbejdes i. På figur 5.8b ses en scanning med potentialeinformation af en lille device til at skabe frie elektroner. Denne består af et siliciumlag pålagt et 5 nm tykt lag glas som isolator og derefter et 20 nm lag platin. Ved at påtrykke en positiv spænding på platinlaget relativt til siliciumen kan elektroner accelereres igennem glaslaget, men da platinlaget er så tyndt, vil mange af elektronerne fortsætte igennem dette og dermed eksistere som frie elektroner. Dimensionerne på chippen er ca.  $1 \times 1 \text{ cm}^2$ , og er derfor i praksis umuligt at scanne med et STM. På billedet ville man forvente at se en nogenlunde jævn spændingsfordeling og enkelte mørkere områder, hvor der har været skabt kontakt til siliciumdelen. Dette er ikke helt hvad der ses, men den scannede chip var sandsynligvis ikke helt fungerende, idet der



**Figur 5.8:** På figur (a) ses totallet fra jubilæumsmøntens kant (se figur 5.1d), og som det ses på figuren er størrelsen af tallet ca.  $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$ . Dette giver en klar idé om, hvor god en opløsning det er muligt at opnå med nåleproben. På figur (b) ses en scanning af en platinoverflade på en device til at skabe frie elektroner. Spændingsfordelingen over en lille del af overfladen er afbildet. På figur (c) ses platinoverfladen fra den lille device påtryk en spændingsforskel på 2 V fra den ene til den anden ende. Der ses en tydelig spændingsgradient, dog med små variationer.

kun kunne påtrykkes omkring 1 V modsat de forventede 5 V ved 1 mA. Da det tidligere er vist at usikkerheden på spændingsmålingerne er meget lille, se kapitel 2, er det sandsynligt, at det er den virkelige spændingsfordeling, der er afbildet. Områderne med en stor spænding kan skyldes, at nålen har ødelagt platinlaget grundet den relativt store stepsize sammenlignet med platinlagets tykkelse. Dette kan evt. afhjælpes ved at montere en lille piezokrystal på spidsen af nålen, der har en bevægelseslængde på minimum stepstørrelsen, der så kan forhindre denne for lange nålevandring. Et andet interessant billede af chippen kan tages ved at påtrykke den et spændingsfald fra den ene til den anden ende af platinlaget. Dette blev gjort med et spændingsfald på 2 V, se figur 5.8c. Her ses en tydelig tendens til et spændingsfald hen over chippen, men det er ikke så homogent, som man kunne forvente. Variationerne i spændingen er større, end hvad der kan forventes at ligge inden for måleusikkerheden (jf. figur 2.6b), hvilket må betyde, at der er uregelmæssigheder i platinlaget.

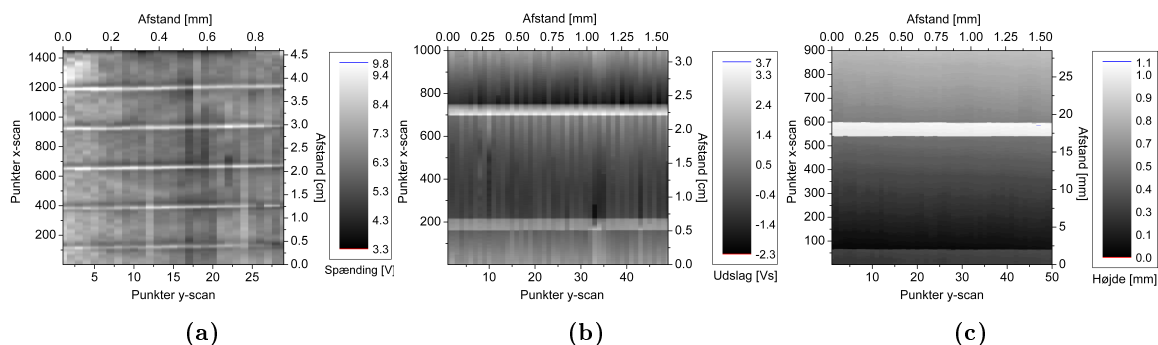
## 5.5 Opsummering

Resultaterne for de tre prober afprøvet i tre modes er nu blevet præsenteret. Den kommercielle sensor blev testet i to modes; konstant højde og konstant signal. Da der ikke var nogen større forskel på scanningerne i de to modes (udover de i afsnit 5.2 nævnte), er der i dette afsnit derfor valgt kun at sammenligne de to andre prober med en af de to modes, og da konstant højde var den mode, der var blevet arbejdet mest med, faldt valget på denne. Grammofonpickuppen og nåleproben blev hver kun testet i een mode, henholdsvis konstant højde og punktscanningsmode.

På figur 5.9 ses tre billeder taget af hver probe på den samme prøve (se figur 5.1b) for sammenligningens skyld. Når man skal sammenligne resultaterne, er det vigtigt at tage højde for flere ting; tiden scanningen har taget, opløsningen af scanningen, topografinformationerne samt støj og stabilitet af proben.

De 3 scanninger i figur 5.9 er taget over vidt forskellige tidsrum. Den kommercielle afstandssensors scanning (figur 5.9a) tog kortest tid, knap 10 min, trods at den kørte over alle riller og ikke blot de 2 første riller som de to andre prober. Grammofonpickuppens scanningsbillede (figur 5.9b) tog godt  $\frac{1}{2}$  time, og nåleprobens scanningsbillede (figur 5.9c) tog over 35





**Figur 5.9:** De 3 scanninger er alle taget af samme prøve (se evt figur 5.1b) men med forskellige prober, og illustrerer således fordele og ulæmper ved hver enkelt probe. Figur (a) er en scanning taget med den kommercielle afstandssensor, og som det ses er der ikke nær så tydelige afgrænsninger af rillerne som man ser på de andre figurer. Figur (b) er taget med grammofonpickuppen, og der ses en tydelig afbildning af de 2 riller, dog ses det også at der er en del problemer med drift i scanningen. Figur (c) er en scanning taget med nålepickuppen, og sammenlignet med de 2 andre figurer, har den langt bedre opløsning. Bemærk iøvrigt prøvens svage hældning, der også ses tydeligt afbilledet.

timer. Det ses altså tydeligt, at den kommercielle sensor og grammofonpickuppen var betydeligt hurtigere end nåleproben. Det ses dog, at opløsningen som forventet er langt bedre for nåleproben end den kommercielle sensor. Her ligger grammofonpickuppen igen i midten, da opløsningen på figur 5.9b ses at være bedre end opløsningen på figur 5.9a, men dårligere end figur 5.9c.

Der ses tydelige riller på alle 3 billeder i figur 5.9, omend der dog som forventet er en tydelig udflydning på figur 5.9a. Det ses på scanningsbilledet fra grammofonpickuppen (figur 5.9b) at de enkelte riller tydeligt bliver afbilledet, ligeledes burde nåleproben give en eksakt tolkning af højden mht. steps, grundet dens virkemåde. Det ses da også at afvigelsen på figur 5.9c med de opgivne værdier for dybden af rillerne er under 0.05 mm. Nåleproben er også den eneste probe, hvor der ikke ses en dominerende støj på scanningsbilledet. På grammofonpickuppen og den kommercielle sensor ses en tydelig liniestøj, som måske også var at forvente, idet især pickuppen er meget sårbar over for støj.

## Kapitel 6

# Konklusion

Gennem projektets forløb er alle de vigtige kerneelementer i et SPM blevet berørt, og det indledende formål om at fremstille en fungerende model er blevet opfyldt. Et fungerende scanningssystem er blevet præsenteret, bestående dels af et indkøbt xyz-bord, dels et LabView-program og endelig tre prober med hver deres virkemåde. Resultatet af de gennemførte scanninger er blevet præsenteret og analyseret, og det er illustreret hvorledes forskellige prober og scanningstrategier har indflydelse på den måde, hvorpå prøven visualiseres.

De tre prober var henholdsvis en kommercielt tilgængelig afstandssensor, en grammofonpickup med tilhørende forstærkningskredsløb, samt en selvkonstrueret nåleprobe. Scanninger med disse tre prober gav vidt forskellige billeder, og hver probe havde sine styrker og svagheder.

Den kommercielle afstandsmåler virkede ved at sende IR-lys mod prøvens overflade, for herefter at registrere det tilbagereflekterede lys med en fotodetektor. Størrelsen af det spændingssignal, som afstandssensoren gav, var afhængigt af både højden af det betragtede punkt af prøven og dennes reflektive egenskaber. Således måtte scanninger foretaget med denne probe tolkes, før det kunne fastlægges, om signalet fra proben var baseret på topografisk eller reflektiv information. Desuden var signalet fra proben ikke entydigt, hvis prøven ændrede sig for pludseligt, grundet signalets ikke-monotone karakter. Den kommercielle afstandssensor blev brugt under to af LabView-programmets modes; konstant højde og konstant signal med PI-styring. Disse to modes resulterede i forskellige visualiseringer af samme prøve, og understregede hermed vigtigheden af at kende til de mekanismer, som scanningen er et produkt af. Den kommercielle afstandssensor havde med sine estimerede 4 mm den laveste opløsning af de tre prober, men til gengæld udmærkede den sig ved hurtige scantider.

Grammofonpickuppen, som kan ses som en analog til AFM'et, kunne levere topografisk information ved at integrere det inducerede spændingssignal, som blev forstærket op gennem det tilhørende elektriske kredsløb. En del arbejde blev lagt i at reducere støjen og driften fra pickuppen, da målinger med den ellers ikke ville være mulige. Modellens motorsystem viste sig at være årsag til meget kraftig asymmetrisk støj, som det dog lykkedes at undertrykke ved efterbehandling af signalet i LabView og Matlab. Herved blev det muligt at opnå billeder med høj topografisk detaljegrad, dog domineret af liniestøj, som gjorde det umuligt at udtrække eksakt højdeinformation fra scanningerne. Scantiderne for denne probe var lidt længere end for den kommercielle afstandssensor, men stadig rimelige.

Endelig var der nåleproben, som kunne måle spændingsfordelinger og topografi af en ledende prøve. Nåleproben var suverænt den mest præcise probe, både med hensyn til opløsning, men også med hensyn til højdeinformationer, som blev gengivet korrekt inden for stepmotorernes usikkerhed. Herudover kunne den med sine spændingsmålinger vise hvorledes

Egenskaber		Nåleproben	Grammofonpickuppen	Den kommercielle afstandssensor
Fysikken bag	Probe	Nål	Tip på cantiliver	Lysdiode og opfanger
	Information	Spænding mellem nål og prøve	Integration af induceret spænding	Registrering af IR-lysintensitet
Eksperimentelle begrænsninger	Opløsning givet af	Motorens stepstørrelse	Tippens bredde	Prøvens refleksion samt interaktionsområdet
	Opløsning (x,y)	30 $\mu\text{m}$	Ca. 0,2 mm	> 4 mm
	Opløsning (z)	19,8 $\mu\text{m}$	Fin	Grov
	Prøve begrænsning	Prøven skal være elektrisk ledende	Højdeforskelle må ikke overstige 2 mm	Prøven skal være IR-reflekterende
	Signalstøj	Næsten ingen	Meget støj og drift	Begrænset
	Tid/pixel	Ca. 20 ms	Ca. 35 ms	ca. 2,5 s
Udtagelige data	Data	Topografi og spændingsbillede	Topografi	Topografi og refleksionsevne
	Faktisk højdeinformation	Givet ved antal steps	Kan ikke bruges grundet korrektioner i data	Skal tolkes og kan ikke direkte udtrækkes

**Tabel 6.1:** Tabel over de vigtigste egenskaber af de 3 prober.

potentiallet fordelte sig på overfladen af prøven for makroskopiske prøvestørrelser; en egenskab, som kommercielt tilgængelige SPM'er ikke har. Probens store svaghed var, at den måtte benytte LabView-programmets punktscanningsmode, som er meget langsom. Dermed var denne probes scanningstider flere størrelsesordener større end det, de to andre prober formåede. Dog skal dette ses i relation til alternativet. En prøveoverflades spændingsfordeling vil man som oftest kortlægge med et STM, som vil være 64 år om at scanne et område på størrelse med det, som nåleproben var 35 timer om at scanne (figur 5.9c), sidstnævnte dog i en noget lavere opløsning. Hertil skal tilføjes, at dette er et tænkt eksempel, da STM'er ikke arbejder over så store områder.

De tre probers scanninger understregede, at valget af probe i høj grad afhænger af hvilke krav, der stilles til scanningsbilledet. På tabel 6.1 er der lavet en oversigt over de vigtigste egenskaber for de tre prober. Som sammenligning er opløsningen af AFM og STM ideelt set på sub-nanometerskalaen [15]. Det er en langt bedre opløsning end modellens, men det har aldrig været intentionen at opnå en tilsvarende opløsning. Derimod kan modellen scanne over et langt større område, hvilket også gør det lettere visuelt at følge scanningen.

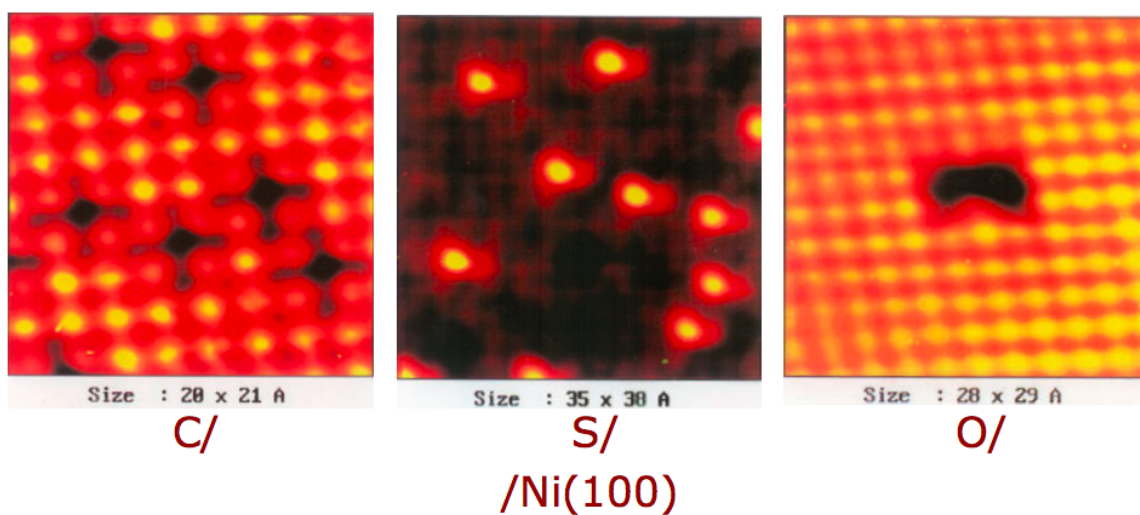
En af udfordringerne i projektet var signal- og billedbehandlingen, som krævede en forståelse af selve scanningsprocessen. Ved at analysere billederne sås der eksempler på velkendte fænomener fra eksisterende SPM'er, såsom AFM og STM, heriblandt tipfoldning, liniestøj og tvetydige signaler dannet af en kombination af vekselvirkninger. Tilstædeværelsen af disse fænomener er med til at understrege ligheden med eksisterende SPM'er og dermed troværdigheden af modellen. Sideløbende med modelaspektet lykkedes det at skabe et praktisk anvendeligt redskab, som kan opnå resultater, der ikke er mulige med eksisterende udstyr. Dermed udmundende dette projekt i ikke kun en fungerende model, men også i et værktøj, der kan bidrage med vigtig information.

# Litteratur

- [1] <http://en.wikipedia.org/wiki/Microscope>
- [2] [http://en.wikipedia.org/wiki/Electron\\_microscope](http://en.wikipedia.org/wiki/Electron_microscope)
- [3] [http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning\\_probe\\_microscope](http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_probe_microscope)
- [4] J.-M. Friedt, "Realization of an optical profiler: Introduction to scanning probe microscopy", American Journal of Physics, Vol. 72, No. 8, s. 1118-1125, august 2004
- [5] [http://sensing.honeywell.com/index.cfm?ci\\_id=140301&la\\_id=1&pr\\_id=132998](http://sensing.honeywell.com/index.cfm?ci_id=140301&la_id=1&pr_id=132998)
- [6] Donald A. Neamen, "Semiconductor Physics and Devices, Basic Principles", Irwin, Chicago, 3rd edition, 2003
- [7] D. Brandon & W. D. Kaplan, "Microstructural Characterization of Materials", John Wiley & Sons Ltd., 2nd edition, 2008
- [8] [http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic\\_cartridge](http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_cartridge)
- [9] <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/0025/0900766b80025a5c.pdf>
- [10] [http://en.wikipedia.org/wiki/Dielectric\\_strength](http://en.wikipedia.org/wiki/Dielectric_strength)
- [11] <http://www.nanovidensbank.dk/sw8204.asp>
- [12] [http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning\\_tunneling\\_microscope](http://en.wikipedia.org/wiki/Scanning_tunneling_microscope)
- [13] <http://www.arrickrobotics.com/c4md2.html>
- [14] [http://en.wikipedia.org/wiki/PID\\_controller](http://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller)
- [15] B Bhushan et al., "Springer Handbook of Nanotechnology", s. 325-342, Springer 2004

## Bilag A

### Eksempel på forskellige overfladetolkninger



**Figur A.1:** 3 billeder taget med et STM af forskellige atomer på en Ni-overflade. Uden indsigt i de fysiske principper bag STM'et er det umuligt at sige, hvad billederne egentlig fortæller. Billederne er fra en forelæsning i DTU-kurset 33257.

## Bilag B

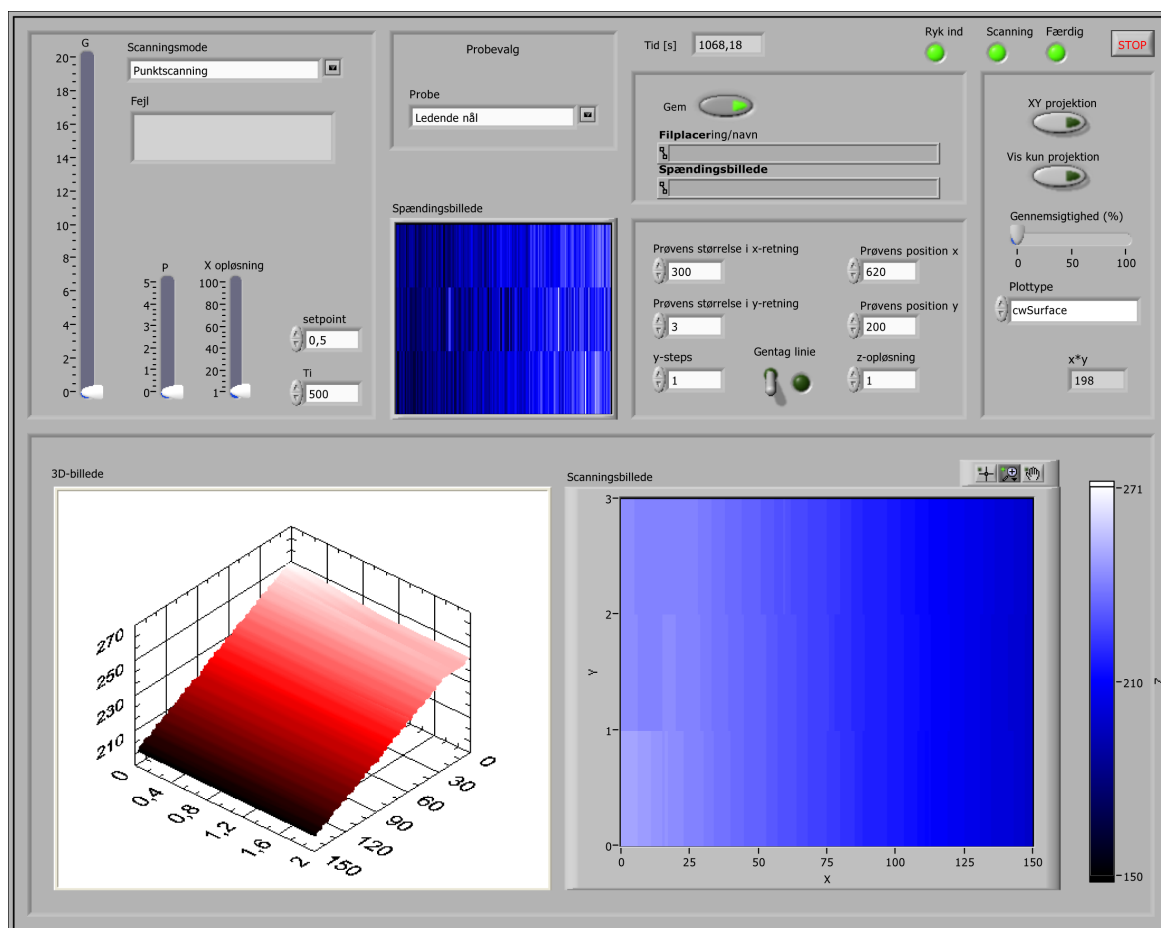
# Tabel over benyttede LabView-kommandoer

Kommando	Funktion
!1h*	Sender en homing kommando til c4-1 motor nr. *
!1m2f*	Sender en move forward kommando til c4-1 motor 2 * steps
!1m2f*n	n'et beder om besked når kommandoen er udført
!1m1r*	Sender en move reverse kommando til c4-1 motor 1 * steps
!1m1f10m2r50	Sender motor 1 forward 10 steps og motor 2 reverse 50 steps
!1wr0	Fjerner acceleration og deceleration fra c4-1

**Tabel B.1:** Liste over nogle anvendte kommandoer sendt over serielkommunikation til C4-boksen.

## Bilag C

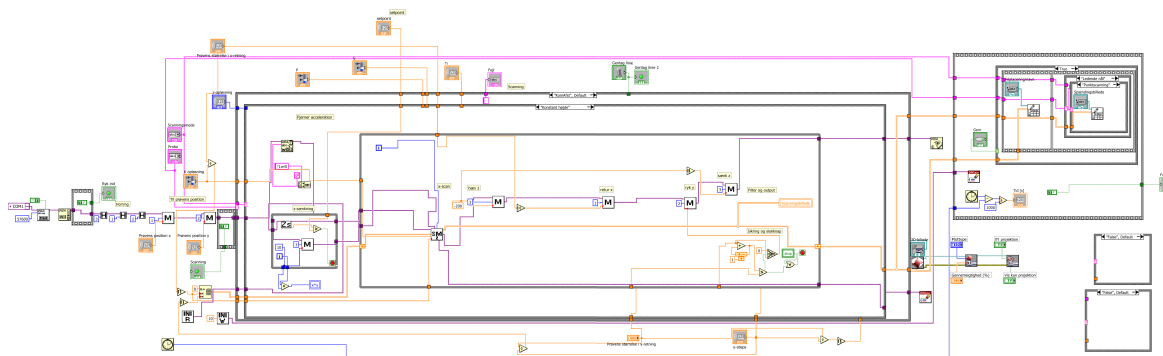
# LabView-programmets frontpanel/GUI



**Figur C.1:** Frontpanelet til LabView-programmet er her afbildet efter endt scanning. Øverst indstilles probetype og scanningsmode, samt diverse relevante parametre. Kontrollen i højre side er udelukkende for at kunne styre udseendet af 3D-afbildningen nederst. De to blå billeder er, startende oppefra, den alternative billedeinformation og den geometriske/reflektive information. Sidstnævnte opdateres løbende under scanningen, og er dermed brugerens vindue til at følge forløbet af scanningen.

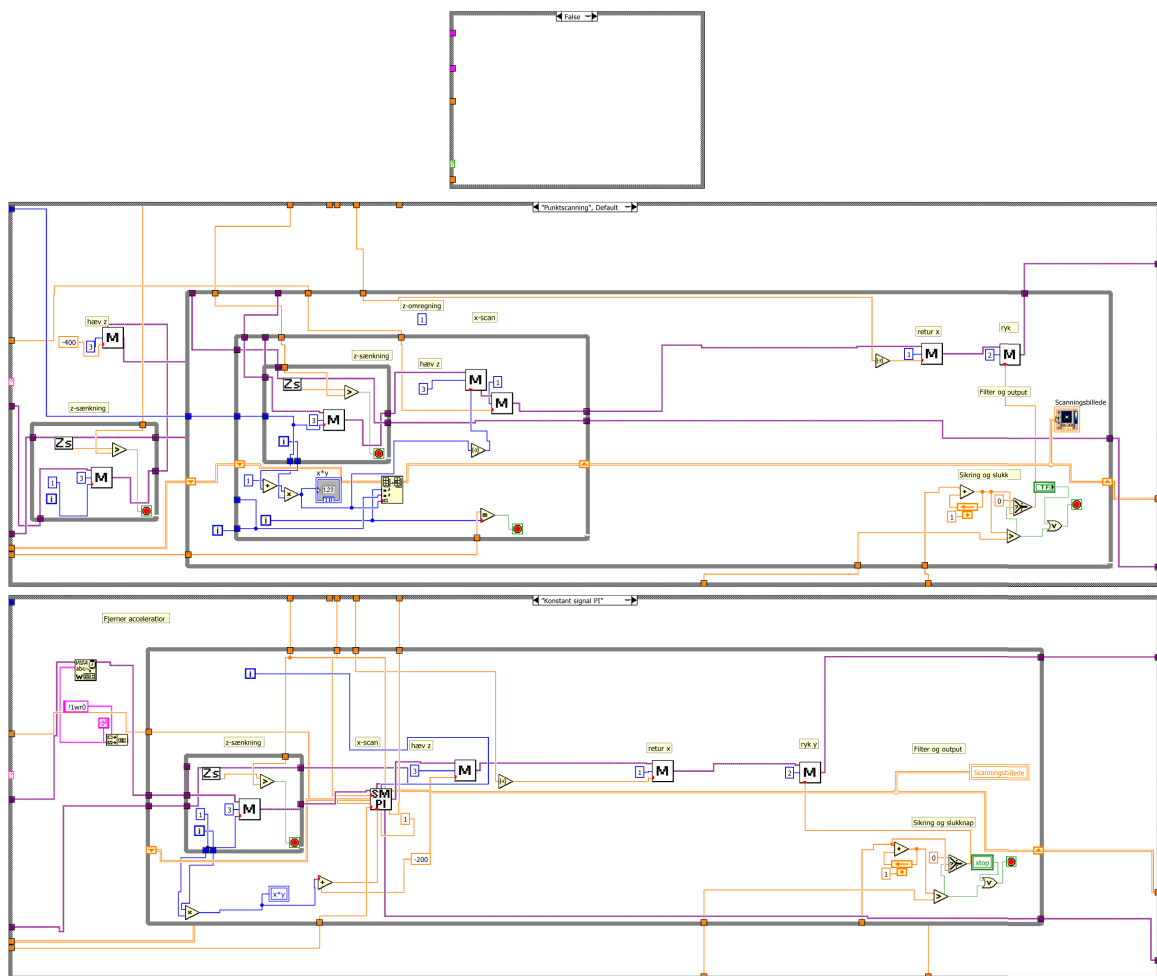
## Bilag D

# LabView-programmet

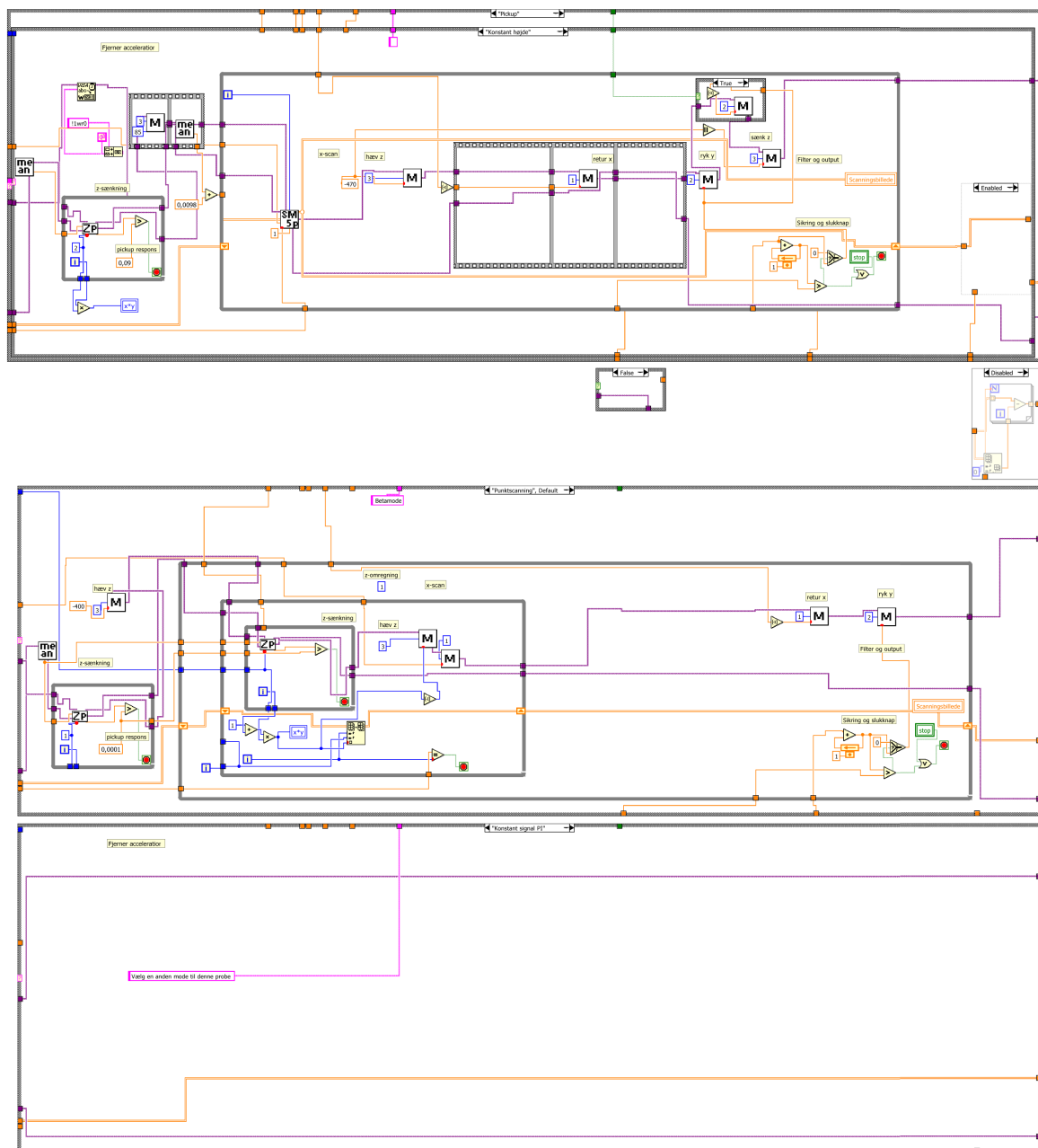


**Figur D.1:** Oversigt over LabView-programmeringen. Ovenfor er selve hoved VI'en vist. På de følgende figurer ses andre cases.

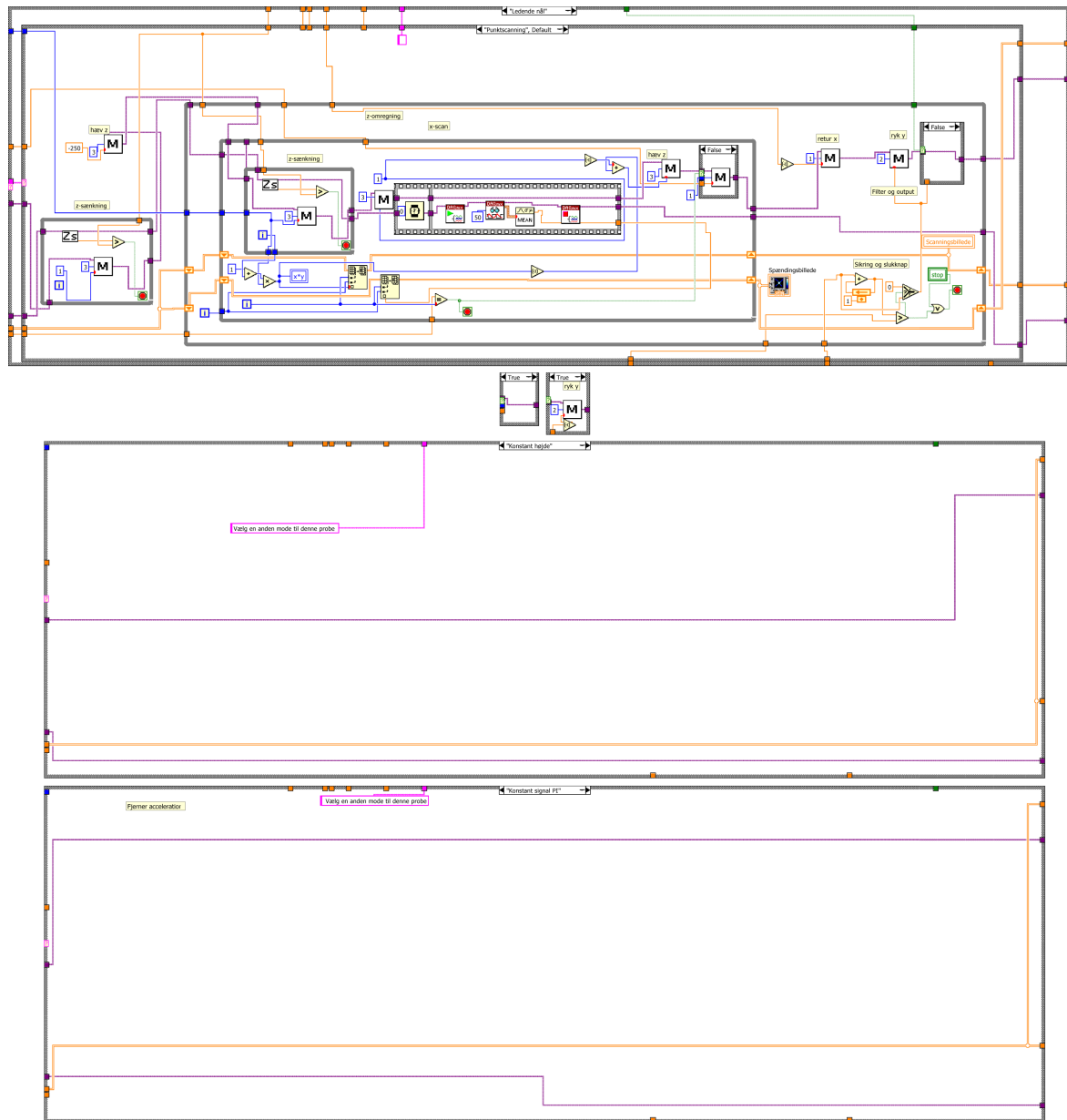




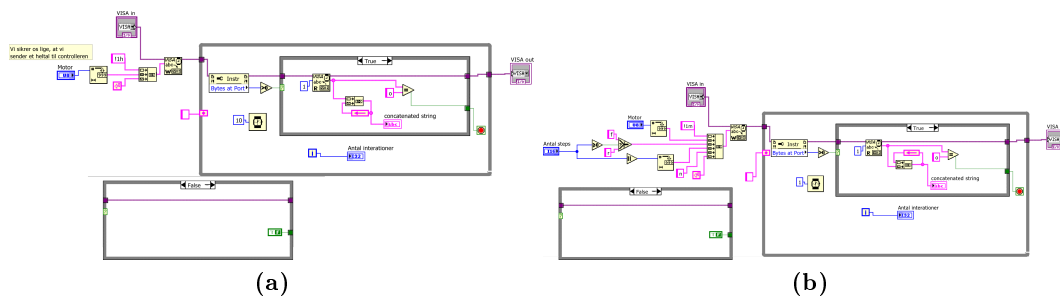
Figur D.2



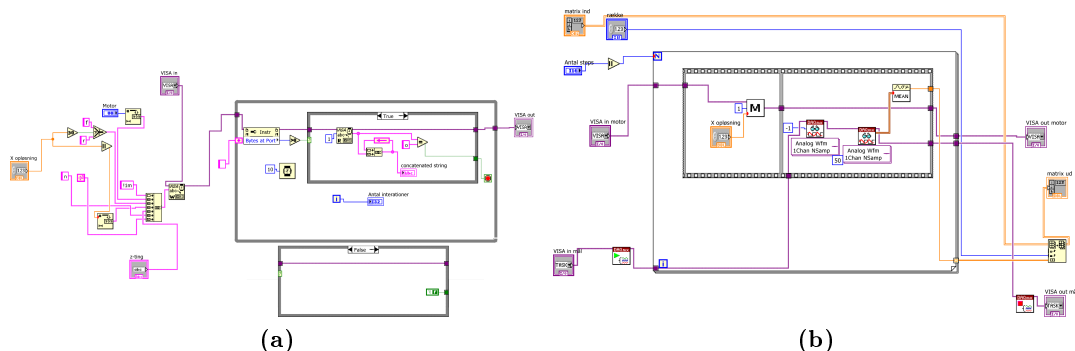
Figur D.3



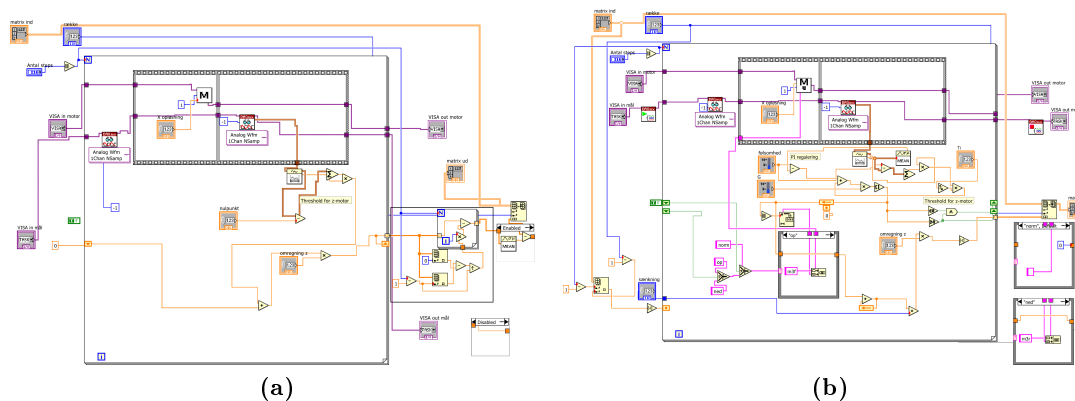
Figur D.4



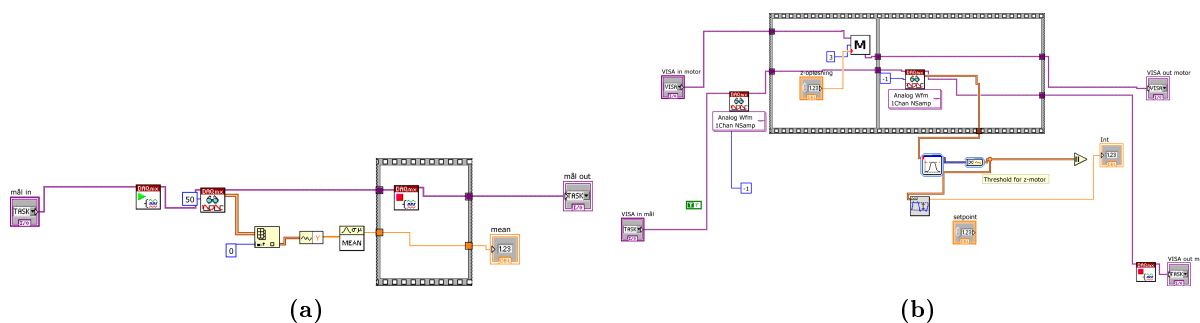
Figur D.5: (a) Homing-sub-VI: Fortæller en motor at den skal returnere til udgangspotionen og monitorerer denne proces. (b) Move-sub-VI'en: Fortæller en motor at den skal køre et antal steps i en bestemt retning.



**Figur D.6:** (a) Move\_underscan-sub-VI'en: Er en move-kommando der giver mulighed for at styre to motorer. Denne bruges til konstant signal mode'en. (b) Scanmove\_2-sub-VI'en: Tager et antal målinger på datakortet mens motor 1 kører. Middelværdien skrives til et matrixelement.



**Figur D.7:** (a) Scanmove\_5-sub-VI'en: Tager integralet af målingerne foretaget under en motorbevægelse og lægger dette til integralet fra forrige punkt. Det hele skrives til et matrix-element. (b) Scanmove\_PI-sub-VI'en: Tager middelværdien af en række målinger foretaget under en motorbevægelse. En regulering af z-motoren foretages som resultat af denne værdie PI-reguleret i forhold til set-pointet. Stepositionen af z-motoren skrives til et matrix-element.



**Figur D.8:** (a) z\_komafst-sub-VI'en: tager 50 målinger og sender middelværdien af disse ud. (b) z\_pickup-sub-VI'en: Måler under en bevægelse af motor 3, filtrerer signalet for højfrekvent støj og piller så den maksimale amplitudeværdi ud.

## Bilag E

### Tabel over brugte figurer

Prøve	Scannings mode	Kommerciel afstandscensor	Grammofon pickup	Nål
Metalplade med buler	Konstant signal	Figur 5.2a	-	-
	Konstant højde	Figur 5.5a	-	-
Messingplade med 5 riller	Konstant højde	Figur 5.9a	Figur 5.9b	-
	Punktscanning	-	-	Figur 5.9c
Mønt (fra 1800tallet)	Konstant højde	Figur 5.3a ved 5V Figur 5.3b ved 1.2V	-	-
Mønt (Dannebrog 20kr)	Konstant højde	-	Figur 5.7a (1 step y-retning) Figur 5.7b (2 step y-retning)	-
Papir	Konstant højde	Figur 5.4b (1,2V)	-	-
Elektron emitter chip, spændingsbillede	Punktscanning	-	-	Figur 5.8c Figur 5.8b

**Tabel E.1:** Oversigt over figurer i kapitel 5

## Bilag F

# Matlab script

```
1 function liniekorrektion
2 clear all;
3 A = dlmread('pickup_mont_punktum.txt','\t');
4 A = update(A);
5 dlmwrite('skib_matlab_3.txt',A,'\t');
6
7
8 function A = update(A)
9 for j = 1:A(1,:);
10     for i = 1:A(:,1);
11         b = mean(A(:,j));
12         A(i,j) = A(i,j)-b;
13     end
14 end
```