

ATOMIC FORCE MIKROSKOPET

-

Institut for Fysik
Danmarks Tekniske Universitet

nanoteket

Jakob Svagin

April 2005

Gymnasieforsøg med AFM

I skal i denne øvelse stifte bekendtskab med vores atomic force mikroskoper.

Disse mikroskoper bruges i høj og stigende grad i både forskning og industri. Mikroskoperne udmærker sig ved at kunne tage 3D billeder af overfladestrukturer på næsten ethvert materiale.

Vores mikroskoper er udviklet specielt til undervisning, og af prishensyn er nogle af de mere avancerede funktioner taget ud. Derfor er vi begrænset til at undersøge plane, hårde overflader. Vi kan ikke tage billeder af porøse materialer, pulver eller våde prøver. Men I må gerne tage egne prøver med og forsøge at tage billeder af dem til øvelsen.

Det forudsættes at I har læst denne vejledning når I kommer til øvelsen. Meget af den kan I læse hurtigt igennem og vende tilbage til når I sidder ved mikroskopet, men vi regner med at I har sat jer ind i, hvordan mikroskoperne virker, og hvad øvelserne går ud på.

Vi skal i denne øvelse som minimum lave følgende målinger:

- Billede af kalibreringsgitter.
- Billede af overfladen på en CD.

Opgaverne til dette forsøg er inddelt i to dele. De første opgaver skal I have lavet og diskuteret i klassen inden besøget her i Nanoteket. De andre skal I besvare efter forsøgene og alle opgaverne skal afleveres sammen med rapporten over forsøgene.

God fornøjelse.

Jakob Svagin

Indhold

1 Scanning Probe Microscopes, SPM	1
1.1 Nanoteknologi	2
2 Atomic Force Microscope, AFM	3
2.1 Hvordan virker det?	3
2.1.1 Nål og cantilever	4
2.1.2 Detektion	5
2.2 Constant Height og Constant Force	6
2.3 Tipfoldning	7
3 EasyScan AFM	8
3.1 Betjening af mikroskopet	8
3.2 AFM prøver	10
3.2.1 CD	10
3.2.2 Kalibreringsgitter	10
3.2.3 Nanorør på guld	11
4 Databehandling	12
4.1 Billedbehandling med EasyScan	12
4.2 Billedbehandling med WSxM	13
5 Opgaver	15
5.1 Opgaver I	15
5.2 Opgaver II	15
6 Links	16

Kapitel 1

Scanning Probe Microscopes, SPM

Når folk snakker om mikroskoper mener de som regel optiske mikroskoper. Men ordet betyder sådan set bare et apparat til at se på små ting ¹. Vi skal her beskæftige os med en helt anden type mikroskoper; de såkaldte Scanning Probe Microscopes, forkortet SPM. I et optisk mikroskop bliver alle billedpunkterne dannet samtidig. I et SPM bliver billedpunkterne dannet ét for ét. Det foregår ved at en probe, også kaldet tip, nål eller spids, i hvert enkelt billedpunkt tager en måling. Billedet bliver så dannet ved at man tildeler værdien af målingen i hvert enkelt billedpunkt en farve. Var målingen høj bliver den tilsvarende pixel lys, og vice versa. Den samme idé med billeddannelse ud fra lokale målinger kendes jo også fra vejruddisgen, hvor Europakortet farvelægges alt efter, hvor varmt der er de pågældende steder.

Når man i forbindelse med SPM taler om at skanne prøven, betyder det at den probe man anvender bevæges henover prøven én linie ad gangen, indtil man har dækket hele det felt, man ønsker at danne et billede af. Det minder lidt om at læse en tekst, hvor man bogstav for bogstav og linie for linie afkoder teksten.

Man kan bruge mange forskellige prober og mange forskellige vekselvirkninger. Vi har dog her i Nanoteket kun to typer skanning mikroskoper: Scanning Tunneling Microscopy, STM, og Atomic Force Microscopy, AFM.

Disse to medlemmer af SPM familien er afgjort de bedst kendte og de mest benyttede. STM benyttes hovedsageligt i forskningen, og var den første type SPM, der blev opfundet. AFM benyttes i mange højteknologiske virksomheder og er den simpleste type SPM.

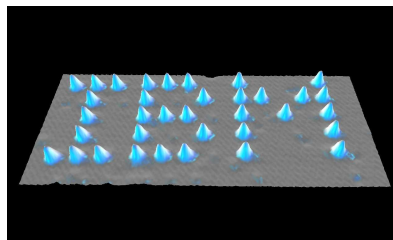
¹Fra græsk *mikrós*, lille, og *skopein*, betragte

1.1 Nanoteknologi

SPM er nogle af de vigtigste hjælpemidler i nanoteknologien. I Nanoteket her på Institut for Fysik giver vi de studerende mulighed for at stifte bekendtskab med disse værktøjer allerede tidligt i studiet. STM bruges andre steder på DTU til forskning², mens det i industrien er Atomic Force mikroskopi, AFM, der anvendes. AFM er en type mikroskop beslægtet med STM, og vi har også AFM'er i Nanoteket.

Noget kan siges at være nanoteknologi, hvis det har funktionelle strukturer på en skala mellem 0,1 og 100 nanometer. En nanometer er en milliardtedel af en meter, altså $10^{-9}m$. En nanometer er ti gange større end diameteren af det mindste atom, brintatomet, som er ~ 1 Ångstrøm. For at få en fornemmelse for, hvor stor en nanometer er, kan vi tage dét vi kan se med det menneskelige øje. Vi kan se ting af størrelsesordenen 20.000 nanometer, så vi kan altså ikke se nanoteknologiens forskningsobjekter med det blotte øje. En nanometer er ca. 40.000 gange mindre end diameteren af et menneskehår.

En nanometer er altså en meget lille længde! Nanoteknologien er i rivende udvikling. Faktisk *kan* man i dag skrive bogstaver, der er omkring en nanometer høje. Med SPM mikroskoper kan man manipulere med overfladen af de atomare strukturer, dvs. ændre stoffet atom for atom eller molekyle for molekyle. I 1990 flyttede Don Eigler 35 xenon atomer på en guldoverflade, således at han skrev sin arbejdsgivers navn med atomer. Resultatet ses på figur 1.1.



Figur 1.1: Det berømte billede af IBM skrevet med xenon atomer. [1]

²Se f. eks. centrene CAMP og ICAT

Kapitel 2

Atomic Force Microscope, AFM

Et AFM er velsagtens den forståelsesmæssigt simpleste type af den familie af mikroskoper, der kaldes skanning probe mikroskoper, SPM. Det fungerer nogenlunde som når en blind person danner sig et indtryk af sine omgivelser ved hjælp af en stok. Så selvom vi sikkert allesammen har fået at vide at: ”Hov, hov, man ser ikke med fingrene!”, så er det i AFM lige nøjagtigt, det man gør.

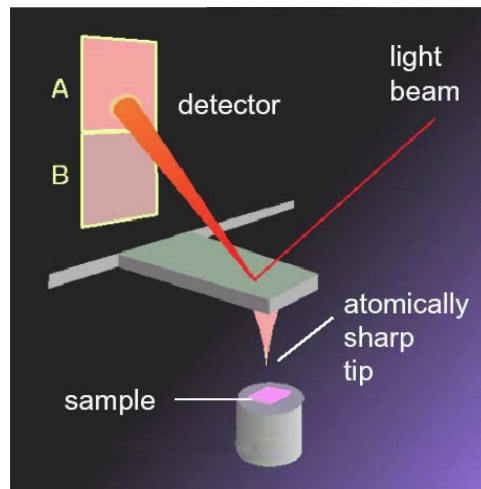
AFM er den type SPM, der bruges mest idag. Det skyldes en række forhold,

- Man kan undersøge ikke-ledende materialer.
- der kræves minimal prøvepreparation.
- Man kan skanne større områder end med STM.
- Man kan undersøge prøver i væske, hvilket særligt er interessant til biologiske undersøgelser.

2.1 Hvordan virker det?

Proben i et AFM er en fin nål monteret for enden af en bladfjeder¹. Man lader nålen røre prøven ganske let, således at nålen ved skanning er nødt til at bevæge sig op og ned i takt med prøvens overfladestruktur. Ved at afbillede bladfjederens bevægelser får man dannet et billede af overfladen.

¹Som regel bruges det engelske ord *cantilever*



Figur 2.1: Den meget fine nål følger prøvens overfladestrukturer ved skanning. Ved hjælp af en laserstråle og en fotodiode, omsættes nålens bevægelser til et elektrisk signal, som vi ved computerens hjælp kan danne et billede af overfladen ud fra. [2]

2.1.1 Nål og cantilever

For at opnå den bedst mulige afbildning af overfladen skal fjederen give et målbart udslag selv for små påvirkninger. Den fysiske lov, der forbinder fjederens udslag med den kraft den påvirkes af, hedder Hookes lov:

$$F = -k \cdot x \quad (2.1)$$

Ifølge 2.1 er udslaget størrelse, x , omvendt proportionalt med fjederkonstanten, k . Dermed skal fjederkonstanten være så lille som muligt, for at små påvirkninger giver store udsving.

Fjederkonstanten kan udregnes således,

$$k = \frac{E}{4} \cdot \frac{wt^3}{l^3} \quad (2.2)$$

hvor E er Youngs modul², og w, t og l er henholdsvis bredde, tykkelse og længde af vores cantilever.

Men fjederen skal ikke bare være blød, den skal også have en høj resonansfrekvens, for ellers bliver den for følsom overfor mekaniske vibrationer. Den skal kunne skanne i et rimeligt tempo henover prøven, hvilket giver støj på et par Hz , og så er der rystelser i bygningen, luftstrømme og lyd. Vi skal altså gerne op på en egenfrekvens på 10-100 kHz .

²Youngs modul er en materialeegenskab, der fortæller os, hvor stift materialet er. For silicium er $E \sim 130GPa$ og for aluminium er $E \sim 70GPa$, [3]

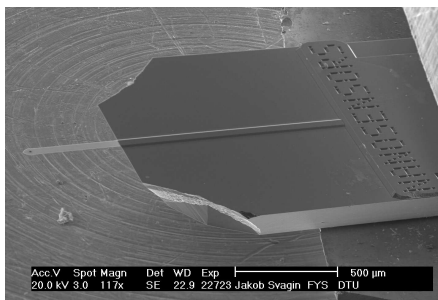
Resonansfrekvensen kan ifølge [4] udregnes som,

$$\omega_0 = \left(\frac{k}{m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

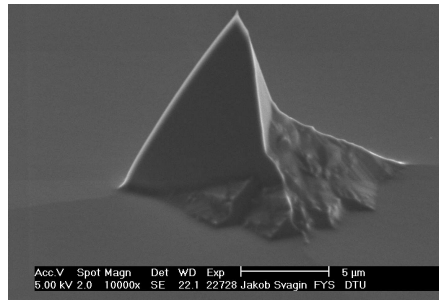
Mekaniske vibrationer med frekvens ω , der transmitteres gennem et system med resonansfrekvens ω_0 , reduceres med en faktor $(\omega/\omega_0)^2$. Den høje resonansfrekvens er dermed med til at sikre at vi får rimeligt støjfri målinger. [4].

Mikrofabrikerede cantilevers af silicium giver en god kombination af lav k og høj ω_0 . Derudover kan cantilevers i silicium fremstilles parallelt, således at man får mange cantilevers med ensartede mekaniske egenskaber.

På figur 2.2 og 2.3 ses billeder af de sensorer vi bruger i vores AFM'er. Billederne er taget med instituttets elektronmikroskop.



Figur 2.2: Elektronmikroskopbillede af den siliciumchip, hvorpå cantilever med nål sidder. Alleryderst på cantileveren ses en lille prik. Dette er nålen som ses i nærbillede til venstre



Figur 2.3: Nålen yderst på vores bladfjeder. Det er det yderste af denne nål, der rører prøven. Krumningsradiussen af nålens spids er på under 10 nm.

2.1.2 Detektion

Nu har vi så en nål, monteret for enden af en meget blød bladfjeder, der skannes henover prøven, hvorved nålen, og fjederen, vil følge overfladens konturer. Udfordringen er nu at måle nålens bevægelser med nanometer præcision eller bedre. Udover at være meget præcis må vores detektion ikke forstyrre nålen eller skabe støj, og så må metoden gerne kunne bruges både i luft, væske, vakuum og til lavtemperaturforsøg.

Der findes flere forskellige metoder til at gøre dette. Den metode som bruges i vores AFM er langt den mest almindelige og kaldes optisk detektion eller laser detektion.

Under fremstillingen af vores cantilevers lægger man et reflekterende lag på bagsiden, således at den virker som et spejl. Man fokuserer så en laser-

stråle på cantileveren, lige over nålen, og enhver bevægelse af cantileveren vil resultere i en tilsvarende bevægelse af den reflekterede laserstråle, som let kan måles med en todelt fotodiode.

Den kraft som laserstrålen påvirker cantileveren med er meget lille, så den kan vi se bort fra³. Ved målinger ved meget lave temperaturer skal man dog overveje om laserstrålen giver anledning til lokal opvarmning, men for de fleste anvendelser er det ikke et problem. Hvis man laver AFM målinger på prøver i væske, kræver det selvfølgelig at væsken er gennemsigtig for laserens bølglængde og at brydningsindexet ikke ændrer sig i løbet af forsøget.

Laserstrålen reflekteres som sagt op på en todelt fotodiode, se figur 2.1. En fotodiode er kendetegnet ved at den skaber en strøm proportional med det antal fotoner, den absorberer. Lad os kalde strømmen generet af fotodioden to halvdele for henholdsvis I_A og I_B . Vi kan dels måle de to signaler, hver for sig, men også kigge på differensen $I_A - I_B$. Denne differens vil være 0, hvis der lige meget lys på de to halvdele, positiv, hvis I_A er størst og vice versa.

Man lader nu den reflekterede laserstråle ramme begge fotodiodens to halvdele, således at differensen er 0. Når lysstrålen bevæger sig, vil forskellen for små udsving mellem I_A og I_B være proportional med bevægelsen, og man kan dermed registrere cantileverens bevægelser.

2.2 Constant Height og Constant Force

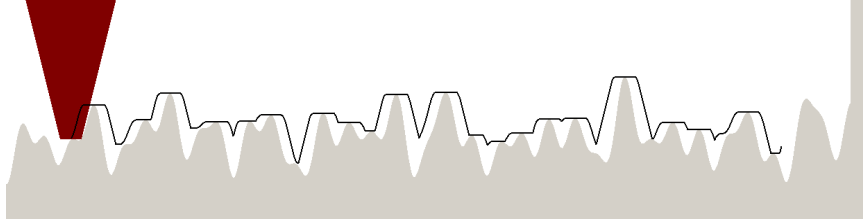
Et AFM kan bruges på flere måder. Vi skal se lidt på den metode, der kaldes Contact Mode. Som navnet antyder er der fysisk kontakt mellem nålen og prøven. Hvis vi kender cantileverens fjederkonstant, kan vi lade den presse ned imod prøven med en bestemt kraft, typisk $5 - 20nN$. Vi måler hele tiden cantileverens bevægelser, og ved at lade et computerstyret feedbackloop justere nålens z -position kan vi holde kraften konstant. Dette kaldes Constant Force Mode. De fleste AFM målinger laves på denne måde. Billederne dannes ved at plote feedbackloopets output, som funktion af nålens x, y -koordinater.

Alternativt kan vi slukke for feedbackloopet og derved lade nålen skanne i en bestemt højde over prøven. Dette kaldes Constant Height Mode. Billederne dannes ved at plote differenssignalet fra fotodioden som funktion af nålens x, y -koordinater.

³Lyser vi med en laserpegepind på et almindeligt spejl udøver vi en kraft på $\sim 10pN$, og den laser vi har i vores AFM er væsentligt svagere. Lysets kraft bruges dog i en såkaldt optisk pincet til at fastholde mikroskopiske objekter, [5].

2.3 Tipfoldning

Fænomenet tipfoldning⁴ betyder at ved SPM forsøg bliver tippens struktur blandet sammen med strukturen af den prøve man undersøger, se figur 2.4.



Figur 2.4: Hvis prøvens strukturer er skarpere end tippens, vil det gøre billedet uskarpt.

Man gør sig derfor store anstrengelser for at producere så spidse tips som overhovedet muligt. Efterhånden som de bliver slidt vil tipfoldning gøre det sværere at få gode billede af små strukturer.

På de tips vi bruger til AFM undersøgelser i nanoteket har tippens yderste del en krumningsradius på $\sim 10 \text{ nm}$. Man kan derfor regne med at alle strukturer bliver ca. så meget bredere.

⁴ofte bruges det engelske Tip Convolution.

Kapitel 3

EasyScan AFM

De AFM'er vi har i Nanoteket er lavet af firmaet Nanosurf. De er beregnet til undervisningsbrug, hvilket betyder at de er meget brugervenlige og relativt robuste. Til gengæld kan de ikke nå samme opløsning som et professionelt AFM.

3.1 Betjening af mikroskopet

De gælder med AFM'erne som med STM'erne: Vær forsigtig med udstyret! Er I i tvivl om, hvorvidt I gør tingene rigtigt så spørg.

De sensorer vi bruger til AFM er mikrofremstillede i silicium, se afsnit 2.1.1. De koster et par hundrede kroner stykket, så det er ingen katastrofe, hvis der ryger én en gang imellem, men hold det venligst på et minimum.

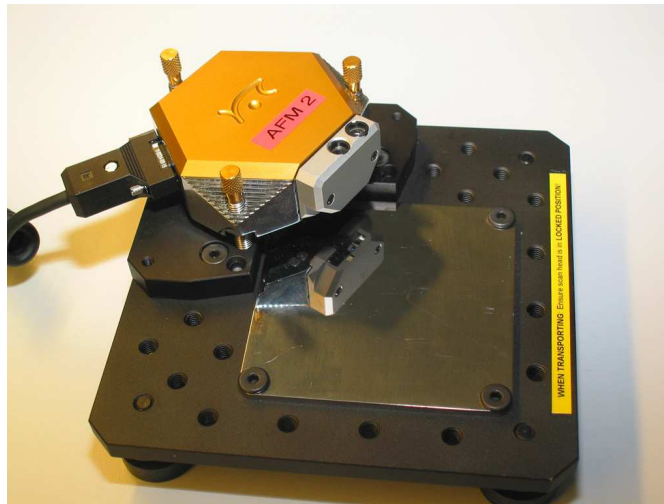
I må ikke selv skifte sensoren i jeres AFM! Hvis cantileveren knækker, må I spørge om hjælp.

Mikroskopet står på en lille vibrationsdæmpet plade, se figur 3.1. Denne plade er med til at fjerne støj fra omgivelserne, som mikroskopet er meget følsomt overfor. Men man kan placere mikroskopet, hvor man vil, det behøver ikke stå på pladen. Vil man undersøge kvaliteten af den nye lakering som bilen har fået, tager man sit AFM og stiller det direkte på taget af bilen. Til alle de forsøg som er beskrevet her, skal det dog blive stående på pladen.

Før I starter EasyScan programmet på computeren, skal I tænde for strømforsyningen til de to elektronikasser. Når dette er gjort skulle den røde diode på den ene kasse gerne stå og blinke. Når I ser det, kan I starte programmet. Computeren kommunikerer nu med mikroskopet, for at finde ud af om det er et STM eller et AFM.

Når det er sket åbnes der 4 vinduer, 'Scan Panel', 'View Panel', 'Feedback Panel' og 'Approach Panel' (se figur ??).

Men inden vi kan begynde målingerne skal vi have lagt en prøve i mikroskopet. Til alle de her beskrevne forsøg sættes prøverne fast på et stykke dobbeltklæbende tape på den lille stålplade, der er forsynet med magneter



Figur 3.1: EasyScan AFM.

nedenunder.

Sørg for at mikroskopets tre ben er indstillet således at prøven kan skubbes ind under mikroskopet, uden at komme i nærheden af sensoren. *Kig godt efter, før I starter!*

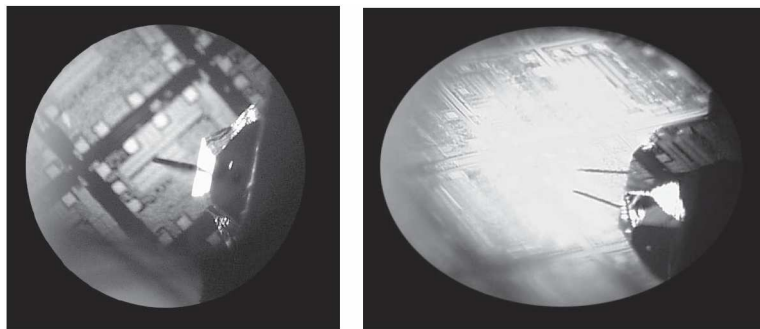
Når prøven ligger under sensoren, sænker I ved hjælp af de 3 skrueben mikroskopet ned imod prøven. Sørg for at mikroskopet ikke kommer til at stå skråt. Når I er et par mm fra prøven skal I til at bruge de to linser der sidder i mikroskopet. I den venstre linse ser I ned på sensoren ovenfra. I den højre ser I den fra siden. Se figur 3.2

Brug lidt tid på at orientere jer gennem linserne, og hold udvig efter spejlbilledet af cantileveren. Når I har fået øje på skyggen, kan I fortsætte med at sænke mikroskopet med de 3 skruer. I skulle gerne ende et par mm fra prøven, samtidig med at mikroskopet skal stå vandret.

Nu skal vi bruge 'Approach Panel' i programmet. Med '↑' og '↓' justeres sensoren i forhold til prøven indtil afstanden er omkring 1 mm . Så trykker I på 'Approach', og nu overtager computeren styringen. Den sænker nu nålen ned imod prøvens overflade imens den hele tiden måler cantileverens afbøjning som beskrevet i 2.1.2. Når nålen rammer prøvens overfladen, begynder afbøjningen af cantileveren. Den stopper først når vi når den kraft som er sat i 'FeedBack Panel'. Som udgangspunkt er den sat til 20 nN . Når denne kraft nås, starter skanningen.

Start altid med at tage et oversigtsbillede. Man skanner altid et kvadratisk billede og sidelængden indstilles i 'Scan Panel' med parameteren 'ScanRange'. Start på $20 - 40\ \mu m$.

Nu skal vi indstille mikroskopet sådan at det plan vi skanner ligger paral-



Figur 3.2: Her ser vi to billeder taget igennem AFM'ets integrerede linser. Til venstre ses siliciumchippet, hvorudfra cantileveren stikker. Brug denne linse til at udvælge et bestemt sted på prøven. Til højre ser vi sensoren fra siden. Læg mærke til at cantileveren spejler sig i prøven. Dette er afgjort den nemmeste måde bedømme afstanden til prøven på.

lelt med prøvens overflade. Dette foregår fuldstændigt ens for STM og AFM, se derfor vejledningen ved figur ??.

3.2 AFM prøver

3.2.1 CD

Hvis man forsøger at undersøge en CD man har med hjemmefra istedet for det lille stykke som hører til mikroskopet, vil man nok blive skuffet. Der er ingen struktur at se. Det skyldes at strukturerne er skjult af et gennemsigtigt plastiklag, der beskytter mod ridser. Laseren, der bruges til at aflæse informationen i en CD-afspiller, kan dog se igennem dette lag og ind til strukturerne, men det kan vores AFM ikke.

Det lille stykke CD, som hører til mikroskopet er taget fra en CD, som endnu ikke havde fået påført det beskyttende lag. Derfor er der direkte adgang til datalagets strukturer.

3.2.2 Kalibreringsgitter

Dette gitter er fremstillet ved hjælp af de samme ultrapræcise teknikker, som man benytter til fremstilling af både mikroprocessorer og sensorer til AFM. Gitteret består af et mønster af firkantede fordybninger, der er ætset ned i overfladen, og vi ved meget præcist, at de er $5\mu m$ brede og $98nm$ dybe. Dette bruges til at sikre sig at de afstande og dybder man måler på andre prøver er rigtige.

3.2.3 Nanorør på guld

For at sikre os at vi har fundet en god metode til at fordele vores nanorør på en prøve, kan vi tage oversigtsbilleder med AFM. Vi kommer ikke til at kunne se nogen struktur på det enkelte nanorør, men vi kan få en idé om, om det er håbløst at lede efter dem med STM.

Desværre kan vores AFM'er kun køre i Contact Mode. Det medfører at vi skubber nanorørerne rundt på overfladen. For at forhindre dette har vi lavet nogle prøver, hvor vi efter deponeringen af nanorørerne, har pådampet 50 Å guld. Dette er ikke nok til at dække nanorørerne med et jævnt lag guld. Istedet vil det sætte sig i små klatter rundt omkring, men det er nok til at vi undgår at de bliver skubbet rundt.

Kapitel 4

Databehandling

Alle billeder gemmes i EasyScans eget format (*.ezd). Billedfilerne kan man så efterbehandle enten i EasyScan programmet eller i et andet egnet databehandlingsprogram. Vi har to til vores rådighed: **SPIP** og **WSxM**. Det første er et forskerklasse databehandlingsprogram, udviklet her på DTU af Image Metrology. Nanoteket har én licens til programmet, for tiden installeret på computeren ved det optiske mikroskop. I er velkomne til at bruge det, men det kommer først rigtigt til sin ret, hvis man har en hel del forstand på billedbehandling.

4.1 Billedbehandling med EasyScan

I kan foretage de fleste af de målinger I skal med det samme program, som I bruger til at tage jeres data med: EasyScan.

Programmet er ikke særligt fremragende, men har den fordel frem for WSxM at man kan være sikker på, at de afstande og højder man måler, er rigtige. Her en kort gennemgang af de værktøjer I skal/kan bruge.

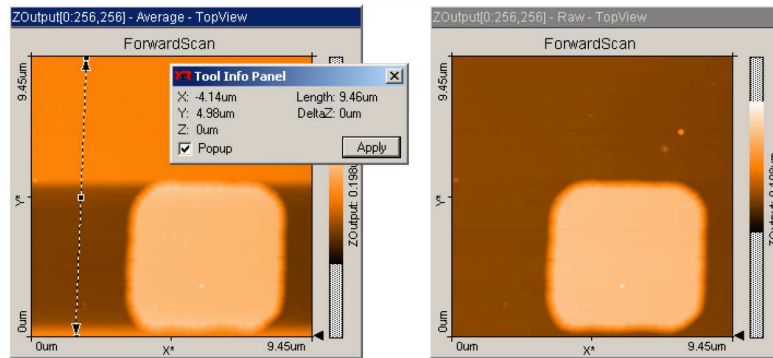
I 'View Panel' kan I lege med farveskalaen, indtil I får det bedste billede frem.

I 'Data Info Panel' kan I se de indstillinger I brugte til at tage målingen.

I 'Tools' finder I et par nyttige funktioner.

- 'Measure Length': Med denne funktion kan I måle afstanden mellem to punkter i billedet. Resultatet vises i 'Tool Info Panel'.
- 'Measure Distance': Kan måle den vinkelrette afstand mellem to parallelle linier. I tegner den ene linie og placerer den anden.
- 'Measure Angle': Kan måle vinklen mellem to linier.
- 'Create a Cross-Section': Giver jer en højdekurve langs den linie I definerer. 2. akse kommer først på når I trykker 'Apply'.

- 'Correct Scan Line Levels': Denne funktion kan bruges til at fjerne uønskede effekter fra den automatiske Z-justering. Træk en linie igennem punkter der burde have samme højde, men ikke har det. Programmet justerer nu højderne. Se figur 4.1



Figur 4.1: Værktøjet 'Correct Scan Line Levels' kan bruges til fjerne højdeforskelle skabt af den automatiske Z-justering.

4.2 Billedbehandling med WSxM

Hvis I har lyst til at lege mere med jeres billeder kan I prøve kræfter med programmet WSxM. Det er et program som firmaet Nanotec har gjort gratis tilgængeligt fra deres hjemmeside, www.nanotec.es, som reklame for deres hardware. Programmet har flere funktioner end EasyScan, og kan lave flotte 3D-billeder.

Advarsel! Der kan være problemer med korrekt læsning af skalaerne på jeres billeder. I skal derfor sikre jer at målinger af længder og højde i WSxM, passer med resultaterne fra EasyScan.

Når I åbner et af jeres billeder med programmet skal I være opmærksomme på at der ikke er sat kryds ved nogle af de databehandlingsmuligheder man kan sætte til at køre når billedet åbner. I øverste venstre hjørne af 'Open'-menuen er der fem muligheder for at vælge. De skal alle være valgt fra. Vi vil gerne gøre det selv for at lære, hvad der sker.

De funktioner I skal bruge til at starte med er:

- Global Plane: Selvom I har indstillet skanneplanet i forhold til prøveplan så er det måske stadig en anelse skråt. Denne funktion fitter en plan flade til jeres data og fratrækker det bedste fit.
- Equalize: Denne funktion giver jer et histogram over, hvor mange pixels i jeres billede der har en given værdi. Med venstre og højre musek-

nap kan I skære enderne af skalaen af, således at jeres data bliver spredt ud over hele farveskalaen.

- Flatten: Denne funktion tager jeres data linie for linie, og fratrækker enten et offset, en ret linie eller en parabel. Da mikroskopet automatisk prøver at kompensere for drift ved at justere Z-offset for hver linie, så kan målingerne hoppe fra den ene linie til den anden. Dette retter 'Flatten' op på.
- 3D: Giver flotte 3D billeder af jeres data. I menuen 3D? kan I indstille rotation, lys og meget andet. Leg med det!

Kapitel 5

Opgaver

5.1 Opgaver I

1. Udregn fjederkonstanten for en bladfjeder lavet af et stykke alufolie med dimensionerne. $l = 4mm$, $w = 1mm$ og $t = 10\mu m$. Hvor stor en kraft skal der til for at afbøje denne cantilever $1nm$? Det svarer til tyngdekraften på hvor mange gram? [4].
2. Udregn resonansfrekvensen for ovennævnte bladfjeder.
3. Udregn fjederkonstant og resonansfrekvensen for en cantilever lavet i silicium med følgende dimensioner. $l = 450\mu m$, $w = 50\mu m$ og $t = 2\mu m$. Forklar, hvorfor vi har valgt at bruge denne type sensor.

5.2 Opgaver II

4. Mål bredden og dybden af fordybningerne på kalibreringsgitteret. Sammenlign med fabrikantens specifikationer: XY-periodicitet = $10\mu m$, dybde = $98nm$.
5. Vurdér på baggrund af jeres målinger, hvor meget data, der kan ligge på en CD.
6. Beregn, hvor langt datasporet på en CD er.
7. Hvis de mindste fordybninger på CD'en var $1cm$ lange, hvor hurtigt skulle læsehovedet så køre for at læse de nødvendige data?

Kapitel 6

Links

- www.sciencesite.dtu.dk/nano/Intro/intro.htm. God side om nanoteknologi! Læs her detaljeret om historien bag STM, om anvendelser og nanotubes og meget mere. Se især linket ”blikket rettet mod det mindste”, under ”historier”.
- www.ulab.ku.dk. Ungdomslaboratorium, hvor de også har STM, og hvor dele af denne vejledning er taget fra.
- www.nobel.se/physics/laureates/1986/press.html. 1986 Nobel Prisen i fysik. Historisk baggrund for STM, forståelig beskrivelse af teknikken. Engelsk.
- www.nanosurf.ch/. NanoSurf’s hjemmeside. Producenten af easyScan STM. Her findes tekniske beskrivelser og billeder af udstyret, der kan bruges til rapportskrivningen. Engelsk.
- <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/museum>. Imponerende side om optisk mikroskopi.
- www.veeco.com/nanotheatre. Flotte billeder taget med forskellige typer SPM’er.
- www.almaden.ibm.com/vis/stm/gallery.html. Mange flotte billeder fra IBM’s STM-gruppe.
- www.embl-heidelberg.de/~altmann. Masser af links til sider om SPM af alle slags.
- www.nanotec.es. Her kan man hente et gratis program til efterbehandling af billederne. Kan læse .ezd-formatet.

Litteratur

- [1] <http://www.almaden.ibm.com/vis/stm/stm.html>.
- [2] <http://userpage.chemie.fu-berlin.de/~pcfp/V19/pdf/v19.pdf>.
- [3] <http://www.webelements.com>.
- [4] R. Wiesendanger. *Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy*. Cambridge University Press, 1994.
- [5] <http://www.nbi.dk/tweezer>.