



UNIVERSITETET I AGDER

Testing av mekanisk påkjenning på solcelle

Utført av:

Yangzi Zhang

Veiledere:

PROF. Tor oskar Sætre

Phd. Muhammad Tayyib

Masteroppgaven er gjennomført som ledd i utdanningen ved Universitetet i Agder og er godkjent som del av denne utdanningen. Denne godkjenningen innebærer ikke at universitetet inntår for de metoder som er anvendt og de konklusjoner som er trukket.

Universitetet i Agder, 2012

Institutt for ingeniørvitenskap

Fakultet for teknologi og vitenskap

Forord

Prosjekt ble gitt som diplomoppgave ved universitetet i agder, institutt for ingeniørvitenskap, våren 2012.

Oppgaven gikk ut på:

- Mekanisk testing av solcelle og wafer via en tre punkt-bøying servo-hydraulic benchtop test maskin 988-804-22. Det er to typer test som ble gjennomført: syklus-test og brudd-test; tegne arbeidslinje for syklus-test og finne brudd-kraft og brudd-lengde for brudd-test.
- Studere elektroluminescens bilde, og bruke elektron mikroskopet å se utmattings overflate på solcelle.

For at forsøkene skulle la seg gjøre, måtte det brukes en del utstyr, i den forbindelse ville jeg være hjelpeløs uten bistand fra to personer. Undertegnede vil derfor takke:

- Veileder og Professor Tor Oskar Sætre for hjelp til bruk av elektron mikroskopet, og for og alltid å ha stilt opp og kommet med gode forslag.
- PHD Muhammad Tayyib som har tatt seg tid til å hjelpe meg med solcelle testing i Maskin hall, videre har han vært til stor hjelp når vi tok elektroluminescens bilder i labben hos elkem.

Grimstad 15/05 2012

Yangzi Zhang

Innholdsfortegnelse

Forord.....	2
1. Sammendrag.....	5
2. Teori.....	6
2.1 Bakgrunn om silisium.....	6
2.2 Solcellens virkemåte.....	7
2.3 Multi-krystallinsk silisium.....	9
2.3.1 Optiske tap.....	9
2.3.2 Multi-krystallinske silisium ingot.....	10
2.4 Multi-krystallinske Silisium Wafer.....	10
2.4.1 Produksjon av silisium wafer.....	11
2.4.2 Kontakt dannelse.....	11
2.5 Deformasjon.....	13
2.5.1 Generelt om elastisk og plastisk deformasjon.....	13
2.5.2 Elastisk deformasjon.....	13
2.5.3 Plastisk deformasjon.....	14
2.5.4 Arbeides linjen.....	16
2.5.5 Sprøtt brudd av silisium.....	17
2.5.6 Utmattingsbruddets karakteristikk.....	19
2.6 Silisium form.....	20
2.7 Test metoder.....	21
2.7.1 Tre-punkters bøyd test.....	21
2.7.2 Fire-punkters bøyd test.....	21
2.7.3 Ball-brudd test.....	22
2.8 Elektroluminescens (EL) avbildningsteknikk.....	23
2.8.1 Luminescens.....	23
2.8.2 Elektroluminescens.....	24
3. Eksperimentelt oppsett.....	26
3.1 Servo-hydraulic benchtop test maskin.....	26

3.2 Si-Plan's 879 digital servostyring og data innhentesenhet system	27
3.3 Elektroluminescens bilde system	29
3.4 Testene	30
3.4.1 Testing av multi-krystallinske silisium solcelle	30
3.4.2 Testing av multi-krystallinsk silisium wafer	31
4. Resultater.....	34
4.1 Resultat kurver	35
4.1.1 Solcelle test.....	35
4.2.2 Wafer test	40
4.2 Elektroluminescens bilder	44
4.3 SEM Bilder.....	48
5. Diskusjon.....	50
5. 1 mekanisk test	50
5. 2 Elektroluminescens bilder	53
6. Konklusjon	54
7. Referanser	55
Figur liste	57
Tabell liste.....	59
Vedlegg	60

1. Sammendrag

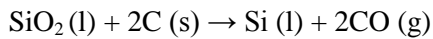
Solenergi industrien er den raskest voksende fornybar energi-sektoren over hele verden; reduksjon av silisium wafer tykkelse uten å øke wafer styrke kan føre til en høy brudd-prosent under påfølgende håndtering og prosessings skritt. Sprekkdannelse i solceller har blitt en av dem viktigste årsakene til solcelle svikt og avvisning. Derfor er det viktig å vurdere den mekaniske styrken av solceller. [21] Formålet med dette prosjektet er å forstå den mekaniske oppførselen til silisium solceller.

En deloppgave var å teste silisium solceller og wafer ved en tre punkts bøye test maskin, det er to typer tester som ble gjennomført: brudd-test og syklus-test, testene gir informasjon om brudd og bøye-stryke av cellene. På grunn av de skjebnesvangre feilene, for eksempel små sprekker som ligger innenfor wafer overflaten og finger avbrytelse som ikke kan visuelt observeres i bildet som er tatt av en typisk CCD IR kamera. For å fremheve de indre og ytre feilene som reduserer konvensjon effektiviteten av silisium solcelle etter brudd og syklus test, ble prøvene tatt av elektroluminescens (EL) avbildningsteknikk. Til slutt brukte vi scannig mikroskop får se utmattings over flate av solcelle og wafer.

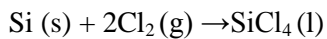
2. Teori

2.1 Bakgrunn om silisium

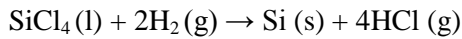
Grunnstoffet silisium finnes ikke fritt i naturen, men er ett av de vanligste grunnstoffene på jorda. Vi finnes dette grunnstoffet som silikater i stein og som silika (SiO_2) i sand. Silisium hentes fra kvartsitt, en granulært form av kvarts; ved å redusere høy-renhetskarbon i en elektrisk arc ovn:



Produksjonen ble senere usatt for klor, for så og bli til silisium tetraklorid (SiCl_4):

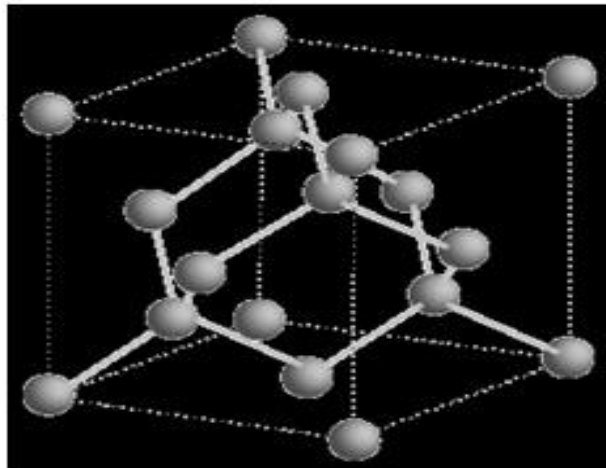


Silisium tetrakloriden blir destillert og deretter redusert til en renere form av elementet med hydrogen:



Senere renses silisiumet ytterligere ved en prosess kalt sone raffinering. [1]

Rent silisium danner krystaller som har samme struktur som diamant, hvert silisium atom danner enkle kovalente bindinger med fire til støtende silisium atomer som om ringer dette tetrahedrally. Linjene mellom silisium atomer er gitt i figur 2. 1 indikerer nærmeste naboobligasjoner. Silisium kubens sider 0.543nm. [2]



Figur 2. 1: Struktur til silisium. [2]

Det er list opp relevante konstanter for Si i tabell 1.

Atomicmasse	28,0855 u
Atomicradius	2,62 Å
Tetthet	$1,4 \frac{gm}{cm^3}$
Termiskkonduktivitet	$1,48 \frac{W}{cmK}$
Smeltepunkt	1683 K
kovalentradius	1,11 Å
kokepunkt	2628 K
Termisk utvidelseskoeffisient	$2,33 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Tabell 2. 1: Diverse materialeegenskaper til silisium.[2]

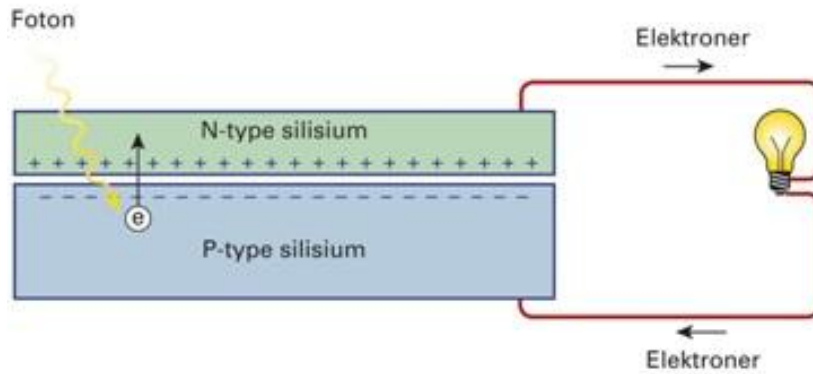
2.2 Solcellens virkemåte

Solceller er i prinsippet bygget opp av to tynne lag av halv leder metallet silisium (Si). De to tynne lagene av silisium i solcella er ”dopet” med andre atomer.

I det øvre laget (som kalles n-laget) er det inn dampet noen atomer av grunnstoffet fosfor (P). Fosfor står i 5. hovedgruppe og har således 5 ytterelektroner. Dette skaper en viss ubalanse i fordelingen av elektroner i bindingene mellom atomene i blandingen. Det femte elektronet blir på et vis ”til overs” og kan relativt lett flytte på seg.

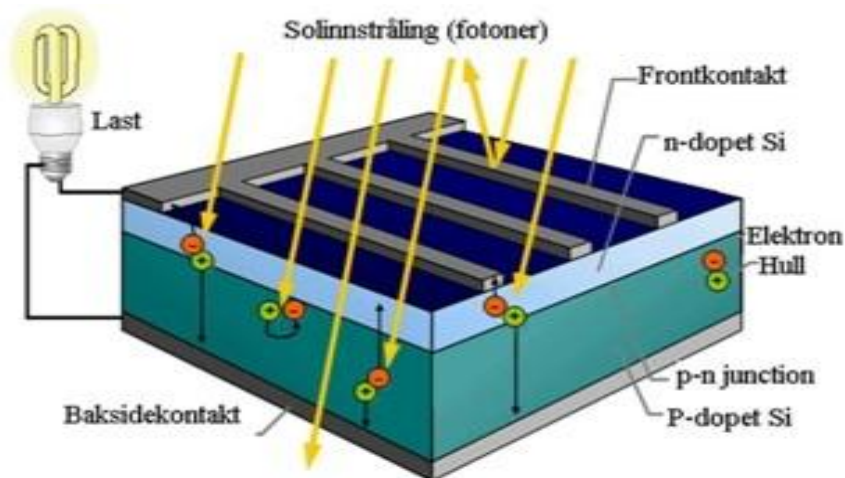
I det nedre laget (som kalles p-laget) er det inn dampet noen atomer av grunnstoffet bor (B). Bor står i 3 hoved gruppe og har så lede bare tre ytter elektroner. Når et B-atom da plasseres inn blant Si-atomer vil det oppstå et underskudd av negativ ladning i bindingene rundt B-atomet. Dette underskuddet kalles et ”positivt hull”.

Et slikt positivt hull kan tilsynelatende flytte på seg, og er med på å danne en ladningsfordeling mellom n og p-lagene i grensesjiktet. Virkemåten til ei solcelle bygger på at denne ladningsfordelingen kan oppføre seg som et slags elektrisk sperresjikt mellom n- og p-lagene. Se figur 2. 2. [3]



Figur 2. 2: Prinsippskiss av en solcelle sett. [3]

Forenklet kan vi si at lysfotoner kan slå løs og "løfte" elektroner fra bl.a. p-laget slik at de kan passere denne sperren. Et "løftet" elektron etterlater seg et positivt hull. Dermed dannes det en negativ og en positiv pol i solcella. Det silisium laget (n-laget) som ligger nærmest lyset blir den negative polen i solcella, mens laget under (p-laget) blir den positive polen. Ved å legge et tynt nett av metaller som leder strøm godt (eks. sølv eller aluminium) på utsiden av de to silisiumlagene, vil det kunne gå en strøm av elektroner rundt i den ytre kretsen. Figur er illustrert i 2. 3. [3]



Figur 2. 3: En solcelle i tverrsnitt. [3]

En solcelle på 10*10 cm gir omtrent 0,5 V, og da dette er for lite for praktiske anvendelser serie koble man vanligvis 36 celler for en spenning på 18 V som er lettere å lagre.

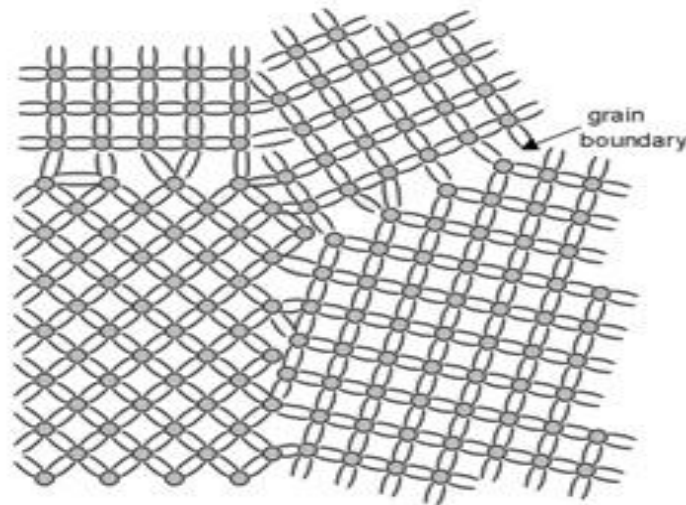
Men det er ingen regel for hvor mange solceller det skal være på et solcellepanel. En typisk størrelse på en solcellemodul er 0,98*0,44m. Virkningsgraden ligger på omkring 13 %. For å øke spenningen, seriekobles cellene med hverandre og for å øke effekten uten å øke spenningen parallell kobles cellene. Dette er virkemåten for tradisjonell silisiumsolcelle. [4]

2.3 Multi-krystalinske silisium

Singel-krystalinske og multi-krystalinske silisium baserte solceller utgjør over 80 % av dagens kommersielle solcelle produksjon. [5] Multi-krystalinske silisium generelt har mindre effektivt enn singel-krystalinske silisium, men teknikken for produksjon av multi-krystalinske silisium er mindre kristisk og billigere enn singel-krystalinske silisium.

Multi-krystallinske silisium kan produseres i forskjellige måter. Den mest populære metoden er avstøpnings prosess, der smeltet silisium blir direkte helt inn i en form for deretter å stivne til en ingot. Start materialet er raffinert lav-klasse silisium, isteden for den høy-klasse semikonduktor klassen krev for singel-krystall materiale. Kjølings grad er en faktor som av gjør den endelige størrelsen på en krystalinske ingot, samt fordelingen av urenheter. Formener vanligvis firkantet, ingoter kan klippes og skives i kvadratiske celler som passer mer kompakt i en PV modul. [6]

Materiell kvaliteten av multi-krystalinske silisium er lavere enn singel-krystalinske silisium på grunn av tilstedeværelse av korn grensene. Korn grensene kan redusere solcelle- ytelsen ved å blokkere ladning barer strøm, gir ekstra energi i bånd gap, dermed gir effektiv rekombinasjons steder, og danne parallell kobling for strømmen gjennom p-n forbindelse. For å unngå betydelig rekombinasjons tap på korn grensene, korn må være minst et par millimeter i størrelse. Det tillater og så enkelte korn til å utvide fra forsiden til baksiden av cellen, sørge for mindre motstand mot ladning barer strøm og generelt redusere lengden av korn grensene per enhet. Struktur av multi-krystalline silisium er i figur 2. 4.



Figur 2. 4: På grensen mellom to krystall kornene er båndene belastet, som fører til degradering av de elektriske egenskapene. [7]

2.3.1 Optiske tap

Optisk og rekombinasjonstap reduserer celle ytelsen fra ideelle verdier, grunn til optisk tap i solceller: 1) Blokkering av top kontakt dekning. 2) Overflate refleksjon. 3) Bakside kontakt refleksjon.

For å minimere refleksjon kan vi danne overflatemønster. Hvilken som helst «grov» overflate kan redusere refleksjon ved å øke sjansen til og reflektere lyset sprettende tilbake på overflaten, isteden for ut i fri luft igjen.

Overflaten av krystalinske silisium kan være mønstret jevnt ved etsing langs forside av krystall planene. Krystallstrukturen av silisium fører til en overflate som består av pyramider, hvis overflaten er passende justert med hensyn til de interne atomene. [7]

2.3.2 Multi-krystallinske silisium ingot

Multi-krystalinske struktur med korn i størrelsen av mm til cm i bredden og omtrent søyleformet langs størkningretningen fra bunnen til toppen er karakteristisk for directional solidification (DS).

Directional solidification (DS) kan gjennomføres i en separat smeltedigel etter at silisium helles i det fra en smeltende smeltedigel. Denne prosessen blir vanligvis kalles som silisium avstøpning. Silisium avstøpning er en god metode, men på grunn av varme tap under støping og forvarming av formen er prosessen dyr, så er smelting og størkning i samme smeltedigelen mer foretrukket økonomisk.

Det er to forskjellige DS metoder: varmevekslings metode og akselerert smeltedigel rotasjons teknikk, i dette avsnittet vil vi introdusere varmevekslings metode. Varmevekslings metode teknologi har blitt utviklet for å gro single-krystallinske materialer med såing. Men multi-krystalinske silisium krystall grodd i liten størrelse med HEM uten såing er funnet for å ha nesten tilsvarende elektriske egenskaper som mono-krystalinske silisium til solceller.

Et eksempel på varmevekslings metode oven er en produsert ved GT-Equipment Technologies Inc. (Nashua, USA). Ovn er godt isolert, grafitt motstands varme element gir varme med jevn temperatur under smelting av ladningen. Råvare som brukes for denne ladningen er en solar grad poly-silisium som har akseptor konsentrasjon (Boron) $< 0,3$ ppb, konsentrasjon (fosfor) $< 0,5$ ppb og indre Karbon konsentrasjon $< 0,7$ ppm. Den høye kvaliteten av varmevekslings metode silisiumet skyldes av å bruke en høy-renhets kisel smeltedigel med svært kontrollert overgang til fast form i et vakuum miljø. Etter smelting blir smeltedigelen senket lavere i varme sonen for å fremme varme utvinn fra bunnen og holde lave gradienter. Hele prosessen av smelting og re-størkning trenger 24 timer. Og en stor blokk av multi-krystallinske solar grad silisium er fullført. [8]

2.4 Multi-krystallinske Silisium Wafer

Multi-krystalinske silisium wafer er en nøkkel materiale for solcelle produksjon, de ble mye brukt i photovoltaic kraft generasjon, telekommunikasjon, transport og strømforsyning til fjernt liggende bolig områder. Sammenligne multi-krystalinske silisium wafer med mono-krystalinske silisium wafer, multi-krystallinske silisium wafer krever lavere renhet av råvare. Det knuste silisiumet som ble produsert i produksjonen av mono-krystallinske silisium wafer, kan brukes i produksjon av multi-krystallinske silisium wafer. Silikon rester kan renses i én krystall oven, og deretter bli brukt til å produsere multi-krystallinske silisium wafer.

Tabell 2. 2: Diverse spesifikasjon til multi-krystallinske silisium wafer. [9]

Konduktivitet type	P-type
Grunnflate	156.0 mm × 156.0 mm ± 0.3 mm
Diameter	219.20 mm ± 0.5mm
Tykkelse	180 um ± 20 um; 200 um ± 20 um
TTV	≤30 um
Resistivitet	0.8-3.0 Ωcm
Vridning	≤50 um
Lifetime	≥2 us
Edge chips	Lengde ≤ 1.0 mm, Dybde < 0.5 mm

2.4.1 Produksjon av silisium wafer

Produksjon av høy kvalitet silisium wafer er startet med en vekst på silisium ingot. Det er en rekke prosesser som er viktig for å gjøre en ingot til wafer. De typiske prosessene er listet nedenfor.

- Kutting—Del silisium ingot i tynn disk form wafer;
- Gjøre å flattere (pussing eller sliping)—For å få høyere grad av flatthet av wafer;
- Etse—kjemisk fjerne skaden som indusert ved å skjære og flate;
- Polering—For å få glatte wafer overflater;
- Rensing—For å fjerne polering middel eller støv partikler fra wafer overflater.

I tillegg, for å være en viktig utflatings prosess for wire-sawn wafer, sliping kan også brukes til og fin-slipe etset wafer. Hensikten ved fin-sliping av etset wafer er å forbedre flatthet av feedstock wafer etter polering.

En annen applikasjon av sliping er å tynne ferdige wafer enheter før man kutter dem i individuelle form. [10] En form i forbindelse med integrerte kretser er en liten blokk av halv ledende materiale. Vanligvis er integrerte kretser produsert i store grupper på en singel wafer av elektronisk silisium eller andre halvledere, gjennom prosesser som for eksempel fotolitografi. Wafer kuttet i mange biter, hver inneholder en kopi av kretsen og disse delene kalles en form. [11]

2.4.2 Kontakt dannelse

Wafer solceller har kontakt på forsiden og baksiden. På forsiden er kontaktene i form av lineære metalliske linjer som kalles busbar og nett finger. Materialet på front kontakten er vanligvis Ag eller Al, baksidekontaktene dekker hele siden av wafer, kontakten gjennomfører en elektrisk sti av elektroner. Det er mange teknikker som er tilgjengelige for kontaktformasjon, men her ble screen- printing beskrevet i detalj.

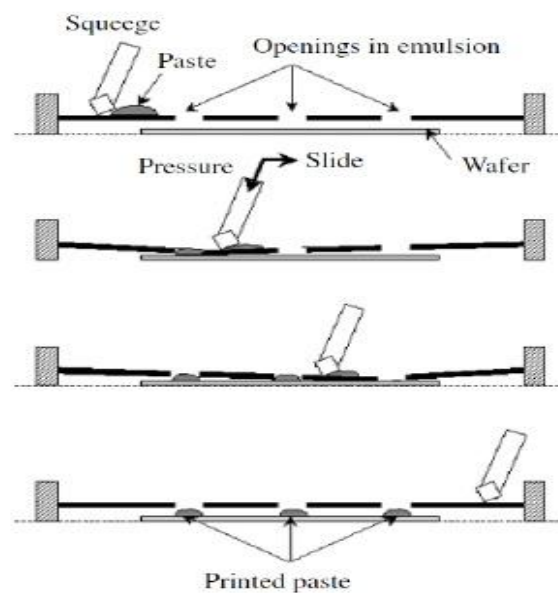
Screen-printed kontakt teknologi er en rask metalliseringsprosess og er kostnadseffektiv. Screen- printing utstyr er solid, enkelt, ikke så veldig dyrt og teknikken kan være lett automatisert.

Skjermer er tette stoff av syntetisk eller rustfrie stål ledninger strukket på en aluminiums ramme, som skissert i Figur 2. 5. Skjermen er dekket med en lysfølsom emulsjon som er behandlet med fotografiske teknikker på en slik måte at det er fjernet fra regionene hvor utskriften er ønsket. Ledningene må være veldig tynne og tett i linjeavstand. Åpningen av nettet må være flere ganger større enn den største partikkel som finnes i pasta som skal skrives.

Skjermen er vanligvis av 200 Mesh. Kontakt metall er brukt i form av pasta på skjermen og deretter til solcelle. En pasta for de metalliske kontaktene på solcelle består av organiske løsemidler, organiske bindemidler, ledende materiale som Al / Ag, Glass fritte.

Skjermen er plassert på wafer ved en avstand fra hverandre kalt snap-off. Etter dispensering av pastaen, blir det trykket på metall eller gummi nal. Nal nå flyttes fra den ene siden av skjermen til den motsatte siden, trekke og trykke er på pasta front. Dermed overføres pastaen til wafer gjennom åpningen i skjermen.

Rett etter trykking er wafer tørket ved temperatur på 100-200 ° C slik at løsemidler kan fordampe fra pasta. Avfiring av pasta er vanligvis gjort på et belte ovn hvor temperaturen økes gradvis fra adgang til midt av ovnen opp til 800 ° C og deretter kjøles ned langsomt til romtemperatur ved enden av beltet. [8]



Figur 2. 5: Screen- printing stepper. [8]

2.5 Deformasjon

Alle metaller, som anvendes til praktisk bruk, er utsatt for belastninger, som trekker, trykker og vrider. Hvis disse spenningene er tilstrekkelig store, gir de metallet en ytre deformasjon eller eventuelt brudd. Den ytre deformasjonen er resultatet av mange, meget små bevegelser av atomene og ved disse bevegelser har mikrostrukturen betydning. Men her vil det gås inn på mekanismer, når materialet deformeres og hvordan materialene reagerer når de belastes. [12]

Deformasjon kan ha delt i følgende typer:

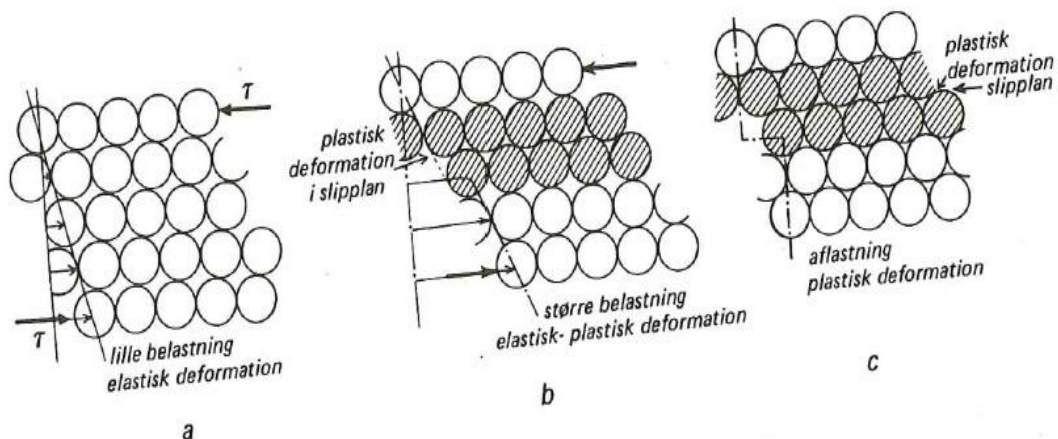
1. Elastisk
2. Tidsforsinket elastisk = Anelastisk
3. Plastisk
4. Tidsforsinket plastisk = Krypning

I dette avsnittet fokuserer vi på elastisk og plastisk deformasjon.

2.5.1 Generelt om elastisk og plastisk deformasjon

Elastisk og plastisk deformasjon kan forklares ved å ta hensyn til krystall gitter reaksjon på en yter kraftpåvirkning.

Figur 2. 6 viser skjematisk atomenes bevegelse ved stigende skjærspenning i pilenes retning. Atomene regnes som harde kuler. Ved lille belastning (a) opprettholdes de enkelte bindinger. Deformasjon er rent elastisk, og emnet vil gjenvinne sin opprinnelige ytre form ved avlastning. Ved større belastning bryddes bindingene mellom to atom lag og de fordrevne. Herved fås en plastisk deformasjon som ikke forsvinner ved avlastning. Planet, hvor forskyvning skjedde, kalles slipplan. Bevegelsen kalles slip, se figur 2. 6 (b) og (c).[12]

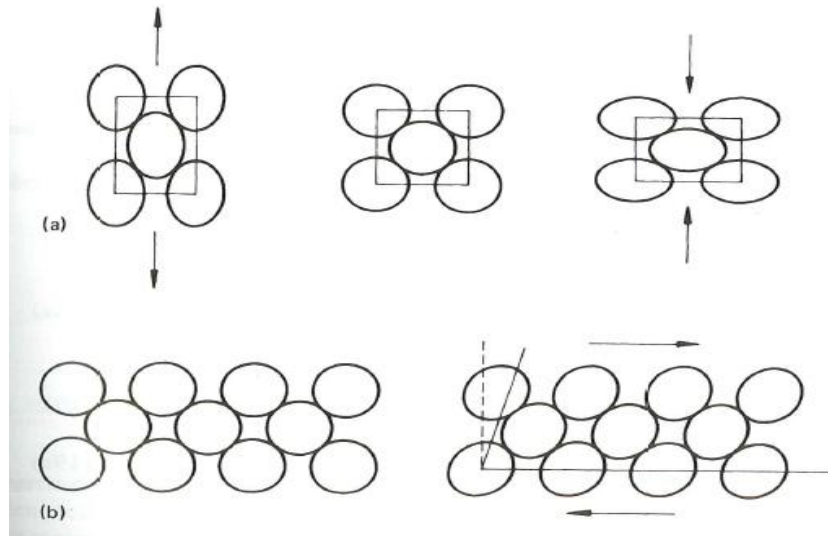


Figur 2. 6: Elastisk og plastisk deformasjon av et metallgitter. [12]

2.5.2 Elastisk deformasjon

Enhver ytre mekanisk kraft som virker på et stykke metall, vil i større eller mindre grad deformere atomgitteret. Når spenningene er små, beholder atomene sine naboer, og deformasjonen består av en forholdsvis liten endring i avstanden mellom atomene, figur 2. 7 a) og b). Deformasjonen

er elastisk og karakterisert ved at form endringen er proporsjonal med kraften. Tilstanden er reversibel, hvilket vil si at det til en bestemt kraft alltid svarer en bestemt form endring uansett tidligere svingninger i kraftforløpet. Spenning og relativ forlengelse er proporsjonale i det elastiske området. [19]



Figur 2. 7: Ved elastiske deformasjon forandres avstanden mellom atomene, men hvert atom beholder sine naboer. (a) Strekk og trykk. (b) Skjær.[19]

Hook's lov uttrykker at der innenfor det elastiske området er proporsjonalitet mellom spenning og relativ forlengelse:

$$\sigma = E * e, \text{ hvor } e = \Delta L/L_0 \quad (2. 1)$$

Proporsjonalitets faktor E er et materiale konstant som kalles elastisitetsmodul eller E-modul. Et materiales E-modul er et uttrykk for stivhet. Et høyt E-modul svarer til et stivt materiale.

Man skal likeledes merke deg at E-modulen ikke forandrer seg merkbart ved kald deformering og termisk behandling, i motsetning til mekaniske egenskaper som flytegrense, strekkfasthet. [12]

2.5.3 Plastisk deformasjon

Plastisk deformasjon er tidligere definert som deformasjonen utover det elastiske området. Ved avlastningen forsvinner kun den elastiske deformasjonen, og metall har fått en varig deformasjon endring. Plastisk deformasjon kan skje ved tre prinsipielt forskjellige mekanismer: atomplanglidning (slip), tvilling-dannelse og korn grense glidende.

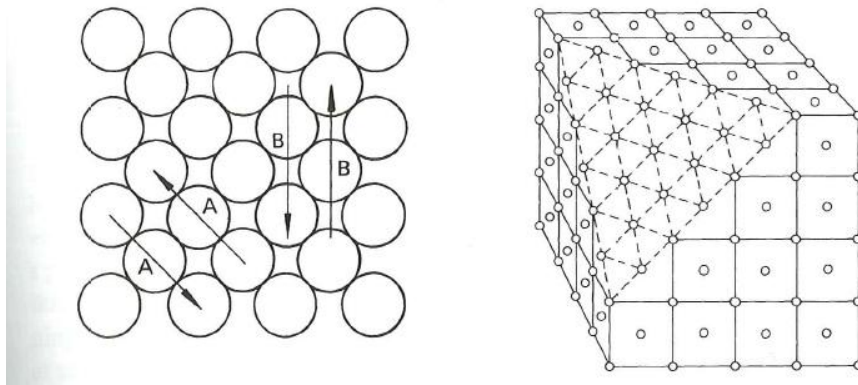
Atomplanglidning (slip)

Den elastiske tilstand er karakterisert ved små forandringer i atomgitteret, forandringer som går tilbake når den ytre kraft tas bort. Ved større deformasjoner er ikke tilstanden reversibel lenger. Ved store tøyninger er vi må sette

$$\varepsilon = \ln \frac{l}{l_0} \quad (2. 2)$$

Ved spenninger lavere enn fast verdi som kalles flytegrensen R_e , er forlengelsen elastisk. En konstruktør er først og fremst interessert i det elastiske spenningsområde under flytegrensen R_e . Selv om den metalliske sammenheng fortsatt er tilsted for meget høyere spenninger, endrer konstruksjonens form seg ved flytning, og i de fleste tilfeller er den da utjenlig til formålet. Men det plastiske området er så langt fra uten interesse. Man kan jo aldri være sikker på at det ikke opptrer tilfeldige overbelastninger i konstruksjonen.

Glidning foregår lettest i slike plan der atomtettheten er størst, og i slike retninger der avstanden mellom atomene er minst, se figur 2. 8. I et stort antall metaller og legeringer er atomene ordnet i kubisk flate sentret krystallstruktur. Denne struktur utmerker seg ved mange krystallplan med tettest mulig kulepakning, og i praksis oppviser også de tilsvarende metaller høy duktilitet. I kubisk rom sentrert struktur finnes ingen plan med tettest mulig pakning, men mange plan med noe lavere tetthet. Heksagonal struktur har bare ett plan med tettest mulig kulepakning der glidning kan foregå, og gjennomgående finner man også at de tilhørende metaller sprø. [19]

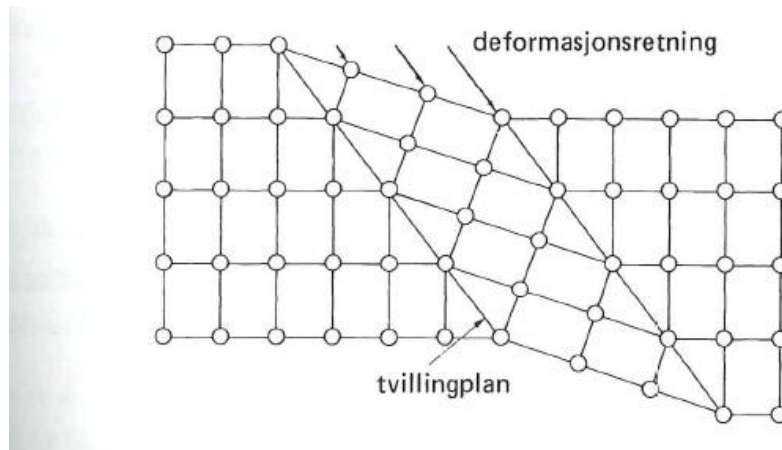


Figur 2. 8: (a) Glidning skjer lettest mellom tettpakkede plan, således lettere mellom A-A enn B-B. (b) Tettpakket plan i en kubisk flate sentrert struktur.[19]

Evne til deformasjon ved atomplanglidning er en egenskap som er typisk for og stort sett begrenset til metallisk atombinding og krystallstruktur. Gliding kan foregå uten at den metalliske sammenheng brytes og uten at strukturen forandres, bortsett fra i planenes aller nærmeste omgivelser. De tekniske metaller og legeringer er poly-krystallinske, og korn grensene som uordnede områder danner barrierer mot glidning. Videre er de enkelte korn forskjellig orientert, slik at glidning på ett plan og i en bestemt retning ikke uten videre kan fortsette i nabokornet, hvis det ikke skal oppstå åpne rom mellom kornene, må deformasjonen i et korn tilpasse seg deformasjonen i nabokornet, og denne betingelse lar seg lettere oppfylle jo flere glideplan og glideretninger som er disponible.

Tvilling-dannelse

Generelt gjelder at glidning mellom atomplan er den viktigste mekanisme ved plastisk formendring. Under visse forhold kan det skje en formendring ved tvilling-dannelse. Dette er en prosess der atomene flytter seg på en slik måte at gitteret i den deformerte del er et speilbilde av den ikke deformerte del, figur 2. 9. I de fleste materialer er den nødvendige skjærspenning for tvilling dannelse større enn den som kreves for glidning, slik at glidning blir den foretrukne mekanisme. Tvilling dannelse skjer i stål ved lav temperatur, og elles i sink og magnesium ved alle temperaturer. De siste heksagonale gitterstrukturer med bare et glidplan. [19]

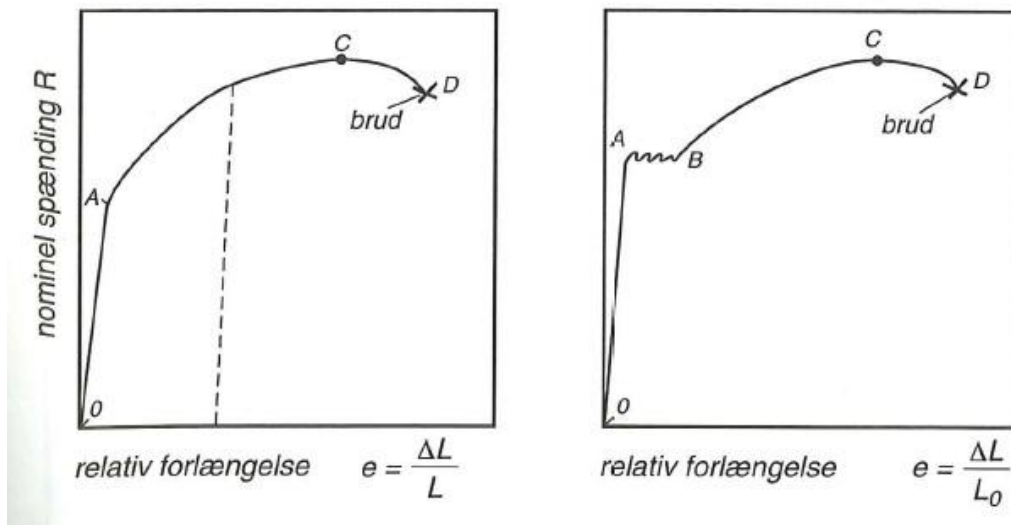


Figur 2. 9: Plastisk deformasjon ved tvilling-dannelse. Deformasjonen skjer på en slik måte at strukturene på begge sider av tvilling-planet er speilbilder av hinannen. [19]

2.5.4 Arbeides linjen

I figur 2. 10 er vist arbeides linje for to materiale. Kurv delen O til A på begge figurerer viser det elastiske området. I dette området er proporsjonalitet mellom spenning og deformasjon (Hookes lov), og deformasjon er reversibel. Man tiltrebar alltid at spenningene i ferdig konstruksjons elementer med passende sikkerhet holds i det elastiske området. Kurven A til D i begge figurer viser området til plastisk deformasjon. Denne deformasjonen er irreversibel. Den plastiske deformasjonen er overlappet den elastiske. Hvis en deformasjon avbrytes ved at belastningen fjernes, vil det skje elastisk sammentrekning under avlastningen, mens den oppnådd plastiske deformasjonen vil ha bevarte. Arbeides linje slutter med et typisk duktilt brudd.[12]

Plastiske deformasjon er en forutsetning for de fleste formgivnings prosesser. Normalt vil konstruksjoner imidlertid uegnet til fortsatt bruk etter moderat plastiske deformasjoner og derfor er innsettende hard bruden vanligvis ikke en dimensjonerings kriterium. Ved formgivning setter evnen til plastisk deformasjon ofte grensen for valg av prosesser. Figur 2. 10 a) er vist arbeidslinje for at sprøtt materiale, den er karakterisert ved at den elastiske deformasjonen avbrytes av et brudd uten for utgående plastisk deformasjon. I figur 2. 10 b) er vist arbeidslinje for at materiale med meget lille forlengelse og tverrsnittminsking. Materiale med slik egenskap betegnes som nominell sprøtt materiale, og brudd betegnes som ofte sprøtt brudd, hurtig brudd. [12]

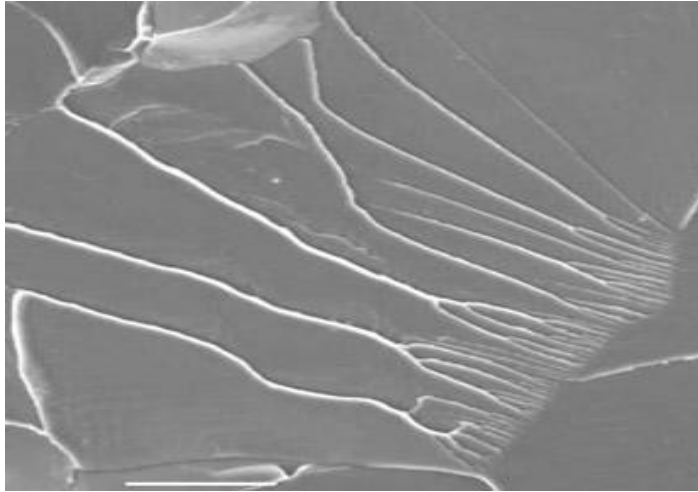


Figur 2. 10: (a) Arbeides linje for et sprøtt materiale, den elastiske deformasjonen går direkte over i et sprøtt brudd. (b) Nominell sprøtt materiale, både bruddforlængelse og tverrsnittminsking er lille, så i praksis kan brudd behandles som sprøtt. [12]

2.5.5 Sprøtt brudd av silisium

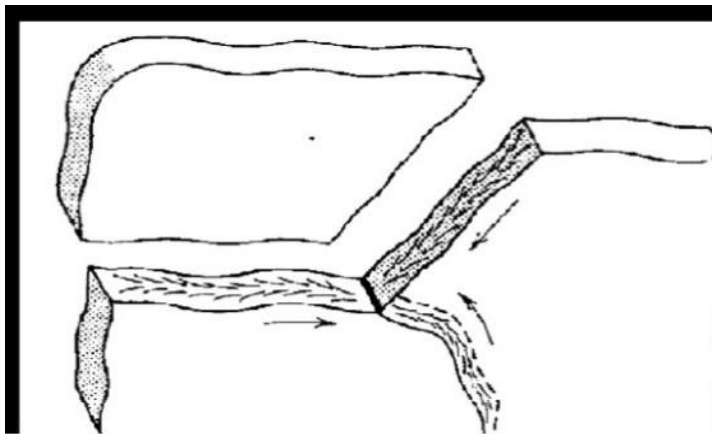
Et materielt brudd begynner når stress påførelse er konsentrert på spissen av en microsprekk. Når stresset overstiger en kritisk verdi, begynner atomære bindinger å bryte hvor elastisk energi er løslatt, og en ny overflate er skapt når sprekkens spiss sprer seg gjennom materialet. Et brudd kan være strekkbart eller sprøtt.

I strekkbare tilfeller, vil store deformasjoner skje på grunn av at grensen glir langs planene av maksimal skjærspenning. I det sprø tilfellet, bryter atomære bindinger og gitteret ser ut til å 'unzip' bak en automatisk skarp sprekk spiss. Sprø brudd spres raskt og foregår uten noen betydelig deformasjon. Retningen av sprekkens bevegelse er nesten vinkel rett mot retningen av påført strekk spenninger og gir en relativt flat brudd flate, se figur 2. 11. For de fleste sprø krystallinske materialer, korresponderer sprekk spredning til den suksessive og gjentatte brytningen av atomære bånd langs spesifikke krystallografiske plan; en slik prosess kalles kløyving. Makroskopisk, kan bruddflaten ha en kornete eller fasett mønster. [13]



Figur 2. 11: SEM bilde viser sprø brudd cleavage med typiske elvemønstre. [14]

Andre sprø brudd flater inneholder kurvede linjer som kalles `vinkel` markering som ser ut å samles midt tykkelsen av brudd flaten. Vinkel markering langs grenen vil peke i ulike retninger i forhold til komponent geometrien, se figur 2. 12. Det er viktig å kjenne at alle forskjellige settene av vinkel markering peker i samme relative retning-tilbake mot opprinnelsen.

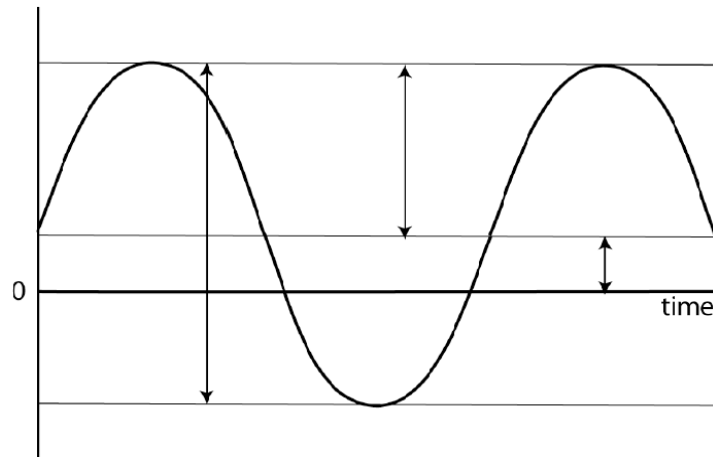


Figur 2. 12: Flere chervon mønstre springer ut fra sprekk opprinnelse. [13]

2.5.6 Utmattingsbruddets karakteristik

Utmattning er en skade tilstand som oppstår i en konstruksjon som følge av gjentatte svingninger. Skaden oppstår selv om svingningene er mindre enn bruddstyrken. Utmatting kan også opptre selv om spenningene er lavere enn flytespenningen. [23]

De fleste maskiner er konstruert med vekslende komponenter som f.eks. en veivaksel eller en turbin. Utmattelse er forårsaket av oscillerende stress under 90 % av brudd stress. 90 % av mekaniske feil kan tilskrives utmatting. Paradoksalt, selv om stress er under flytegrense, er utmatting hovedsakelig opptatt med generering av feil ved plastisk strøm og bevegelse av dislokasjoner. [24]



Figur 2. 13: Utmattings test-kjøring under stress kontroll. [24]

Figuren over definerer noen av de variablene som brukes til å beskrive en utmattings test-kjøring under stress kontroll: stress rekkevidde $\Delta\sigma$, stress amplitude σ_a , gjennomsnittlig belastning σ_m .

$$\text{Ratio } R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} \quad (2.3)$$

Vi trenger å forstå utmatting, slik at vi kan:

- Forutsi levetiden til komponentene
- planlegging av strukturer og materialer som kan maksimere det økonomiske liv

Utmattelse forholdene faller inn i en rekke regimer:

Høy syklus utmatting: Lav amplitude stress induserer primært elastiske tøyninger som resulterer i lang levetid, dvs. utholdenhet i overkant av 10 000 sykluser.

Lav syklus utmatting: Betydelig plastisk deformasjon under syklisk belastning resulterer i en utholdenhet grense under 10 000 sykluser og oppførsel dominert av plastisk deformasjon.

Termo-mekanisk utmatting: Varierer både stress og temperatur for å gi tøyende sykluser i fase og ut av fase med temperatur syklus. [24]

2.6 Silisium form

Integrated Circuit (IC) teknologi har utviklet seg raskt i de siste årene, og størrelse og tykkelse av form krymper stadig i mikro elektroniske kretser. Den reduserte form størrelsen har åpnet for mer funksjonell form til og bli rommet i en enhets område. Redusert tykkelse av form bidrar til reduksjon av den totale pakkens høyde profil. Produksjon av mindre og mer kompakte IC pakker har blitt gjort med disse utviklingene. For å være et naturlig sprøtt materiale, kan moderate stressnivåer føre til skade som sprekk dannelse og brudd på form. I tillegg kan wafer prosesserings skritt som tynning og saging indusere defekter i silisium form. Dem ulike skrittene av wafer tynning kan innføre overflate defekter, og gjennom wafer saging kan kante defekter som mikrosprekker bli videre indusert til form.[13]

Kravet etter form i store størrelser fører til mer stress om kan føre til sprekk dannelse. Så langt mekanisk pålitelighet gjelder, er bare overflate og kant defekter betydelige. Form sprekker kan begynne ved overflate slipe defekter ved strekk baksiden av form, ved kant defekter som skiller baksiden av die fra film-montert kuttet wafer. Form sprekking avhenger av både belastningen og størrelsen på defekten. Det er ingen verdi som kan tilskrive stryken av form, bare sannsynligheten for brudd som relaterer til sjansen for å finne en kritisk defekt på spenning nivå. [15]

Når form blir utsatt for belastning, finnes det et stort potensiale for at mikrosprekker ville spre seg og føre til brudd. Derfor kan form sprekk eller brudd vanligvis bli påført under monteringsprosesser eller pålitelighets test.

I tillegg er det vanskelig å bestemme brudd styrken av silisium wafer på grunn av de store diameterne og tynne lag som er lett å brette, det er derfor lønnsomt hvis silisiums styrke eller silisium bruddstyrken kan karakteriseres ved form styrke nivå. [13]

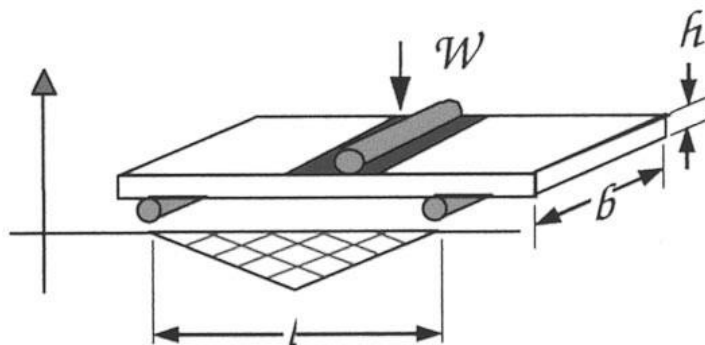
2.7 Test metoder

Det er tre eksperimentelle metoder som er brukt for å måle sprøtt materiale styrke, tre-punktets bøye test, fire-punktets bøye test, og ball-brudd test, form styrke er en funksjon av ulike wafer prosesser.

Test systemet utnytter funksjonen av en standard skrue drevet mekanisk system. Crosshead og last celle skal utføre en belastning med økende kraft til prøven er brudd. Maksimale belastninger ved brudd punkt er notert, det blir senere brukt for å avgjøre muti-krystalinske solcelle styrke. Styrke oppstår når trykk på solcelle blir påvirket av defekter og stryken overstiger. [16]

2.7.1 Tre-punktets bøyd test

Det er to punkter (eller stenger) som gir støtte på prøve. Plasseringene av støtte punkter (stenger) er avhengig av størrelsen av solcelle. Konfigurasjon til teksten har et styre last- hode og justerbare styre plater for å passe på solcelle posisjon. Solcelle plasseres på to stenger med bakside ned, det tredje punktet i tre-punktet bøyd test er belastning hodet, som er plassert ved top side og på midden av prøven, figur 2. 14 er viste nedfor.



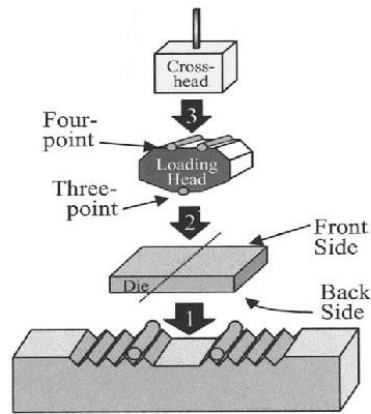
Figur 2. 14: Trepunktets bøyd test, bøyemoment, og parameterne. [16]

Bruddspenning er brukt som mål på solcelle styrke. faktiske spenning av tre-punktet bøyd test er beregnet fra bjelke-bøye ligningen som er gitt i ligningen 2. 4. Funksjon av lasten registreres ved brudd, W , dybden av solcelle, b , tykkelsen av solcelle, h , og avstanden mellom nedre stenger, l . [16]

$$\delta_{3 \text{ punkter}} = \frac{2lW}{2bh^2} \quad (2. 4)$$

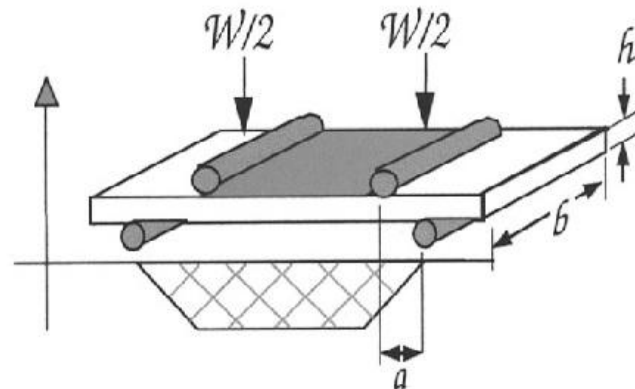
2.7.2 Fire-punktets bøyd test

Fire-punktets bøye test benytter en lignende konfigurasjon som tre-punktets bøyd test. Belastningen på prøve ble brukt på to steder som har lik avstand fra midtlinjen. Merk at last hodet som viser i figur 2. 15 er mønsteret slik at orientering kan reverseres for både tre-punktets og fire-punktets bøye tester.



Figur 2. 15: Tre-punkter og fire-punkter bøyde test konfigurasjon. [16]

Fire-punkters bøyde test gir maksimalt bøyemoment som er konstant i området mellom de to øverste belastings punkter. Området inkluderer overflaten av prøven, og en stor del av solcelles kant hvor de største feilene er, se figur 2. 16.



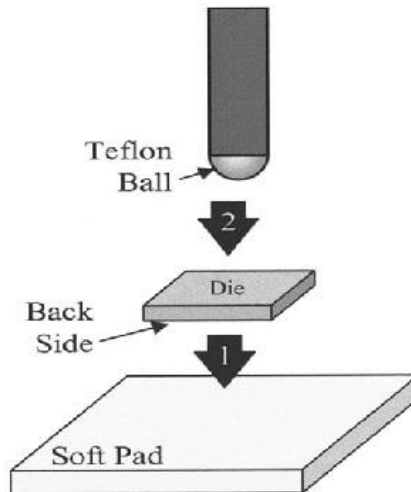
Figur 2. 16: Fire punkts bøyde test, bøyemoment, og parameterne. [16]

I dette tilfellet solcelle styrke forklarer årsaken til kant defekt som vanligvis på grunn av wafer saging eller singulering skade. Forhold for styrke er definert i ligning 2. 5, a representerer avstanden mellom øvre lastepunkt og nedre lastepunkt. [16]

$$\delta_{4punkter} = \frac{3Wa}{bh^2} \quad (2.5)$$

2.7.3 Ball-brudd test

Ball-brudd testen ble designet for evalueringen av solcelle styrke, basert på virkelig behandlet bakside tilstander. Struktur er gitt i figur 2. 17, ball-brudd test inkluderer en last stang, et mykt flatt underlag og en Teflon ball. Solcelle plassert på mykt underlag med bakside under, Teflon ball senkes vertikalt med prøven og utfører kraft på prøven frem til brudd.



Figur 2. 17: Ball-bruud test. [16]

Maksimalt spenning er konsentrert i midten av baksiden av prøven. Spenning avtar når avstanden fra senter øker. Denne testen er sensitiv for defekter på overflaten av solcelle bakside. Resultat til solcelle styrke er derfor kontrollert av overflaten av solcelle bakside, som er relatert til feil induisert av overflate klargjøring og tynning prosesser.

Maksimal strekkspenningen på brudd punkt, δ , funksjon av last registreres på tidspunktet for solcelle brudd, W , m er 1/Poisson 's ratio, t er plate tykkelsen, a er plate radius, og r er belastningen sone radius mellom ballen og prøven. [16]

$$\delta = \frac{3w}{2\pi mt^2} \left[(m + 1) \ln \left(\frac{a}{r} \right) + \frac{1}{4} (m - 1) \left(1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right) \right] \quad (2.6)$$

2.8 Elektroluminescens (EL) avbildningsteknikk

De tydelige defekter som store brudd, kan bli direkte observeres fra fotografert overflaten av solcellen, selv om tilfeldig krystall korn bakgrunn kan kamuflere feilene. De skjebnesvangre feilene, for eksempel små sprekker som ligger innenfor wafer overflaten og finger avbrytelse, kan ikke visuelt observeres i bildet som tatt av en typisk CCD kamera. For å fremheve de indre og ytre feilene som redusert konvensjon effektiviteten av en solcelle, har elektroluminescens (EL) avbildningsteknikk blitt foreslått de siste årene. [17]

Før vi kommer til elektroluminescens avbildningsteknikk, vil vi studere litt om luminescens.

2.8.1 Luminescens

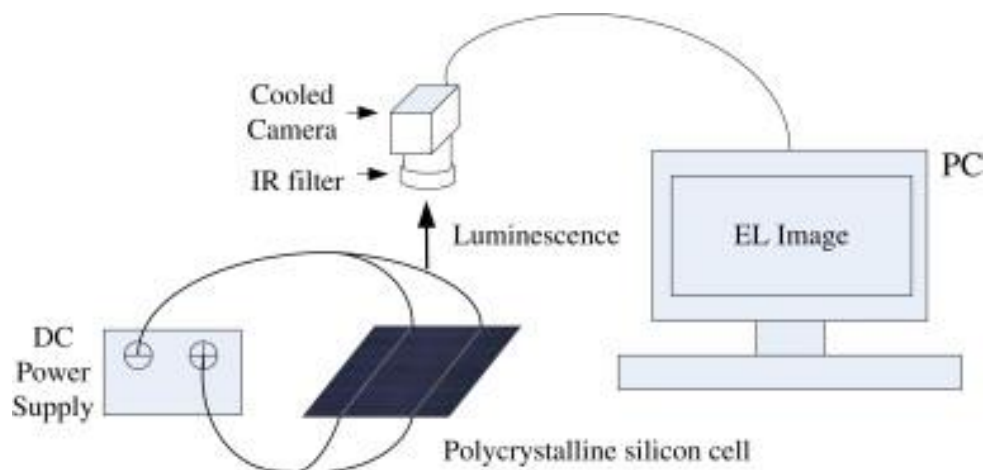
Luminescens er utstråling av lys av visse materialer når materialene er relativt kjølige. Det er i motsetning til lys fra hvitglødende kropper som for eksempel brennende tre, kull eller smeltet jern. Luminescens kan bli sett i neon og fluorescerende lys, fjernsyn eller radar. I disse fenomenene, er ikke lyset et resultat av at materialet er varmere enn romtemperatur, og derfor kalles ofte luminescens kalt lys.

Luminescens utstråling skjer etter ett passende materiale har absorbert energi fra en kilde, som ultrafiolett eller røntgenstråler stråling, kjemiske reaksjoner, og så videre. Energien løfter atomene i materialet til en aktiv tilstand, på grunn av at den aktive tilstanden er ustabil, gjennomgår materialet en annen overgang, og tilbake til den uaktive grunntilstanden, og den absorberte energien er frigjort i form av enten lys eller varme eller begge. Luminescens effektivitet avhenger av grad av omforming av aktiv energi til lys, og det er relativt få materialer som har tilstrekkelig luminescens effektivitet å være av praktisk verdi.[18]

2.8.2 Elektroluminescens

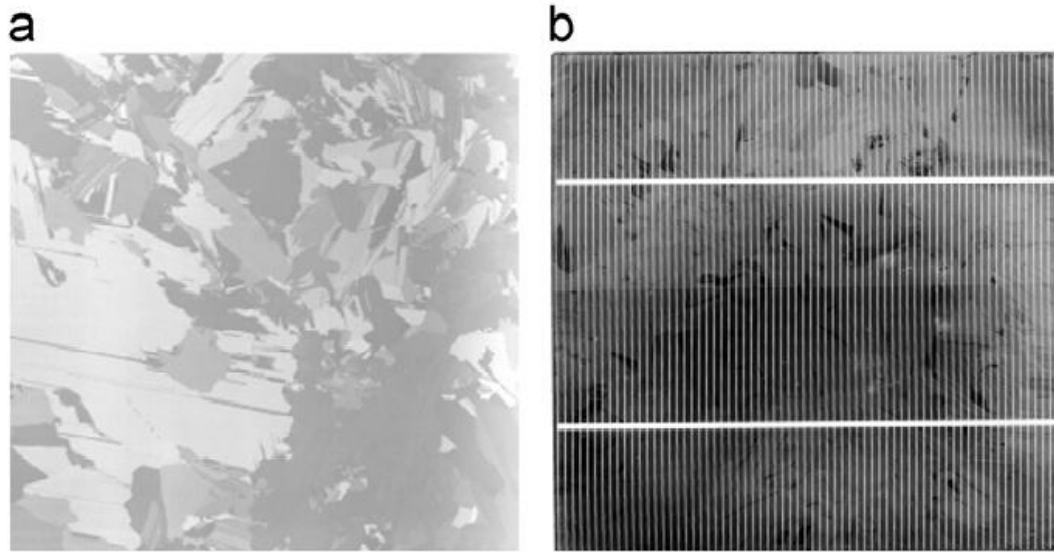
Elektroluminescens inneholder flere forskjellige fenomener; lys sendes ut fra en elektrisk utladning i gasser, væsker, og faste materialer. Elektroluminescensen blir vanligvis observert ved elektrodene under elektrolyse på grunn av rekombinasjon av ioner. Applikasjonen av et elektrisk felt til tynne lag av luminescerende sink sulfid kan produsere lys utslipp, som også kalles elektroluminescensen.

I EL bilde system, ble solcellen aktiv med spenning, og deretter ble Si-CCD kamera eller et mer avansert InGaAs kamera brukt til å fange det utstrålende infrarøde lyset fra den aktive solcellen. Silisium områder med høyere konvensjons effektivitet presenterer lysere luminescens i bildet. Prosess feil som små sprekker, brudd, og finger avbrytelse vises som mørke områder i EL bildet. Fig. 2. 18 viser konfigurasjon av EL avbildnings system. [17]



Figur 2. 18: Konfigurasjon av EL avbildnings system. [17]

I fig 2. 18 (a) viser overflaten av en multi-krystalinske solar wafer, fig2. 18 (b) viser CCD-bildet av en multi-krystallinske solcelle hvor de vertikale tynne metall stripene er finger elektroder som tilfører strøm til de to horisontale busbarene.

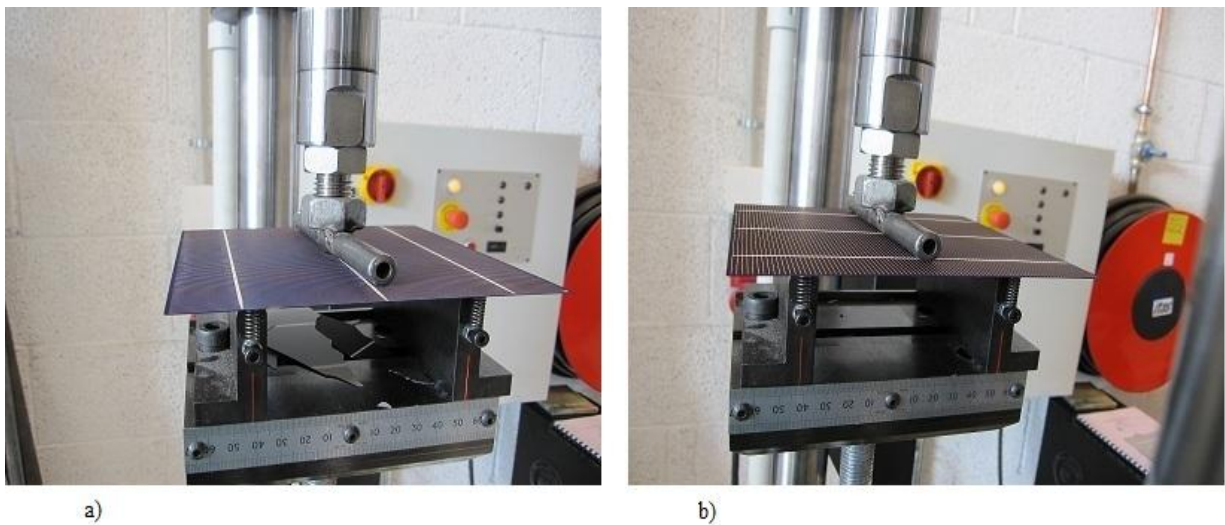


Figur 2. 19: CCD-bildene, (a) multi-krystallinske silisium wafer og (b) multi-krystallinske solcelle. [17]

Elektroluminescens avbildnings system viser ikke bare de ytre defektene som mørke objekter, men også presenterer forvridding og korn grensene med mørke grå toner i bildet. [17]

3. Eksperimentelt oppsett

I dette kapitlet skal vi beskrive de instrumentene som ble brukt i testing av mekaniske påkjenninger på solceller samt de eksperimentelle metodene. Det er multi-krystallinske silisiumsolcelle og silisium wafer fra 6 forskjellige produsenter som ble testet i dette eksperimentet, eksperimentet innebærer to forskjellige tester: bryte-test og syklus-test. På testing av solcelle, ble prøvene delt i to grupper: én hvor lasten er parallell med busbar på solcelle og én hvor lasten er på kryss med busbar på solcelle, se i figur 3. 1 a) og b). Prøvene ble gjennomført i en tre punkts bøye test maskin, maskin typen er servo-hydraulic benchtop 998-1. Der etter ble prøvene undersøkt i et elektroluminescens bilde system, hvor et scannig mikroskop av typen JSM-6400 ble brukt for å se utmattings overflate av cellene.



Figur 3. 1: a) Lasten er parallell med busbar på solcelle, b) Lasten er på kryss med busbar på solcelle.

3.1 Servo-hydraulic benchtop test maskin

Servo-hydraulic benchtop test maskin 988-1 har Si-Plan's 879 digital servostyring og data innhentingsenhets system på en PC med *Windows XP* som operativsystem. Servo-hydraulic benchtop test maskinen skal bidra til statikk og dynamikk testing av materialer og komponenter og kan ikke bli brukt for applikasjoner utenfor det omfanget av design.

Nedenfor er noen spesifikasjoner av benchtop servo-hydraulic test maskin [25]

Ramme

- Rangert opp til 25 KN spenning og kompresjon
- Supplert med ekstra lange søyler for å gi en høyde på 1000mm mellom aktuator stangen og det nedre krysshode adapteret

Aktuator

- Krysshodet er montert på toppen
- Statisk rangering: cirka 25 KN på 210 bar
- Dynamikk rangering: opptil cirka 25 KN sørger for tilstrekkelig olje forsyning for forskyvning og frekvens
- Slag avstand: cirka 50mm
- 1* aktuator- montert press linje akkumulator inkludert

Servo ventil

- 1*20 liter per min

Laste celle

- Kan bli montert på aktuator stang
- Universell material tetthet gradert load cell
- Cirka 25 KN klass 0,5 in ISO 7500-1:2004

Verktøy plate

- Slotts 600mm lang
- 400mm*600mm sporet verktøy plate som passer M12 T-muttere

3.2 Si-Plan's 879 digital servostyring og data innhentingsenhet system

Si-Plan's 879 digital servostyring og data innhentingsenhet system er et fleksibelt, enestående system, utviklet for å brukes med bedriftens utvalg av testmaskiner og som en reinstallasjonskontroller til eksisterende maskinstativ fra andre produsenter.

- Servokontroll er implementert på den monterte prosessoren.
- Kontroll-algoritmen er tilgjengelig for brukeren via PC-grensesnittet.
- PC-programvaren fungerer i Windows XP, 2000, NT, 95 og 98.
- Programvaren er en allsidig pakke laget hovedsakelig for tetthetstester, utviklet for å minimere operatørfeil ved prøvemontering av deler til maskinen, og under påfølgende kjøring av testen.
- Datavisningen inkluderer digitale panelmålere, en rullende graf og XY-plotter.

Det er syv hovedprogrammer, fire hjelpeprogrammer, to spesialprogrammer og to valgfrie programmer i programvaren, men i dette avsnittet detaljerer vi bare de programmene som ble mest brukt i dette eksperimentet. Tabellen under viser de syv forskjellige programmene og bemerkninger fra hovedprogrammet og vi skal beskrive mer om servo, PID og data logger. [25]

Programnavn	Bemerkning
DPMs	Brukes til å vise data som digital panel målere.
Servo	Brukes til å kontrollere testmaskinen og kjøre tester.
Data logger	Brukes til å vise data som X-T, X-Y og FFT-planlegging, og til å logge data.
PID	Brukes til å justere proporsjonale, integrale og differensielle ytelsesinnstillinger av servomekanismen.
Calibrate	Brukers til å sette opp skalering og linearitet av transformatoren.
Tare	Brukes til å sette transformatorutslaget i null.
Trips	Brukes til å spesifisere utløserbetingelsene for å stoppe testmaskinen.

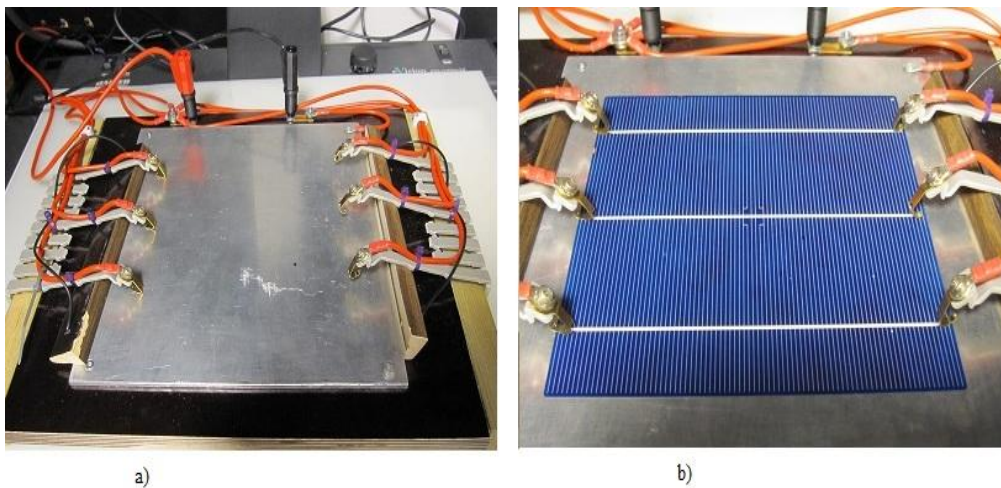
Tabell 3. 1: Diverse funksjon til programmene. [25]

PID (Proporsjonal Integrasjon Derivasjon): PID er en elektronisk styreenhet som brukes i industrien for å regulere elektriske og mekaniske apparater som motorer, pumper, varmeelementer, vifter, ventiler og andre pådragsorganer for å få stabile nivåer, temperaturer, tykkelser, vekter, volumer, eller mengder av andre slag. [20] Formålet med PID-kontroll i servostyringen er å harmonisere systemet så det er et minimum avvik fra kravene, med bølgeformer som reproduseres så eksakt som mulig. P gain (proportional gain) er 20 og adaptive factor/ limit/ ramp, og output limit/ zero/ gain ble aktivert i dette eksperimentet.

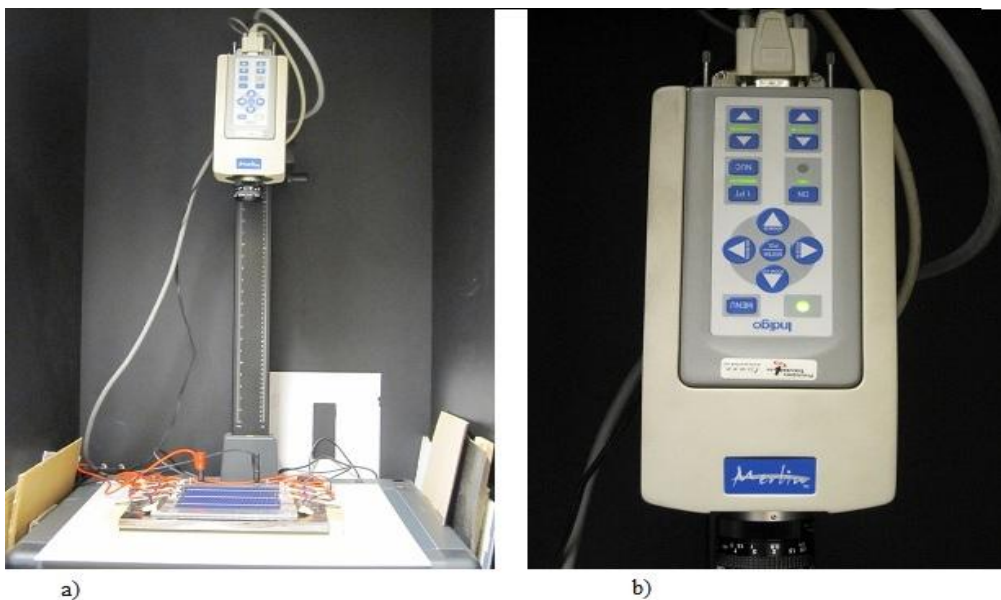
Data logger: Timebase er for å sette plote-mengden, 10 Hz ble brukt i alle prøvene. Jo flere plotter jo bedre nøyaktighet får vi. 10 Hz tilsvarer 60 punkter per minutt, og 100 Hz tilsvarer 600 punkter per minutt. [25]

3.3 Elektroluminescens bilde system

Et CCD IR-InGaAs kamera og en strøm ledende metall plate med 6 strøm kontakter (vist på figur 3. 2) ble plassert i et skap, innsidene i skapet er malt i svart for å unngå lys refleksjoner for å få et bedre resultat. Platen har 6 strøm kontakter for kontakt med solcellens busbar, og strøm i platen for kontakt med aluminiumen på undersiden av solcellen. IR-gjennomlysning av mottatte prøver med et IR-kamera styrt med «ThermaCAM» brukes for å ta bilder.



Figur 3. 2: a) metal plate med 6 strøm kontakter, b) solcelle på metal plate med kontakter på busbar



Figur 3. 3: IR-InGaAs kamera.

3.4 Testene

Multi-krystallinske silisium solceller og multi-krystallinske silisium wafere ble testet og studert i dette eksperimentet. Prøvene ligger oppe på to stenger på last celle med lasten plassert på midten av prøven. Det er to typer tester som ble gjennomført: brudd-test og syklus-test; På testing av multi-krystallinske silisium solceller ble prøvene delt i grupper for last som er parallell med busbar og last som på kryss med busbar. De multi-krystallinske silisium waferne er fra 6 forskjellige produsenter.

3.4.1 Testing av multi-krystallinske silisium solcelle

Syklus-test: Det er to forskjellige tester som ble utført for syklus test, last på kryss med busbar på solcelle og last parallell med busbar på solcelle. Forskjellig syklus frekvens og spennvidde ble testet på prøvene. På grunn av høyt antall sykler, er datalog frekvens på 10 Hz best for syklus-test. Antall sykler på prøve 1 er 100 000, på prøve 2 er 456 429 og på prøve 3 er 165000 når lasten er på kryss med busbar. Når lasten er parallell med busbar, er antall sykler 350 000 på test 1 og 200 000 på test 2, 300 000 på test 3. På vedlegg 1 kan vi se mer detaljer om syklus testing og hvordan kraft på lasten forandres.

Parameter	Spennvidde [mm]	Syklus frekvens [Hz]	Forskyvning en maks [mm]	Forskyvning gen min [mm]	Datalog frekvens [Hz]
Prøve 1	2, 5	2	4,25	1,75	100
Prøve 2	2	1	6	4	100
Prøve 3	5	2	6	1	10

Tabell 3. 1: Syklus test for last på kryss med busbar på solcelle.

Parameter	Spennvidde [mm]	Syklus frekvens [Hz]	Forskyvning en maks [mm]	Forskyvning gen min [mm]	Datalog frekvens [Hz]
Prøve 1	5	2	6	1	10
Prøve 2	3	2	7,5	4,5	10
Prøve 3	3	2	7,5	4,6	10

Tabell 3. 2: Syklus test for last er parallell med busbar på solcelle.

Brudd-test: Samme verdier av datalog frekvens og ramperate ble brukt i alle brudd-testene. Det er to prøver som ble testet i hver testing. Datalog frekvens er 100 Hz, som vil si mer nøyaktig resultat. Ved å se på vedlegg 2 kan ses bilder av hver enkelt kurve fra brudd-test for solcelle.

Parameter	Datalog frekvens [Hz]	Ramperate [mm/s]	Forskyvning maks [mm]	Brudd-kraft [N]	Brudd-lengde [mm]
Prøve 1	100	1	9	7,362	8,492
Prøve 2	100	1	9	7,171	8,436

Tabell 3. 3: Brudd-test med last på kryss med busbar på solcelle.

Parameter	Datalog frekvens [Hz]	Ramperate [mm/s]	Forskyvning maks [mm]	Brudd-kraft [N]	Brudd-lengde [mm]
Prøve 1	100	1	9	7,362	8,996
Prøve 2	100	1	9	7,171	8,966

Tabell 3. 4: Brudd-test med last er parallell med busbar på solcellen.

3.4.2 Testing av multi-krystallinske silisium wafer

Prøvene er fra 6 forskjellige produsenter, A, B, C, D, E og F. Wafer fra produsent A: 100 % elkem solar silisium; wafer fra produsent D: 60 % elkem solar silisium, 40 % siemens silisium; wafer fra produsent F: 100 % av poly silisium, wafer fra produsent B, C og E er udefinert. Wafere fra samme produsent er identiske. Det er kun brudd-test som ble gjennomført på wafer testing, unntatt wafer fra produsent A, wafer fra produsent A ble testet i både syklus-test og brudd-test. Mer detaljer om brudd-test av wafer er på vedlegg 3.

Syklus-test: En test wafer per produsent A.

Parameter	Spennvidde [mm]	Syklus frekvens [Hz]	Forskyvning maks [mm]	Forskyvning min [mm]	Datalog frekvens [Hz]
A	2	3	3,5	0,5	10

Tabell 3. 5: Syklus-test av wafer fra produsent A.

Brudd-test av wafer fra forskjellige produsenter:

Wafer: produsent A

Parameter	Datalog frekvens [Hz]	Ramperate [mm/s]	Forskyvningen maks [mm]	Brudd-kraft [N]	Brudd-lengde [mm]
Prøve 1	100	1	10,5	6,517	7,266
Prøve 2	100	1	10,5	6,912	7,592
Prøve 3	100	1	10,5	6,434	6,27

Tabell 3. 6: Brudd-test av wafer fra produsent A.

Wafer: produsent B

Parameter	Datalog frekvens [Hz]	Ramperate [mm/s]	Forskyvningen maks [mm]	Brudd-kraft [N]	Brudd-lengde [mm]
Prøve 1	100	1	10,5	6,517	7,266
Prøve 2	100	1	10,5	6,912	7,592
Prøve 3	100	1	10,5	6,434	6,27

Tabell 3. 7: Brudd-test av wafer fra produsent B.

Wafer: produsent C

Parameter	Datalog frekvens [Hz]	Ramperate [mm/s]	Forskyvningen maks [mm]	Brudd-kraft [N]	Brudd-lengde [mm]
Prøve 1	100	1	10,5	4,261	3,265
Prøve 2	100	1	10,5	3,471	3,041
Prøve 3	100	1	10,5	5,029	3,959
Prøve 4	100	1	10,5	3,997	3,975

Tabell 3. 8: Brudd-test av wafer fra produsent C.

Wafer: produsent D

Parameter	Datalog frekvens [Hz]	Ramperate [mm/s]	Forskyvningen maks [mm]	Brudd-kraft [N]	Brudd-lengde [mm]
Prøve 1	100	1	10,5	5,801	5,257
Prøve 2	100	1	10,5	6,476	6,494
Prøve 3	100	1	10,5	4,483	4,129
Prøve 4	100	1	10,5	4,344	4,419

Tabell 3. 9: Brudd-test av wafer fra produsent D.

Wafer: produsent E

Parameter	Datalog frekvens [Hz]	Ramperate [mm/s]	Forskyvning maks [mm]	Brudd-kraft [N]	Brudd-lengde [mm]
Prøve 1	100	1	10,5	4,179	4,858
Prøve 2	100	1	10,5	3,352	3,598

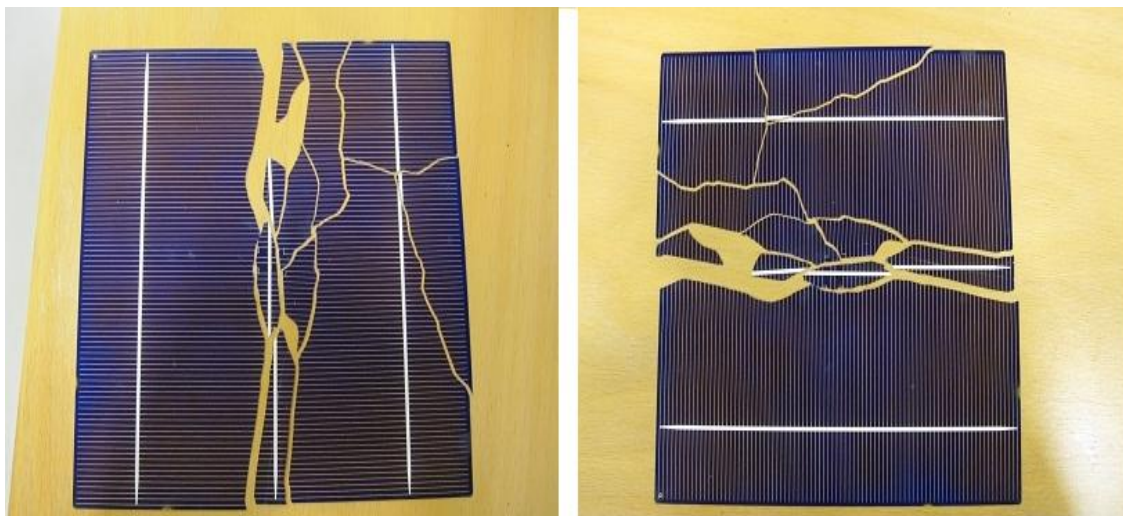
Tabell 3. 10: Brudd-test av wafer fra produsent E.

Wafer: produsent F

Parameter	Datalog frekvens [Hz]	Ramperate [mm/s]	Forskyvning maks [mm]	Brudd-kraft [N]	Brudd-lengde [mm]
Prøve 1	100	1	10,5	3,878	5,548
Prøve 2	100	1	10,5	4,851	5,561

Tabell 3. 11: Brudd-test av wafer fra produsent F.

4. Resultater



Figur 4. 1: Slik ser solcellene ut etter bryte-test når lasten er parallell med busbar.

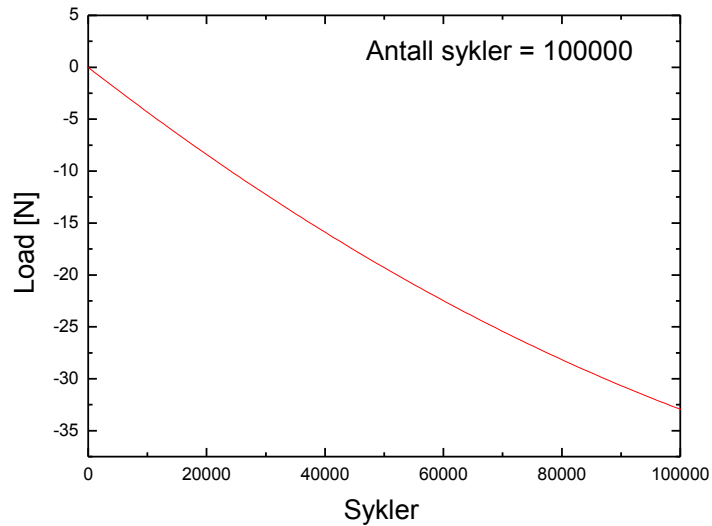
Etter bryte-testen er tilstanden til solcellene slik når lasten er parallell med busbar; Solcellene sprakk fra midten og ble delt i to eller flere store biter for det meste parallelt med lasten med store mengder mindre biter langs lastens retning.

Når lasten er på kryss med busbar, blir solcellene delt i mange små biter etter brudd-test.

4.1 Resultat kurver

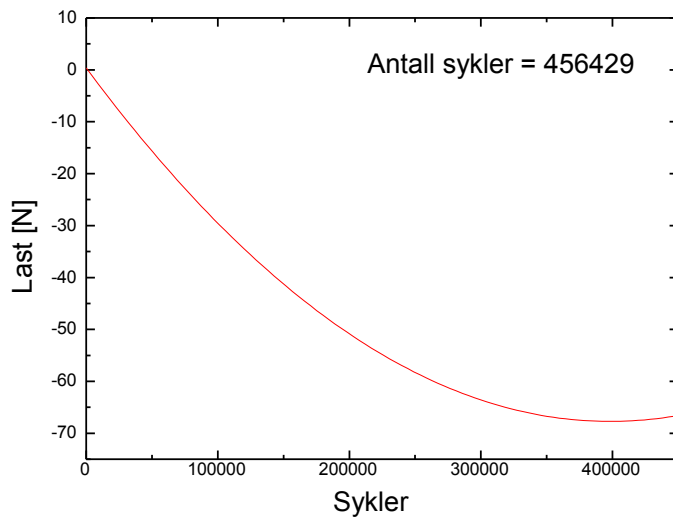
4.1.1 Solcelle test

Syklus-test:



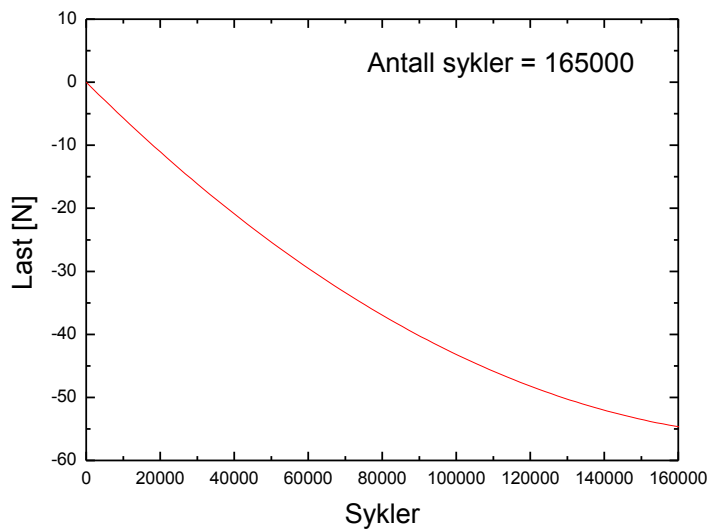
Figur 4.2: Last er på kryss med busbar under prøve 1.

Figur 4. 2 viser forhold mellom last og sykler for solcelle syklus-test når last er på kryss med busbar under prøve 1, maksimum forskyvning er 4,25 mm og minimum forskyving er 1,75 mm, spennvidde er 2,5 mm; på kurven starter kraft med null og senkes proporsjonalt med antall sykler; kurven viser det elastiske området.



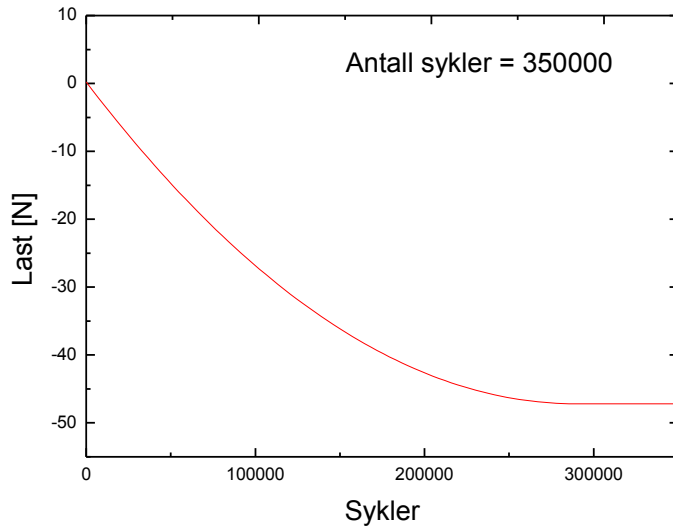
Figur 4. 3: Last på kryss med busbar under prøve 2.

På figur 4.3 vises forholdet mellom last og sykler for solcelle syklus-test når lasten er på kryss med busbar under prøve 2; maksimum forskyvning er 6 mm og minimum forskyvning er 4 mm spennvidde er 2 mm; kurven viser elastisk deformasjon frem til cirka 250000 sykler, der etter viser kurven plastisk deformasjon.



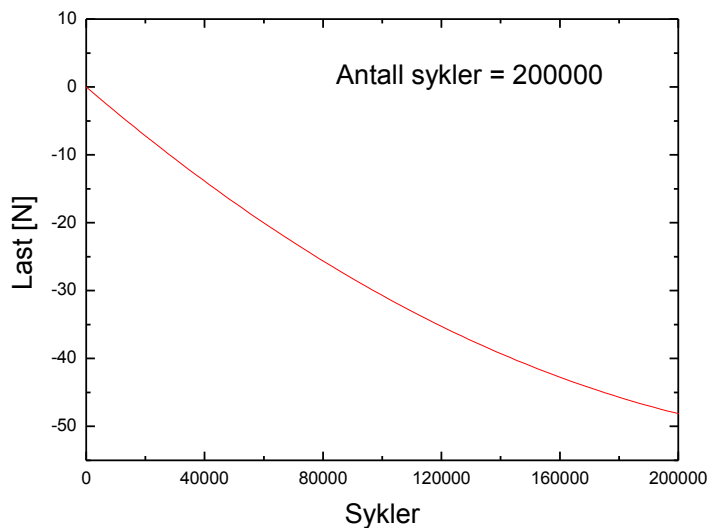
Figur 4. 4: Last på kryss med busbar under prøve 3.

På figur 4.4 vises forholdet mellom last og sykler for solcelle syklus-test når lasten er på kryss med busbar under prøve 3; maksimum forskyvning er 6 mm og minimum forskyvning er 1 mm spennvidde er 5 mm, kraften startes med null og senkes proporsjonalt med antall sykler. Kurven viser det elastiske området.



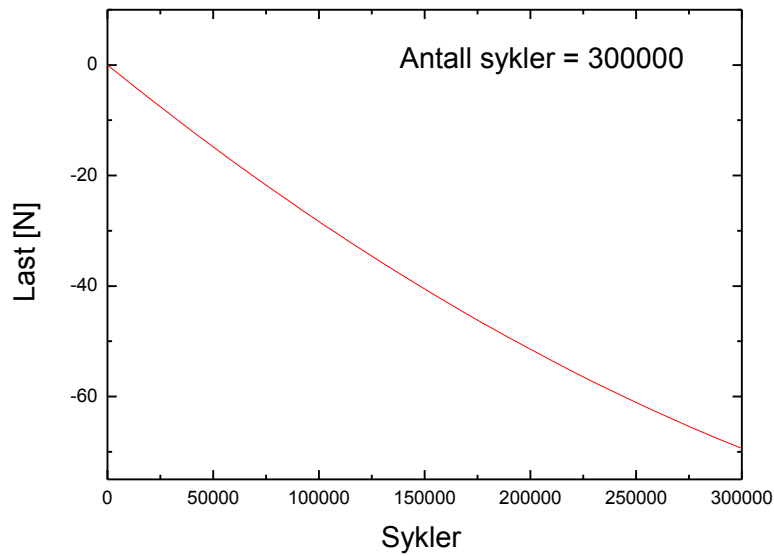
Figur 4. 5: Last er parallell med busbar under prøve 1.

Figur 4. 5 viser forhold mellom last og sykler for solcelle syklus-test når lasten er parallell med busbar under prøve 1; maksimum forskyvning er 6 mm og minimum forskyvning er 1 mm, spennvidde er 5 mm; kurven viser det elastiske området fra begynnelsen til antall sykler er cirka 200000 og derfra viser kurven plastisk deformasjon.



Figur 4. 6: Last er parallell med busbar under prøve 2.

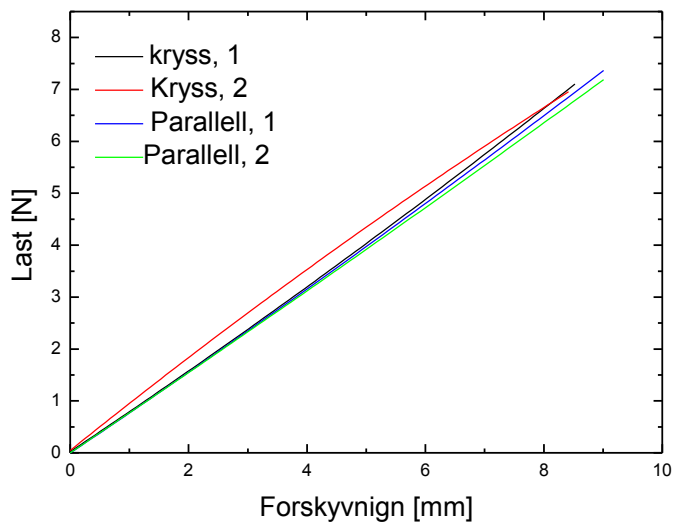
Figur 4. 6 viser forhold mellom last og sykler for solcelle syklus-test når lasten er parallell med busbar under prøve 2; maksimum forskyvning er 7,5 mm og minimum forskyvning er 4,5 mm, spennvidde er 3 mm; kurven viser det elastiske området.



Figur 4. 7: Last er parallell med busbar under prøve 3.

Figur 4. 7 viser forhold mellom last og sykler for solcelle syklus-test når lasten er parallell med busbar under prøve 3; maksimum forskyvning er 7,5 mm og minimum forskyvning er 4,5 mm, spennvidde er 3 mm; kurven viser det elastiske området.

Brudd-test:

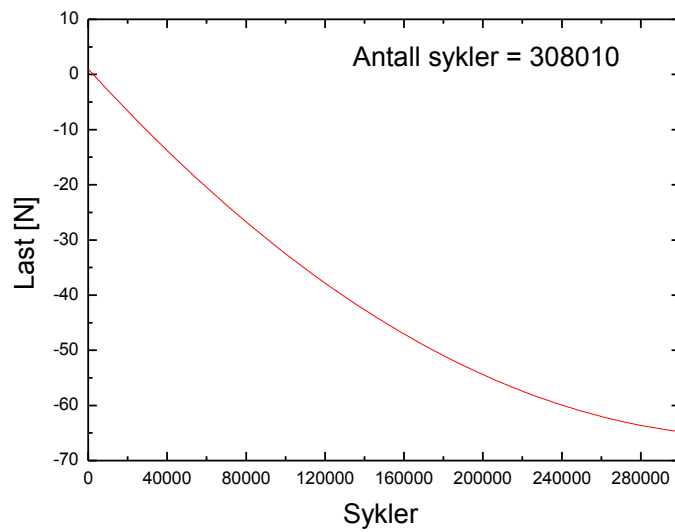


Figur 4. 8: Brudd-test når last er på kryss med busbar og når last er parallell med busbar på solcelle.

Figur 4. 8 viser forholdene mellom last og forskyvning på brudd-test, det er to prøver som ble testet for hver test. Svart kurve som er prøve 1 og rød kurve som er prøve 2 er utført med last på kryss med busbar, blå kurve som er prøve 1 og grønn kurve som er prøve 2 er utført med last parallell med busbar på solcelle.

4.2.2 Wafer test

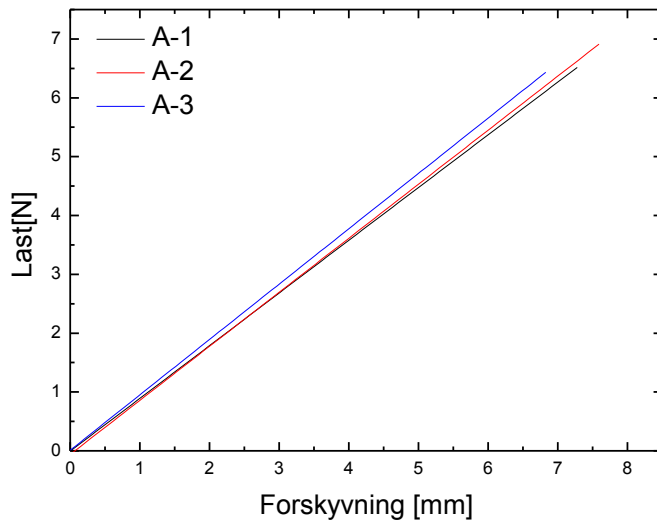
Syklus- test



Figur 4. 9: Syklus test av wafer fra produsent A.

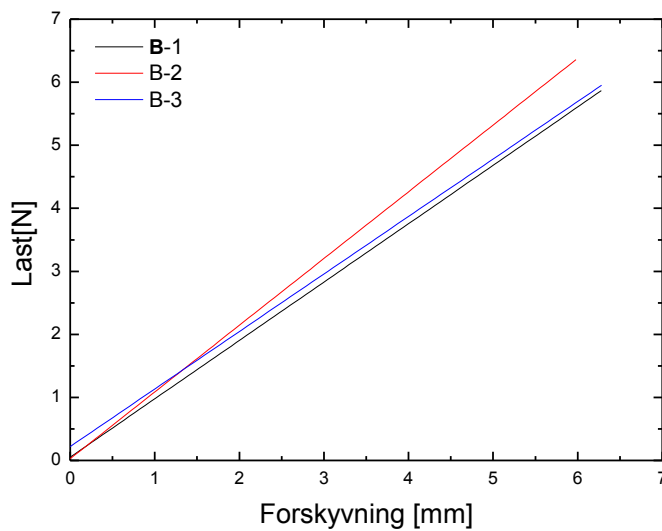
Figur 4.9 viser forhold mellom last og sykler for wafer fra produsent A; maksimum forskyvning er 3,5 mm og minimum forskyvning er 0,5 mm spennvidde er 3 mm; kurven begynner å vise plastisk deformasjon når antall sykler nærmer seg til 260000.

Brudd-test:



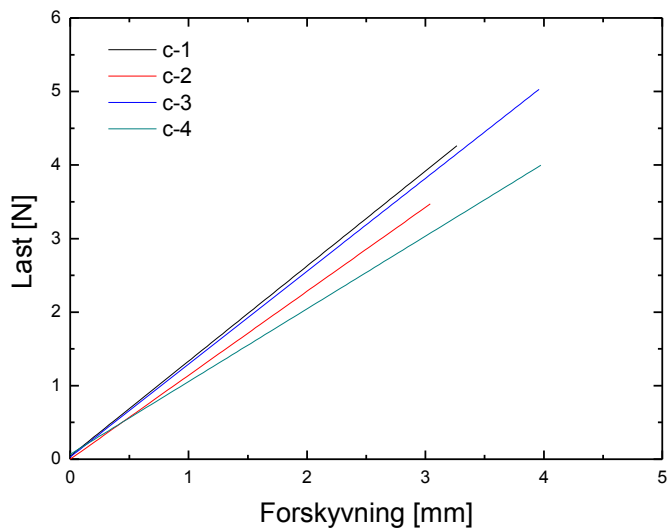
Figur 4. 10: Brudd-test for wafer fra produsent A.

Figur 4. 10 gir forholdet mellom last og forskyvning av brudd-test for wafer fra produsent A, gjennomsnittlig brudd-kraft er cirka 6,5 N og gjennomsnittlig brudd-lengde er cirka 7 mm, resultatene fra test 2 er litt forskjellig fra resultatene fra test 1 og 3, dette kan skyldes av urenheter i wafer.



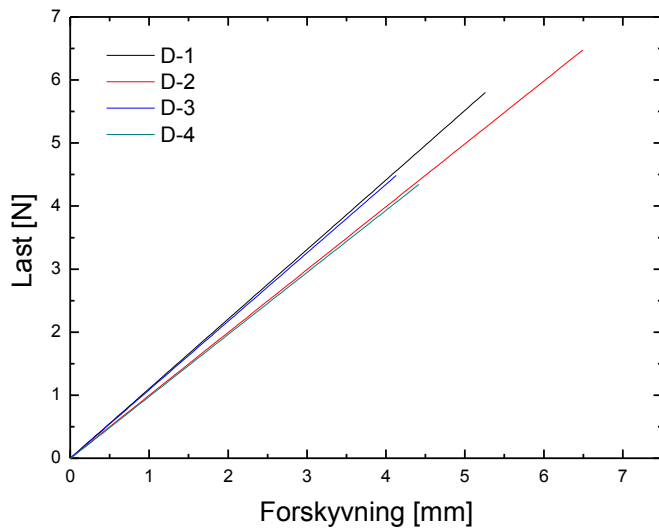
Figur 4. 11: Brudd-test for wafer fra produsent B.

Figur 4. 11 viser forholdene mellom last og forskyvning for wafer brudd-test fra produsent B, gjennomsnittlig brudd-kraft er cirka 5,9 N og gjennomsnittlig brudd-lengde er cirka 6,2 mm, avvik i resultatene kan skyldes urenheter i waferen.



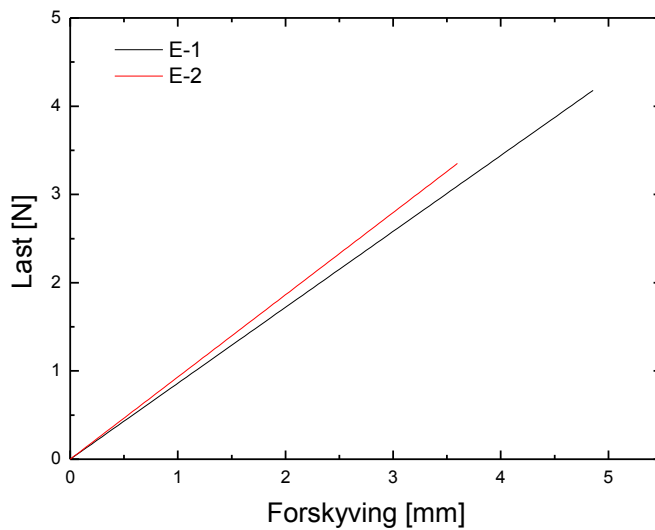
Figur 4. 12: Brudd-test for wafer fra produsent C.

Figur 4. 12 viser forholdene mellom last og forskyvning for wafer fra produsent C, test resultatene er forskjellige for de 4 prøvene.



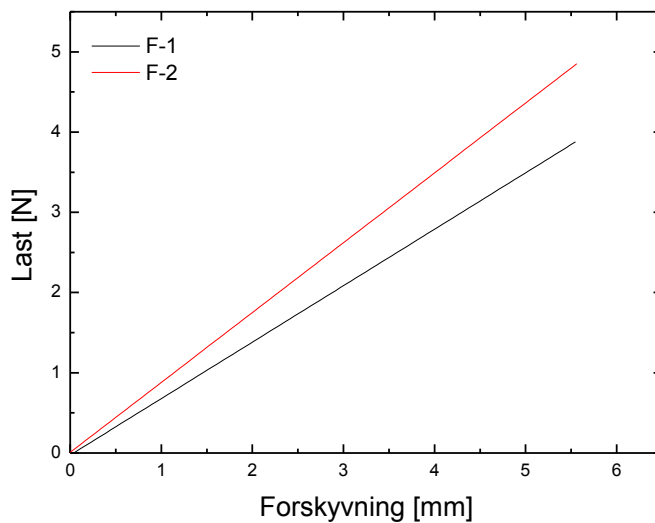
Figur 4. 13: Brudd-test for wafer fra produsent D.

Figur 4. 13 viser forholdene mellom last og forskyvning for wafer fra produsent D, brudd-kraft for de 4 prøvene er forskjellig, brudd-lengde for prøve 1 og prøve 2 er nesten like, prøve 3 og prøve 4 har omtrent lik brudd-lengde og brudd-kraft.



Figur 4. 14: Brudd-test for wafer fra produsent E.

Figur 4. 14 viser forholdene mellom last og forskyvning for wafer fra produsent E, test resultatene er svært forskjellige for de 2 prøvene, det kan skyldes av at wafer er fra forskjellige ender av ingoten.

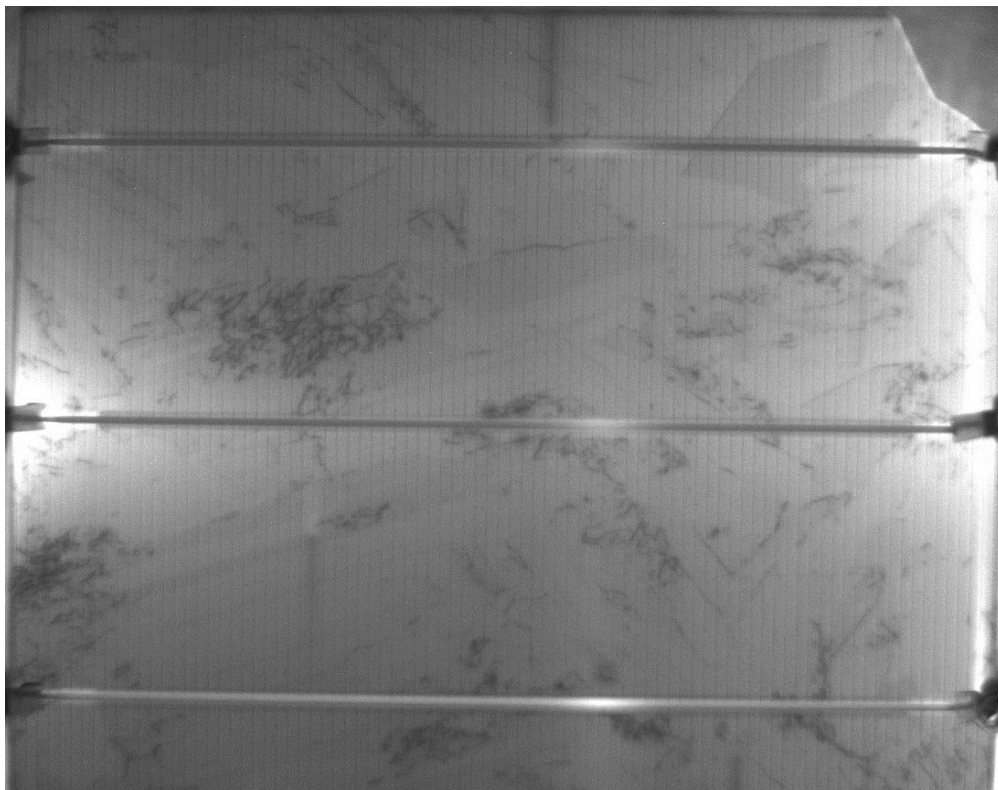


Figur 4. 15: Brudd-test for wafer fra produsent F.

Figur 4. 15 viser forholdene mellom last og forskyvning for wafer fra produsent F, test resultatene er forskjellige for de 2 prøvene, det kan skyldes av wafer fra forskjellige ender av ingoten.

4.2 Elektroluminescens bilder

Før testing

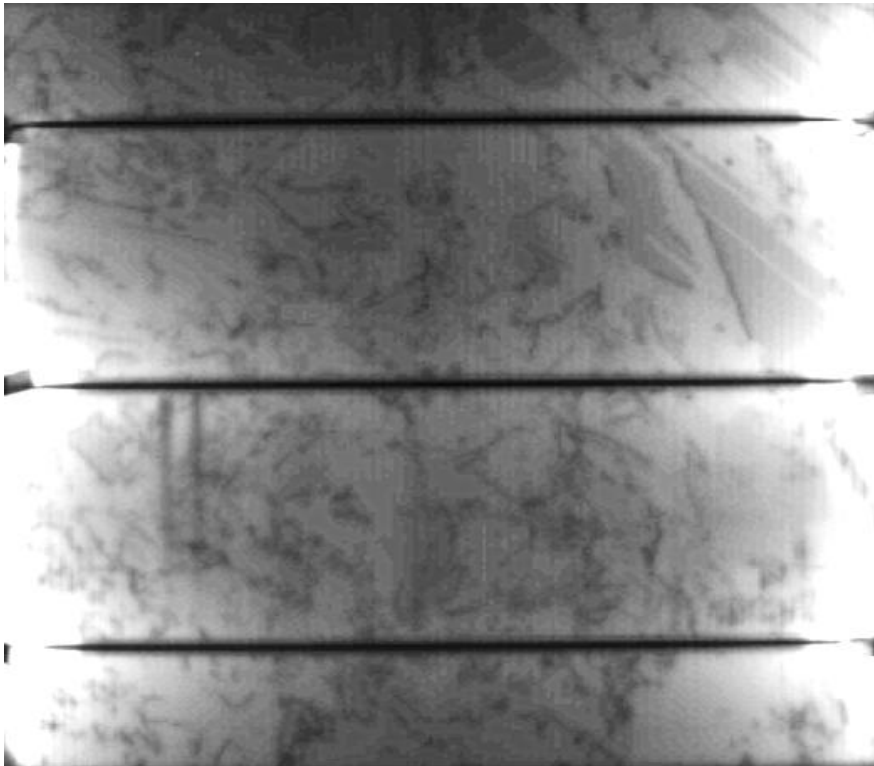


Etter testing

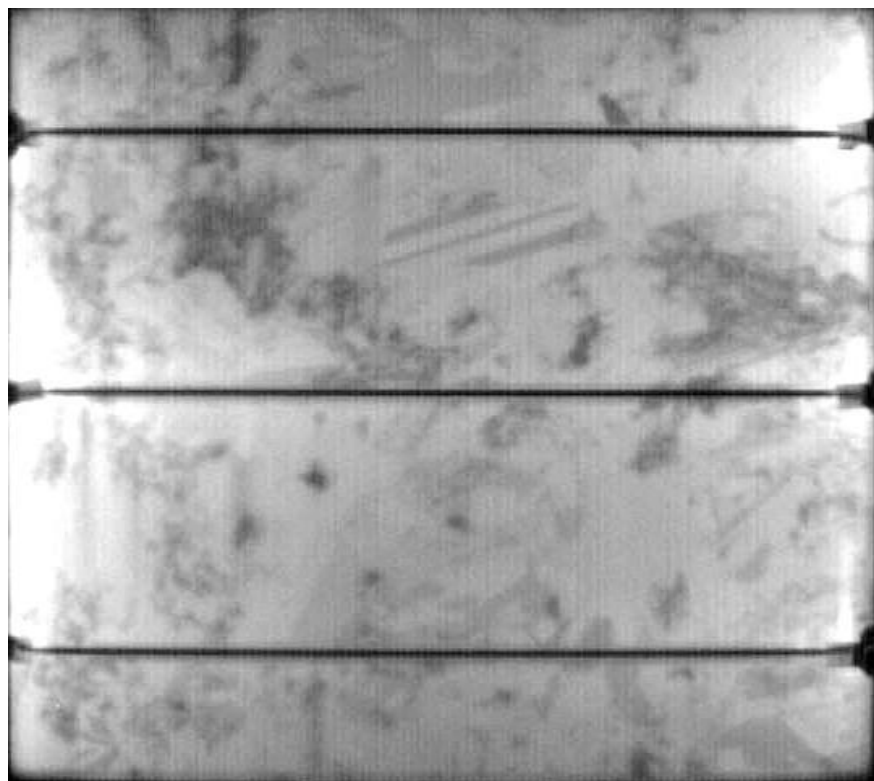


Figur 4. 16: Elektroluminescens bilder av solcelle, første bilde viser solcelle før test og bilde under viser området indikert med rødt der solcellen etter brudd-test er sprukket og har dislokasjoner på solcelle.

Før testing

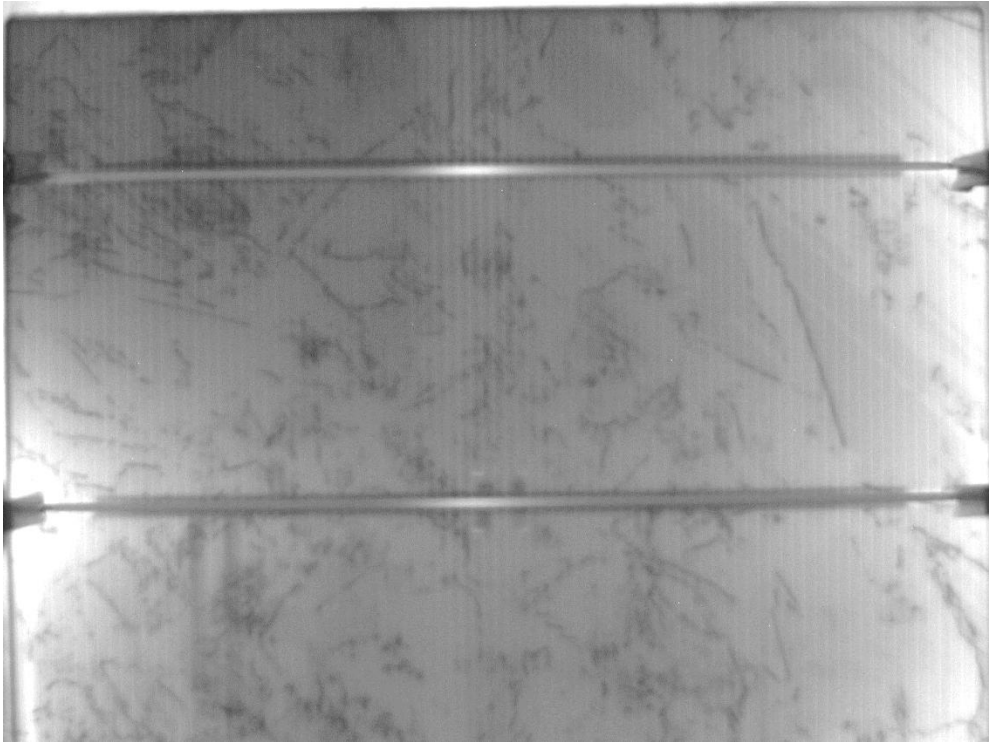


Etter testing

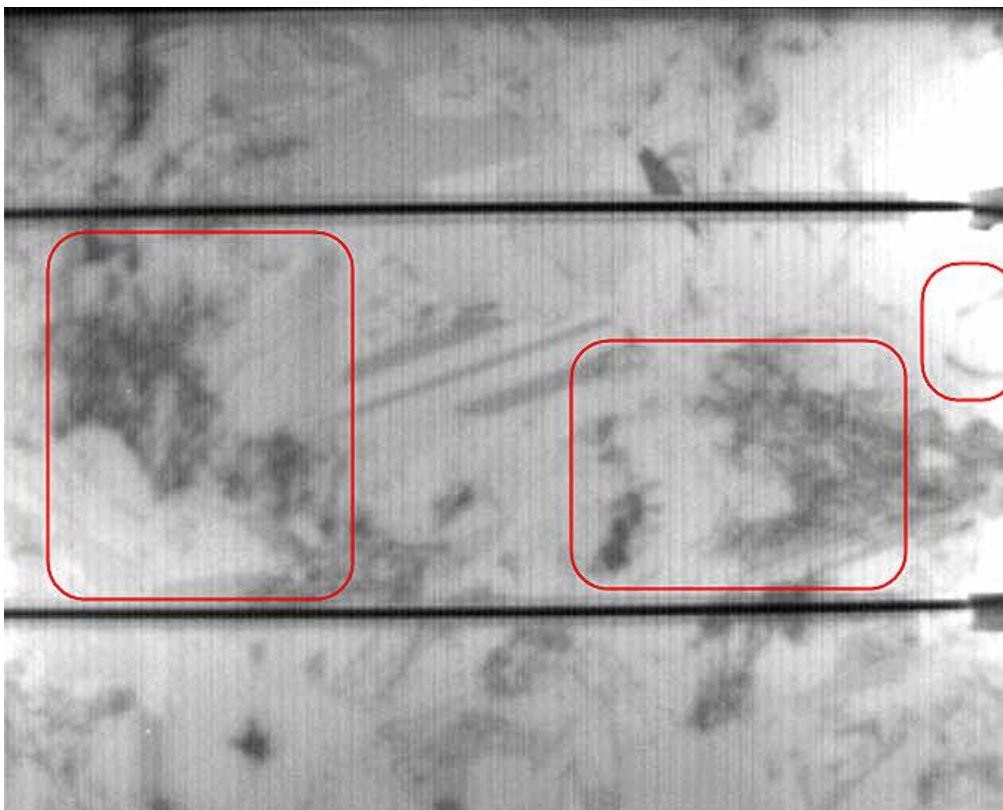


Figur 4. 17: Elektroluminescens bilder av solcelle før og etter syklus-test, når last er på kryss med busbar. Det første bildet viser før syklus-test og bildet under viser etter syklus-test.

Før testing



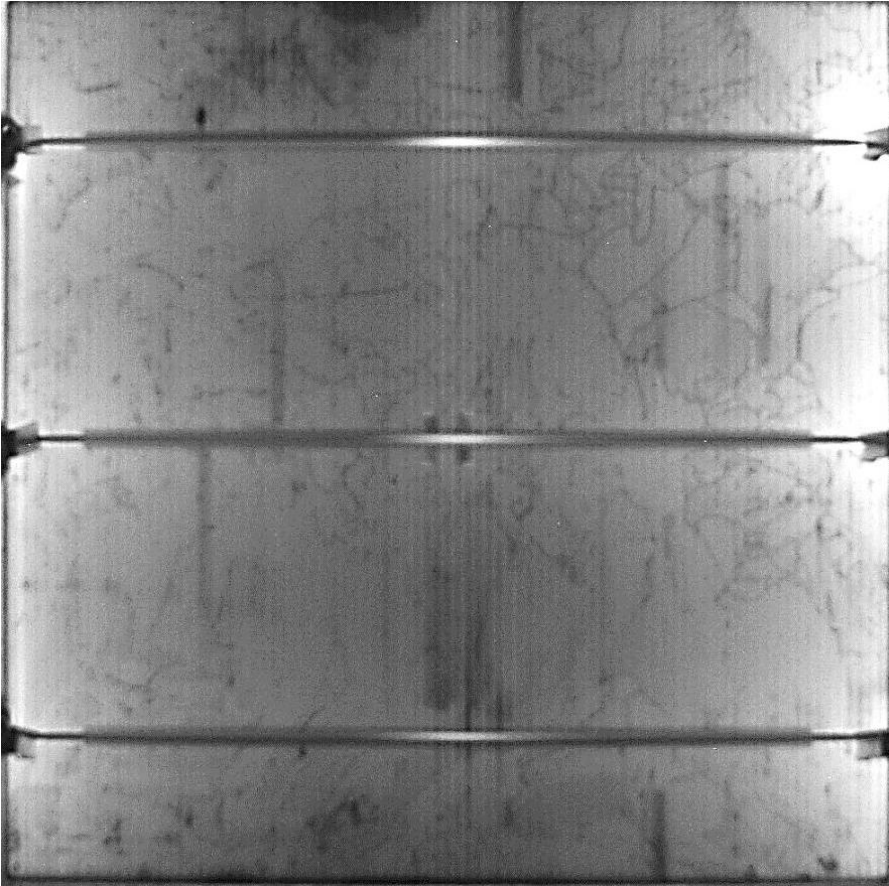
Etter testing



Figur 4. 18: Elektroluminescens bilder av solcelle før og etter syklus-test, når last er på kryss med busbar; bildet viser den samme cellen fra fig. 4. 17 men på venstre side, første bildet er før testing, og bildet under er etter testing. Sprekk og dislokasjoner er vist i røde områder.

Fra fig. 4. 16 til 4. 18 vises elektroluminescens bilder av solcelle før og etter testing; det ble tatt flere solcelle EL bilder etter testing men det er kun noen få EL bilder etter testing som ble vist i dette prosjektet, det er på grunn av CCD IR kamerat som ble brukt i eksperimentet ikke er i stand til å vise tydelig feilene som ligger i solcelle etter testing, det kan hende at det er noe små sprekker som ligger inne i dislokasjonene men kameraet klarer ikke å fremheve det. Det er flere bilder på vedlegg 4.

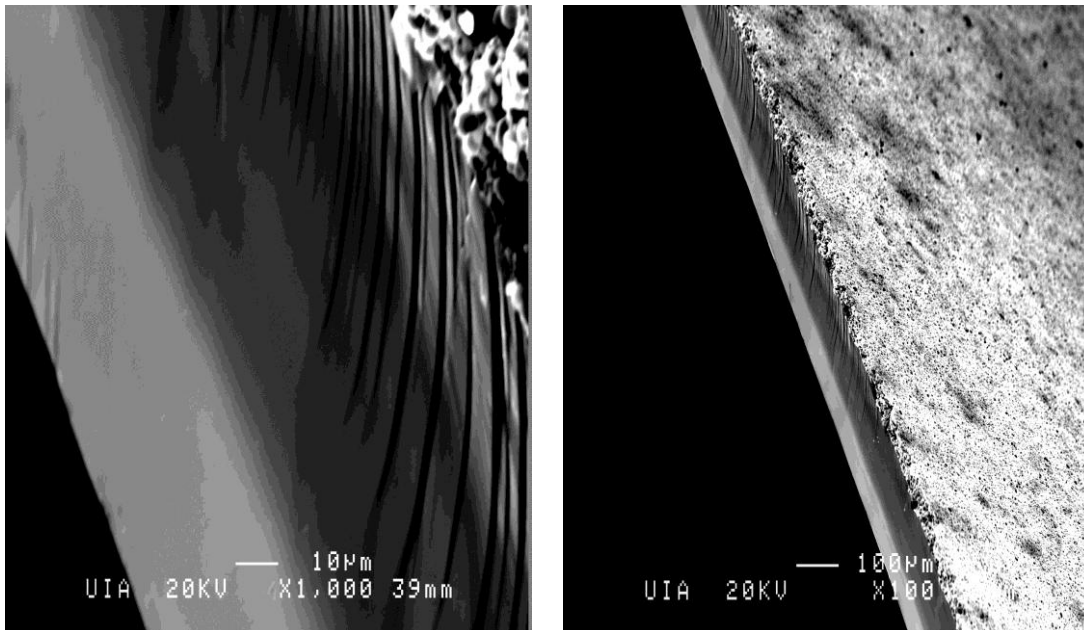
Figur under viser hvordan en solcelle før testing ser ut i EL av bilde system.



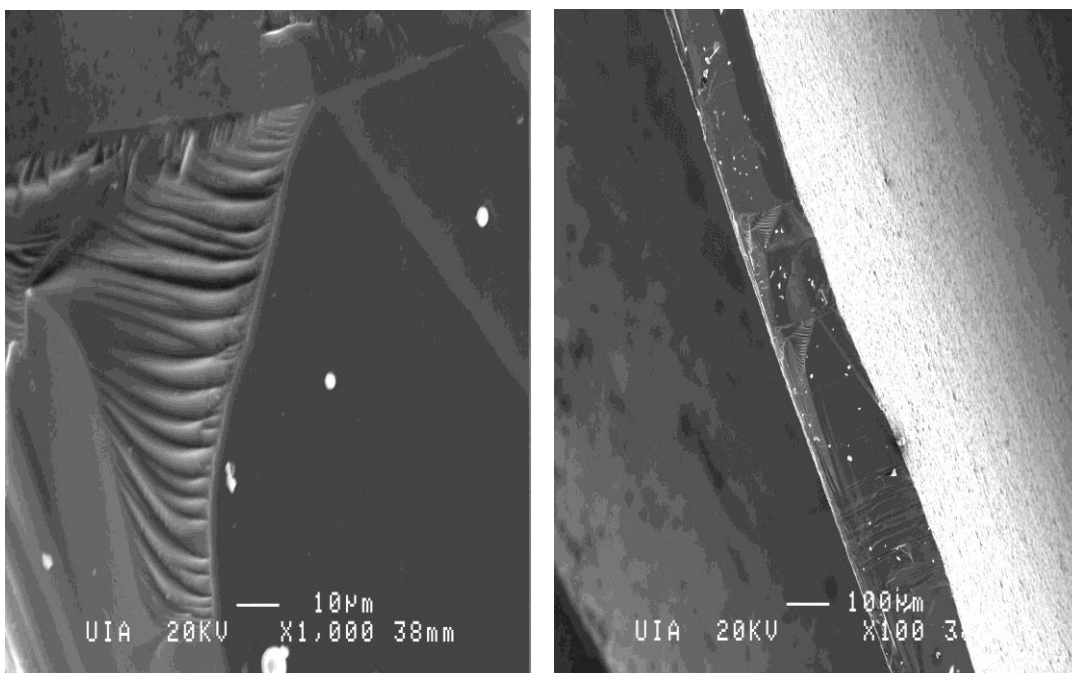
Figur 4. 19: Elektroluminescens bilder av solcelle før testing.

4.3 SEM Bilder

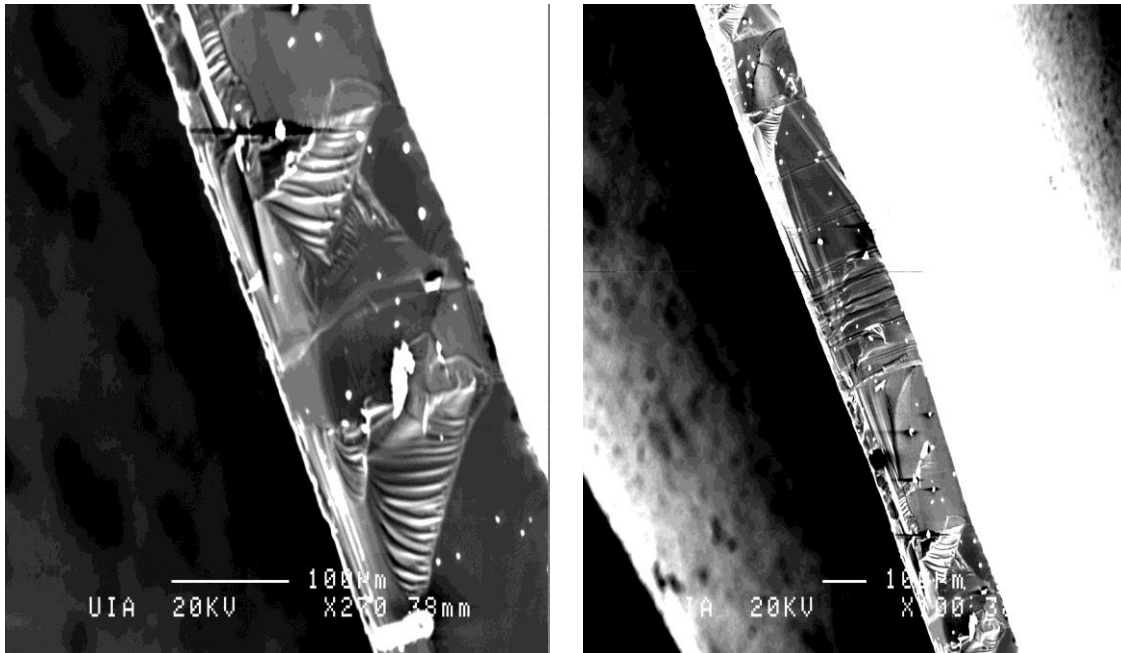
For å se på utmattings overflate av solcelle og wafer må vi bruke JSM-6400 scanning elektron mikroskop. Prøvene ble satt inn i en holder som ble fylt med sprit og så vasket i mikrobølge maskin, før undersøkning.



Figur 4. 20: SEM bilder som viser utmattings overflate av solcelle, forstørrelsen for bildet til vestre er 1000 ganger, og bildet til høyre er 100 ganger. Fra bilde til venstre kan



Figur 4. 21: SEM bilder som viser utmattings overflate av wafer, forstørrelsen for bildet til vestre er 1000 ganger, og bildet til høyre er 100 ganger. De hvite prikkene er urenheter på wafer.



Figur 4. 22: SEM bilder som viser utmattings overflate av solcelle, forstørrelsen for bilde til vestre er 270 ganger, bilde til høyre er 100 ganger. De hvite prikkene er urenheter på solcellen.

Fra figurene kan vi se at utmattings overflatene er relativt slette og omtrent 90° på solcellen/waferens flate, og de hvite prikkene er urenheter i wafer og solcelle.

5. Diskusjon

5.1 mekanisk test

Fra kapittel 4 får vi resultater for testing av solcelle og wafer, resultatene av syklus-testene viser forholdene mellom spenning og elastisk deformasjon, plastisk deformasjon og brudd-test, kurvene viser hvor cellene og waferne ble brutt og hvor mye kraft som ble brukt.

Solcelle syklus-test

Når last er på kryss med busbar:

Prøve 1: Antall sykler er 100 000, spennvidde er 2, 5 mm, syklusfrekvens er 2 Hz. Kurven viser elastisk deformasjon, i dette området er proporsjonaliteten mellom spenning og deformasjon lik, last er cirka -32 N når antall sykler er 100 000.

Prøve 2: Antall sykler er 456 429, spennvidde er 2 mm, syklusfrekvens er 1 Hz. Kurven viser både elastisk deformasjon og plastisk deformasjon, når antall sykler er fra cirka 0 til 250 000, viser kurven elastisk deformasjon, når antall sykler er fra cirka 250 000 til 450 000, viser kurven plastisk deformasjon. Last er cirka -28 N når antall sykler er 100 000, når antall sykler er 160000 er last cirka -43 N.

Prøve 3: Antall sykler er 165 000, spennvidde er 5 mm, syklusfrekvens er 2 Hz, kurven viser elastisk deformasjon. Last er cirka -42 N når antall sykler er 100 000, når antall sykler er 160 000 er last cirka -52 N.

Det er cirka 10 N forskjell mellom prøve 2 og prøve 3 da antall sykler er 160 000 for begge prøver, spennvidde på prøve 2 er 2 mm men på prøve 3 er 5 mm, det vil også si at lett bøyning trenger flere sykler, hard bøyning trenger forholdvis færre sykler. Syklus frekvens påvirker mekanisk deformasjon, jo høyere syklus frekvens jo saktere kommer den mekaniske deformasjonen til å bli.

Når last er parallell med busbar:

Prøve 1: Antall sykler er 350 000, spennvidde er 5 mm, syklusfrekvens er 2 Hz. Kurven viser både elastisk deformasjon og plastisk deformasjon, når antall sykler er fra cirka 0 til 17000, viser kurven elastisk deformasjon, når antall sykler er fra cirka 170 000 til 350 000, viser kurven plastisk deformasjon. Last er cirka -26 N når antall sykler er 100 000, last er cirka -42 N når antall sykler er 200 000, og når antall sykler er 300 000 er last cirka -48 N.

Prøve 2: Antall sykler er 200 000, spennvidde er 3 mm, syklusfrekvens er 2 Hz, kurven viser elastisk deformasjon. Last er cirka -28 N når antall sykler er 100 000, når antall sykler er 200 000 er last cirka -48 N.

Prøve 3: Parameterne som ble brukt i prøve 3 er dem samme som i prøve2. Antall sykler er 300 000, spennvidde er 3 mm, syklusfrekvens er 2 Hz, kurven viser elastisk deformasjon. Last er cirka -29 N når antall sykler er 100 000, når antall sykler er 200 000 er last cirka -45 N, og last er cirka -65N når antall sykler er 300 000.

På solcelle syklus-test når last er parallell med busbar er resultatene til prøve 2 og prøve 3 nesten like, det er på grunn av at test parameterne som ble brukt er dem samme, men prøve 2 ble stoppet når antall syklus var kommet til 200 000 og prøve 3 ble stoppet når antall syklus var 300 000; begge prøvene viser elastisk deformasjon. Test resultatet for prøve 1 er forskjellig fra prøve 2 og 3, cellen for prøve 1 er i plastisk deformasjon når antall sykler er 300 000 og last er cirka -45 N, det viser at det trenger færre sykler og last for å komme til plastisk deformasjon for prøve 1 enn for prøve 2 og 3. Det er mange årsaker som kan føre til forskjellige resultater selv om test metoden er den samme, f.eks. ulik identitet til cellene, feil data som dukker opp i system under testing eller prøve ble berørt av andre personer i labben.

Sammenligning av prøvene fra testene der last er på kryss eller parallell med busbar:

	Spennvidde [mm]	Sykler	Last	Sykler	Last [N]
Last på kryss med busbar prøve 1	2,5	100 000	-35	200 000	--
Last på kryss med busbar prøve 2	2	100 000	-30	200 000	-50
Last på kryss med busbar prøve 3	5	100 000	-43	200 000	--
Last parallell med busbar prøve 1	5	100 000	-28	200 000	-42
Last parallell med busbar prøve 2	3	100 000	-30	200 000	-50
Last parallell med busbar prøve 3	3	100 000	-30	200 000	-50

Tabell 5. 1: sammenligner av prøvene

Fra tabell 5. 1 kan vi se når antallet sykler er like, at posisjonen last har på busbar påvirker test resultatet lite, men spennvidde og syklusfrekvens har større påvirkning for mekanisk styrke.

Som nevnt før, er det også mange andre årsaker som kan påvirke test resultatet, for å studere mekanisk påkjenning på solcelle godt, bør det testes flere prøver, men i dette eksperimentet er tid begrenset og det trengs flere dager for å fullføre en syklus test.

Solcelle brudd-test

Det er 4 solceller som ble testet, 2 solceller testet for last på kryss med busbar, 2 solceller testet for last som er parallell med busbar, datalog frekvens og ramperate er samme for alle testene. Brudd-kraft er 7,074 N og 6,948 N, og brudd-lengde er 8,492 mm og 8,436 mm når last er på kryss med busbar på solcellene. Når last er parallell med busbar er brudd-kraft 7,362 N og 7,171 N, brudd-lengde er 8,996 mm og 8,966 mm for prøve 3 og 4. Det trengs mer kraft for å bryte celler når last er parallell med busbar enn når last er på kryss med busbar.

Wafer brudd-test

Wafer fra produsent A: Brudd-kraft og brudd-lengde er nesten lik for prøve 1 og 2, litt forskjell fra prøve 2 kan skyldes av urenheter i waferen.

Wafer fra produsent B: Brudd-kraft og brudd-lengde er omtrent lik for de 3 prøvene. Det trengs cirka 1 N mer kraft og 1 mm mer lengde for å bryte wafer fra produsent A enn produsent B, det vil si wafer fra produsent A er mykere enn wafer fra produsent B.

Wafer fra produsent C: Prøvene har veldig lav brudd-kraft og brudd-lengde, og prøvene ble ofte sprukket fra midten under brudd-testing.

Wafer fra produsent D: Prøve 3 og prøve 4 har omtrent like stor brudd-kraft og brudd-lengde, Prøve 2 har høyest brudd-kraft og brudd-lengde som er 6, 476 N og 6, 494 mm; og prøve 4 har lavest brudd-kraft og brudd-lengde som er 4, 344 N og 4, 419 mm.

Wafer fra produsent E: Wafer er veldig sprøtt, prøvene ble ofte brutt i mange små biter under brudd-testing.

Wafer fra produsent F: Prøve 2 har høyest brudd-kraft og brudd-lengde som er 4, 851 N og 5, 561 mm.

Wafer fra produsent A har høyest brudd-kraft og brudd-lengde, og er mykere enn wafer fra andre produsenter, wafer fra produsentene C og E er mest sprøtt. At test resultatene er forskjellige når wafer er fra samme produsent kan skyldes av kuttingen, forskjellig posisjon segregering som resulterer i variasjon av mekanisk andel av wafer.

Det vil være interessant å vite den begrensende sprekk størrelsen i wafer som vil føre til wafer brudd under anvendt håndterings styrke. Hvis man antar at brud modusen er dominerende og sprekk ligger i området hvor strekkspenninger er, avhenger forplantning av følgende faktorer: [5]

- størrelsen av lang-feltet strekkspenninger som fungerer normalt til sprekk planet
- sprekk geometri (størrelse og form)
- brudd-styrke av materialet

5.2 Elektroluminescens bilder

De mørke flekkene på bildene er dislokasjon, dislokasjoner dannes på grunn av termiske spenninger under rettet størkning av silisium ingot. Dislokasjoner regnes som en av de mest skadelige typer feil som ikke bare kontrollerer det elektriske, men også de mekaniske egenskapene til silisium. Når dislokasjoner er opprettet, kan de gå videre i glide plan hvis den termiske aktiverings energi (for silisium temperatur over 600-700 °C) og effektivt stress for forvridnings bevegelse er tilstede. Bevegelsen av dislokasjoner kan føre til ytterligere plastisk deformasjon gjennom multiplikasjon opp til et punkt når, på grunn av økt forvridnings tetthet, atom gitterets friksjon overkommer det effektive stresset som trengs for og flytte dislokasjoner. [22]

I figur 4.17 vises det hvordan dislokasjon ser ut, og det er også noe små sprekker på kanten av solcellen. På grunn av utstyret er elektroluminescens bildene ikke så veldig tydelige.

Solcelle som ble påvirket etter brudd-test kan ses ved fig. 4. 16, det er 2 store sprekker som går fra brudd kanten og videre leder inn i cellen, dislokasjoner er og finne i alle områder på cellene. Elektroluminescens bildet av syklus-test når last er på kryss med busbar som er vist ved fig. 4. 17 og 4. 18. Ved fig. 4. 18 viser en del mørke soner på bildet under, dette er dislokasjon, det er også to sprekker på høyre side av cellen.

Sprekk initiering i silisium solceller gjennom statisk mekanisk belastnings test: [26]

- Sprekker parallelt med busbar fører til det høyeste potensielle separerte celle området.
- Meste parten av sprekke var parallele med busbar, og bare noen få prosent av solcelle sprekke er vinkelrette med busbar.
- Diagonale sprekker forekommer hovedsakelig i hjørnene av cellene.

6. Konklusjon

Karakterisering av den mekaniske styrken av multi-krystalinske silisium wafere og solcelle ble undersøkt ved hjelp av en tre-punkters bøyning test og EL avbildnings system. Studien viste at:

- Hvilken posisjon last har på busbar har lite påvirkning på mekanisk styrke i forhold til spennvidde og syklusfrekvens. Lav spennvidde trenger flere sykler, høy spennvidde trenger forholdsvis færre sykler. Syklusfrekvens påvirker mekanisk deformasjon, jo høyere syklus frekvens jo saktere kommer den mekaniske deformasjonen til å bli.
- Overflate og kant defekter som mikro-sprekker, dislokasjon er en av de mest sannsynlige grunnene som fører til mekanisk styrke degradering, reduksjon av potensielle mikrosprekker kan føre til økning av multi-krystalinske silisium wafer brudd styrke. [21]
- Det trengs mer kraft for å bryte celler når last er parallell med busbar enn når last er på kryss med busbar.
- Meste parten av sprekkene var parallelle med busbar.
- Dette prosjektet bekrefter kapabilitet til å forutsi wafer og solcelle brudd under mekanisk testing ved hjelp av det totale stresset, forutsatt sprekkens størrelse, plassering og brudd seighet. [5]

7. Referanser

1. Atkins, P.W, General Chemistry international student edition, 1989, pp.703.
2. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/sili2.html> (1.2012)
3. PDF, <http://www.sorlandetvitensenter.no/wp-content/uploads/2011/08/SOLCELLER-Elevhefte-til-kurs1.pdf> (2.2012)
4. <http://hordnes.info/2009/07/solcellepanel-og-silisium/> (2.2012)
5. Xavier F. Brun, Shreyes N. Melkote, Analysis of stresses and breakage of crystalline silicon wafers during handling and transport, Solar energy materials and solar cells, 2009, pp.1238-1247.
6. <http://solarknowledge.blogspot.com/2009/03/multicrystalline-silicon.html> (1.2012)
7. Stuart R. Wenham, Martin A. Green, Muriel E. Watt and Richard Corkish, Applied photovoltaics Second edition, 2007, S. 32, 33, 54.
8. PDF, An Over View of Multicrystalline Solar Cells Process, Technology and Related Issues, Tor Oskar Sætre, Muhammad Tayyib, mai 20112
9. <http://www.fortunesolar.com/2-multicrystalline-silicon.html> (1.2012)
10. J. H. Liu, Z. J. Pei, Graham R. Fisher, Grinding wheels for manufacturing of silicon wafers: a literature review, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol 47, 2007, pp. 2.
11. http://en.wikipedia.org/wiki/Die_%28integrated_circuit%29 (2.2012)
12. Conrad Vogel, Celia Juhl, Ernst Maahn, Metallurgi for ingeniører 7.utgaver, 1995, PP.119, 120,121, 191
13. Desmond Y.R. Chong, W.E.lee, B.K.Lim, John H.L.Pang, T.H.Low. Mechanical characterization in failure strength of silicon dice, Inter society conference on thermal phenomena, pp203-204, 2004.
14. <http://delphi.com/manufacturers/testing-services/mexico-technical-center/mtc-fat-lab/> (2.2012)
15. B. Cotterell, Z. Chen, J.B. Han, N.X. Tan, The strength of the silicon die in flip-chip assemblies, Japan J. Appl. Phys, Vol. 125, March 2003, pp
16. Betty Yeung, Tien-Yu Tom Lee, An overview of experimental methodologier and their applications for die strength measurement, IEEE transactions on components and packaging technologies, Vol 26, No2, pp.423-425, JUNE 2003.
17. Du-Ming Tsai, Shih-chieh Wu, Wei-Chen Li, defect detection of solar cells in electroluminescence images using Fourier image reconstruction, Solar Energy Materials & Solar Cells 99 (2012) 250-262.
18. <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/351229/luminescence/68946/Triboluminescence?anchor=ref582024> (13.3.2012)
19. A. Almar-Næss, Metalliske materialer struktur og egenskaper 4 utgave, 2003, S. 71,75, 77, 79, 81.
20. <http://no.wikipedia.org/wiki/PID-regulator>
21. V.A. Popovich, A. Yunus, M. Janssen, I.M. Richardson, I.J. Bennett, Effect of silicon solarcell processing parameters and crystallinity on mechanical strength; Solar Energy Materials and Solar Cells; S. 97.
22. G. Sarau, S. Christiansen, M. Holla, W. Seifert, Correlating internal stresses, electrical activity and defect structure on the micrometer scale in EFG silicon ribbons, Solar Energy Materials & Solar Cells, vol. 95, august 2011, S. 2264-2271.
23. http://no.wikipedia.org/wiki/Utmatting#H.C3.B8syklusutmatting_av_betong (28. 5. 2012)

24. PDF, <http://www.msm.cam.ac.uk/teaching/partII/courseC15/C15H.pdf>, Natural Sciences Tripos Part II MATERIALS SCIENCE. (28. 5.2012)
25. Bruksanvisning til 879 serie digital servostyring og datainnhentingsenhet/ programvare operativsystem
26. Sarah Kajari-Schröder, Iris Kunze, Ulrich Eitner, Marc Köntges, Spatial and orientational distribution of cracks in crystalline photovoltaic modules generated by mechanical load tests, Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 95, Issue 11, Nov2011, Pages 3054–3059.

Figur liste

2. 1	Struktur til silisium [2]	6
2. 2	Prinsippskiss av en solcelle sett [3]	7
2. 3	En solcelle i tverrsnitt [3]	8
2. 4	På grensen mellom to krystall kornene er båndene belastet, som fører til degradering av de elektriske egenskapene [7]	9
2. 5	Screen- printing stepper [8]	12
2. 6	Elastisk og plastisk deformasjon av et metallgitter [12]	13
2. 7	Ved elastiske deformasjon forandres avstanden mellom atomene, men hvert atom beholder sine naboer. (a) Strekk og trykk. (b) Skjær [19]	14
2. 8	(a) Glidning skjer lettest mellom tettpakkede plan, således lettere mellom A-A enn B-B. (b) Tettpakket plan i en kubisk flate sentrert struktur [19]	15
2. 9	Plastisk deformasjon ved tvilling-dannelse [19]	16
2. 10	(a) Arbeides linje for et sprøtt materiale, (b) Nominell sprøtt materiale [12]	17
2. 11	SEM bilde viser sprø brudd cleavage med typiske elvemønstre [14]	18
2. 12	Flere chervon mønstre springer ut fra sprekk opprinnelse [13]	18
2. 20	Utmatting test kjøring under stress kontroll. [24]	19
2. 14	Trepunkts bøyd test [16]	21
2. 15	Tre-punkter og fire-punkter bøyd test konfigurasjon [16]	22
2. 16	Fire punkts bøye test, bøyemoment, og parameterne [16]	22
2. 17	Ball-brudd test [16]	23
2. 18	Konfigurasjon av EL avbilde system [17]	24
2. 19	CCD-bildene, (a) multi-krystallinske solceller wafer og (b) multi-krystallinske solcelle [17]	25
3. 1	a) Last er parallell med busbar på solcelle, b) Last er kryss med busbar på solcelle	26
3. 2	a) metal plate med 6 strøm kontakter, b) solcelle på metal plate	29
3. 3:	Merlin kamera	29
4. 1	Slik solcelle ser ut etter bryte-test når lasten er parallell med busbar	34
4.2	Prøv 1 last er på kryss med busbar	35
4. 3	Prøve 2 last på kryss med busbar	36

4. 4 Prøve 3 last på kryss med busbar	36
4. 5 Prøve 1 last er parallell med busbar	37
4. 6 Last er parallell med busbar under prøve 2	37
4. 7 Last er parallell med busbar under prøve 3.....	38
4. 8 Brudd-test for last er på kryss med busbar og last er parallell med busba	39
4. 9 Syklus test, wafer fra produsent A	40
4. 10 Brudd-test for wafer fra produsent A	41
4.11 Brudd-test for wafer fra produsent B	41
4. 12 Brudd-test for wafer fra produsent C	42
4. 13 Brudd-test for wafer fra produsent D.....	42
4. 14 Brudd-test for wafer fra produsent E	43
4. 15 Brudd-test for wafer fra produsent F	43
4. 16 Elektroluminescens bilder av solcelle	44
4. 17 Elektroluminescens bilder av solcelle før og etter syklus-test, når last er på kryss med busbar	45
4. 18 Elektroluminescens bilder av solcelle før og etter syklus-test, når last er på kryss med busbar	46
4. 19 Elektroluminescens bilder av solcelle før testing	47
4. 20 SEM bilder som viser utmattings overflate av solcelle	48
4. 21 SEM bilder som viser utmattings overflate av wafer	48
4. 22 SEM bilder som viser utmattings overflate av solcelle	49

Tabell liste

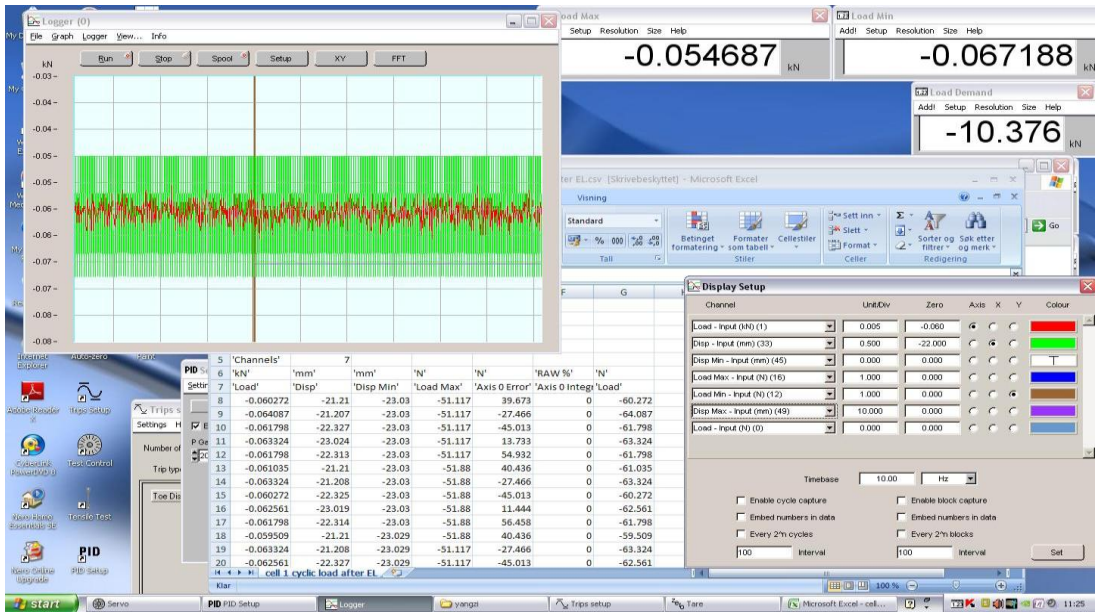
Tabell 2. 3: Diverse materialegenskaper til silisium.[2]	7
Tabell 2. 4: Diverse spesifikasjon til multi-krystallinske silisium wafer. [9]	10
Tabell 3. 1: Diverse funksjon til programmene	25
Tabell 3. 12: Syklus test for last på kryss med busbar på solcelle	28
Tabell 3. 13: Syklus test for last er parallell med busbar på solcelle	28
Tabell 3. 14: Brudd-test med last på kryss med busbar på solcelle	29
Tabell 3. 15: Brudd-test med last er parallell med busbar på solcellen	29
Tabell 3. 16: Syklus-test av wafer fra produsent A	29
Tabell 3. 17: Brudd-test av wafer fra produsent A	30
Tabell 3. 18: Brudd-test av wafer fra produsent B	30
Tabell 3. 19: Brudd-test av wafer fra produsent C	30
Tabell 3. 20: Brudd-test av wafer fra produsent D	31
Tabell 3. 21: Brudd-test av wafer fra produsent E	31
Tabell 3. 11: Brudd-test av wafer fra produsent F	31
Tabell 5. 1: sammenligner prøvene	51

Vedlegg

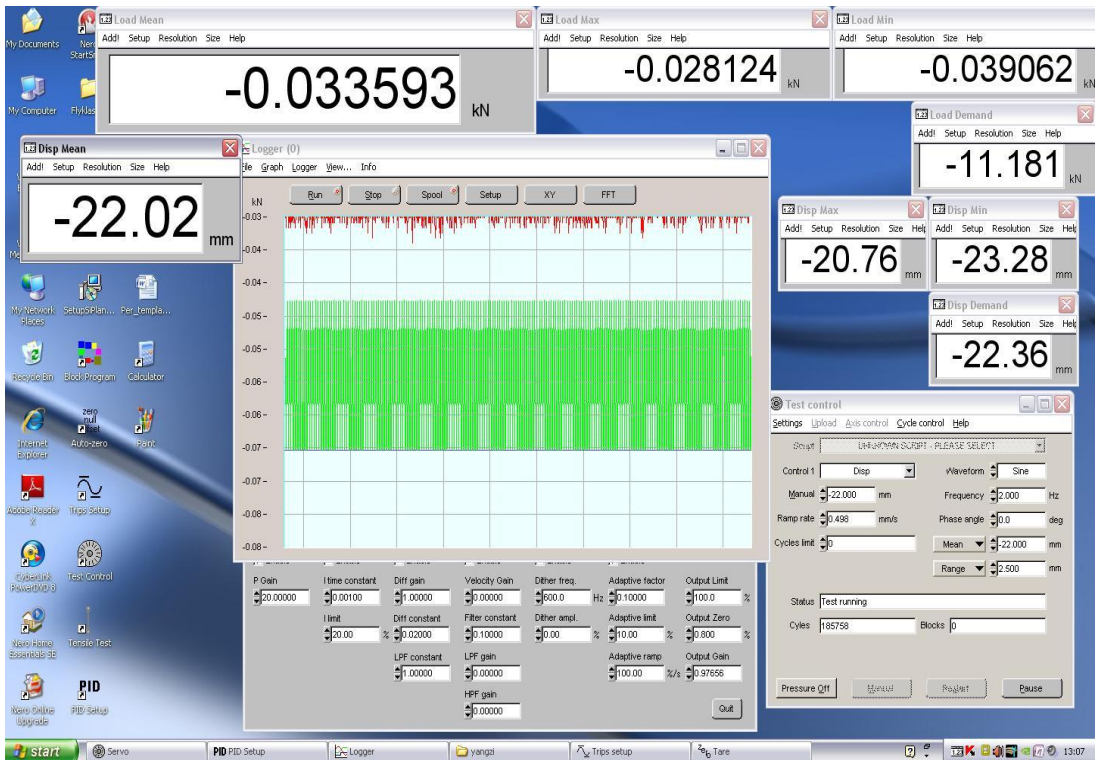
Vedlegg 1: Bilder av solcelle syklus-test under testing	I
Vedlegg 2: Bilder av solcelle brudd-test for individet prøve	V
Vedlegg 3: Bilder av wafer brudd-test for individet prøve.....	VII
Vedlegg 4: Elektroluminescens bilder	XVI

Vedlegg 1: Solcelle syklus-test

Last på kryss med busbar, prøve 1:

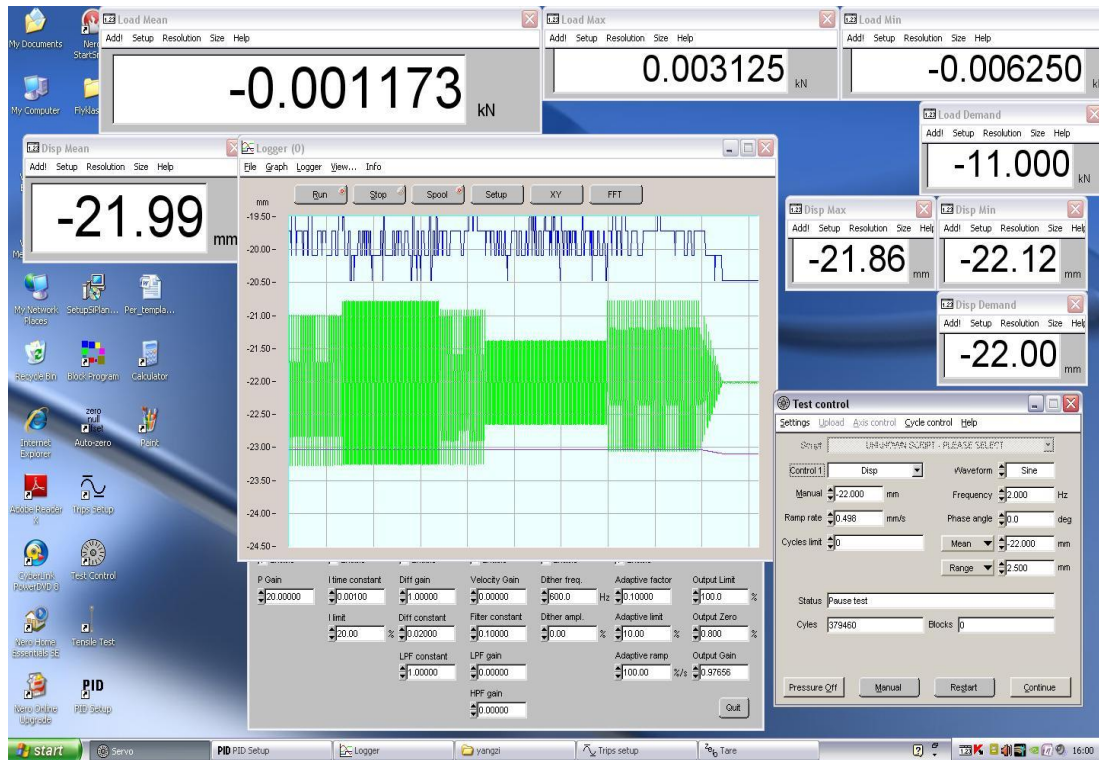


Figur 1: Prøve 1, syklus test når test er start, last er på kryss med busbar.



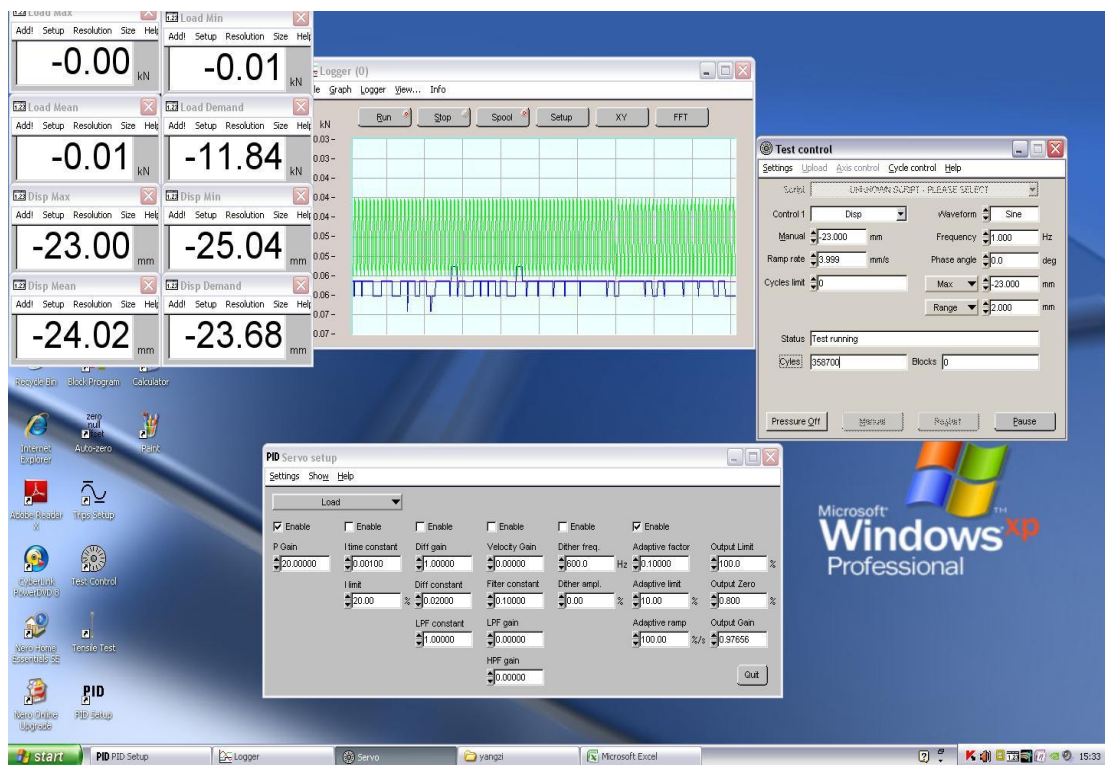
Figur 2: Prøve 1, syklus test etter en dag, last er på kryss med busbar.

Testing av mekanisk påkjenning på solcelle



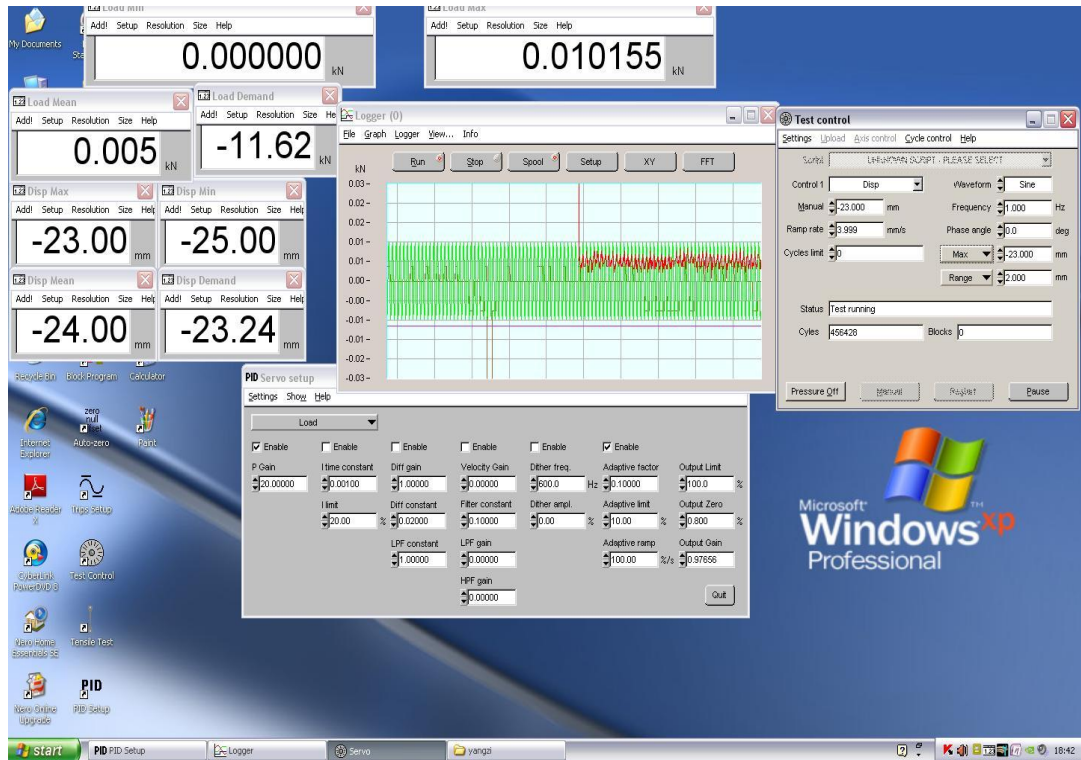
Figur 3: Prøve 1, syklus test når test er slutt, last er på kryss med busbar.

Last på kryss med busbar, prøve 2:



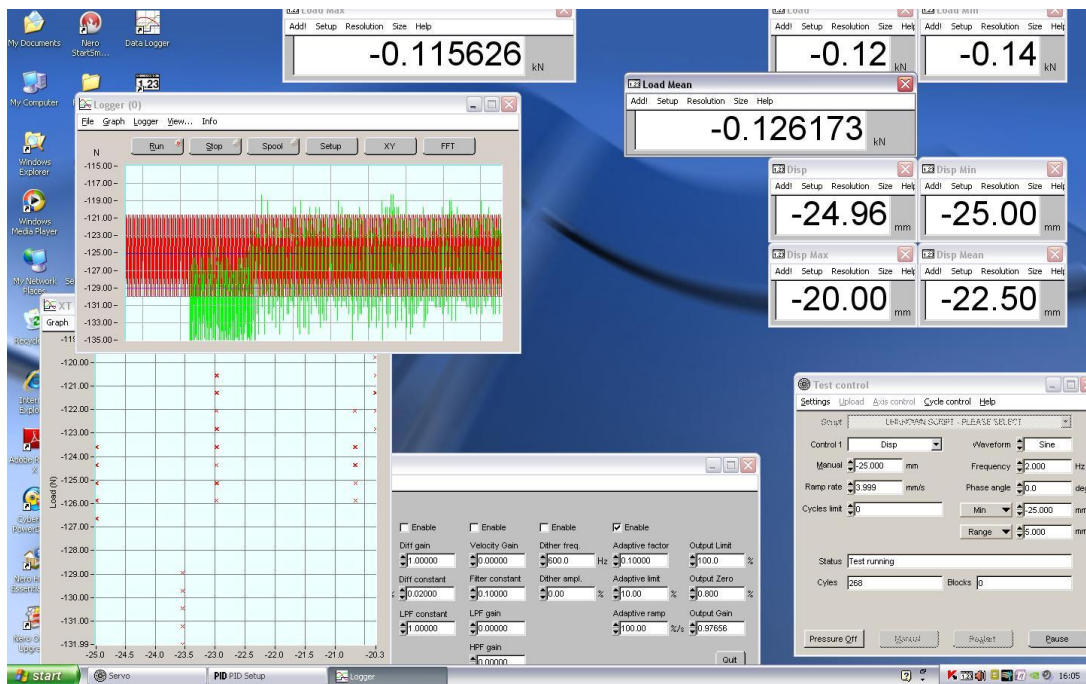
Figur 4: Prøve 2, syklus test start, last er på kryss med busbar.

Testing av mekanisk påkjenning på solcelle



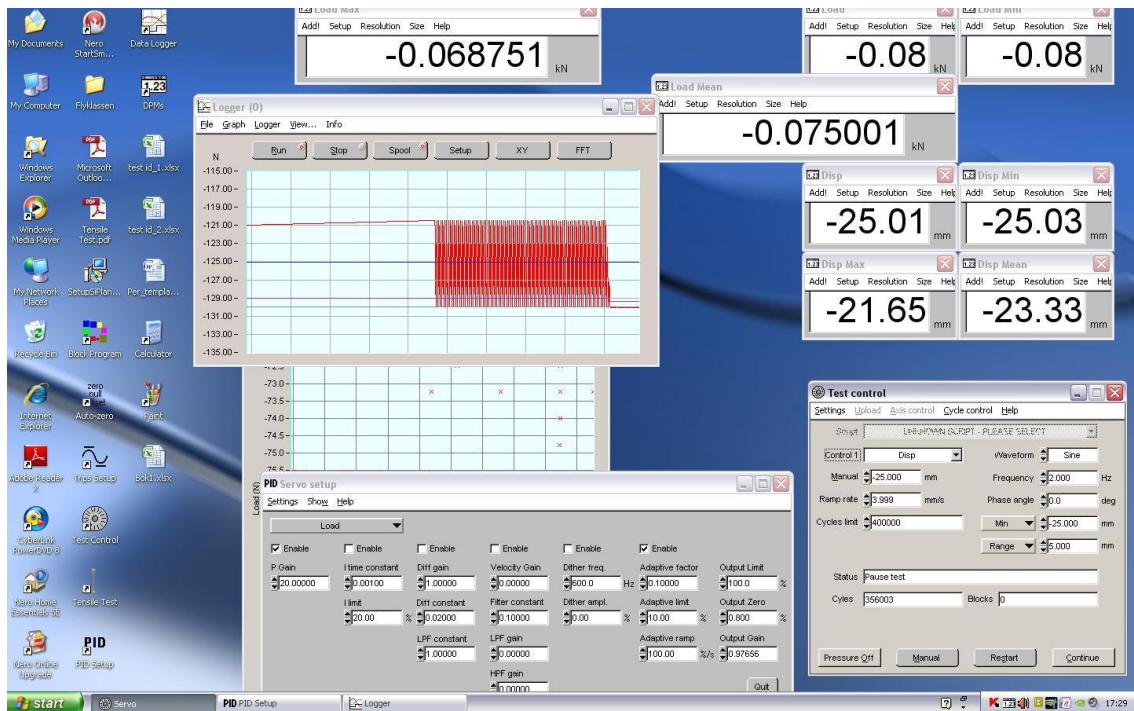
Figur 5: Prøve 2, syklus test slutt, last er på kryss med busbar.

Last som er parallell med busbar, prøve 1:

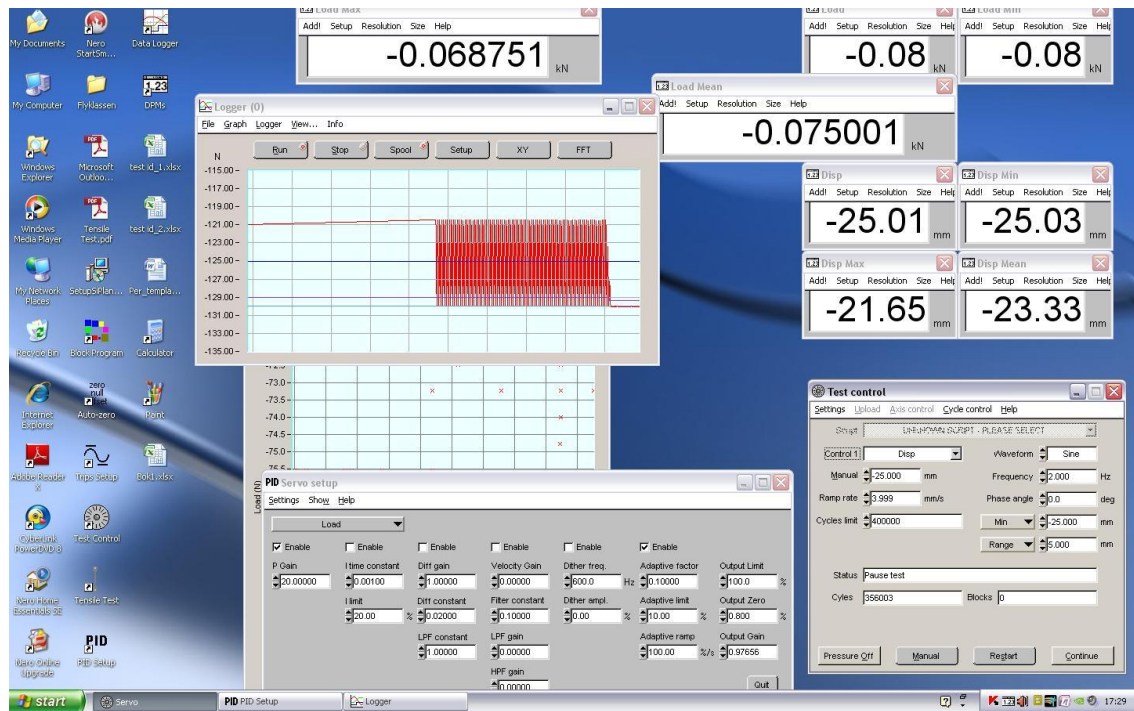


Figur 6: Prøve 1, syklus test start, last som er parallell med busbar.

Testing av mekanisk påkjenning på solcelle

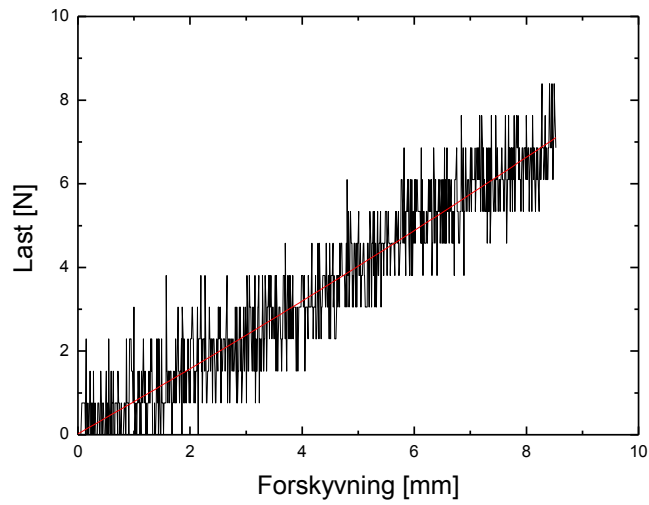


Figur7: Prøve 1, syklus test dagen etter, last som er parallell med busbar.

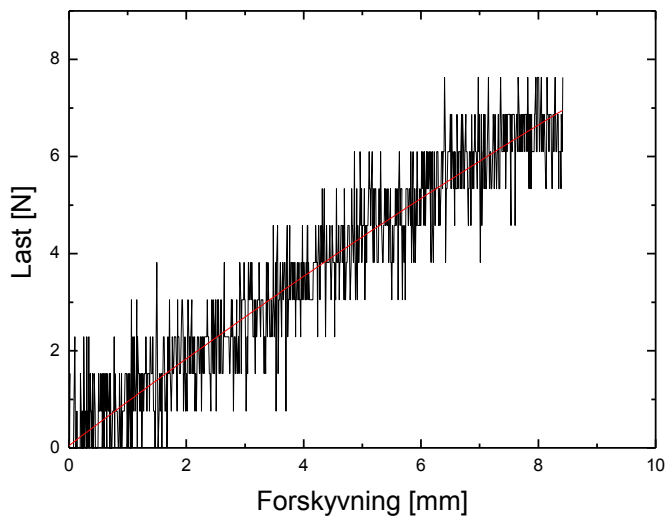


Figur 8: Prøve 1, syklus test slutt, last er parallell med busbar.

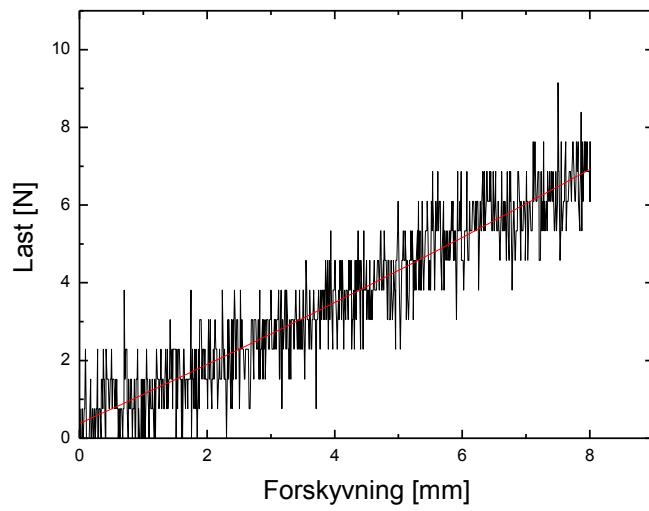
Vedlegg 2: Solcelle brudd-test



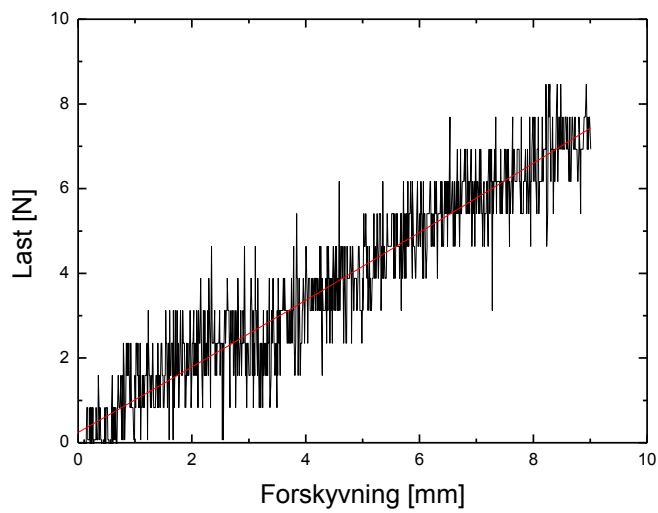
Figur 9: Last er på kryss med busbar, prøve 1.



Figur 10: Last er på kryss med busbar, prøve 2.

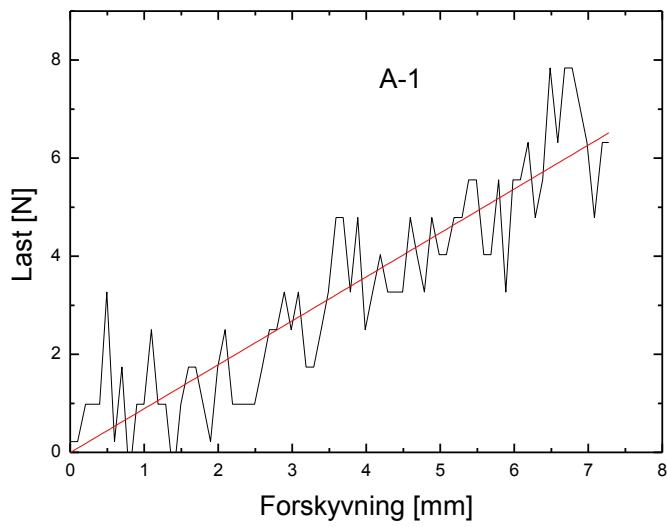


Figur 11: Last som er parallell med busbar, prøve 1.

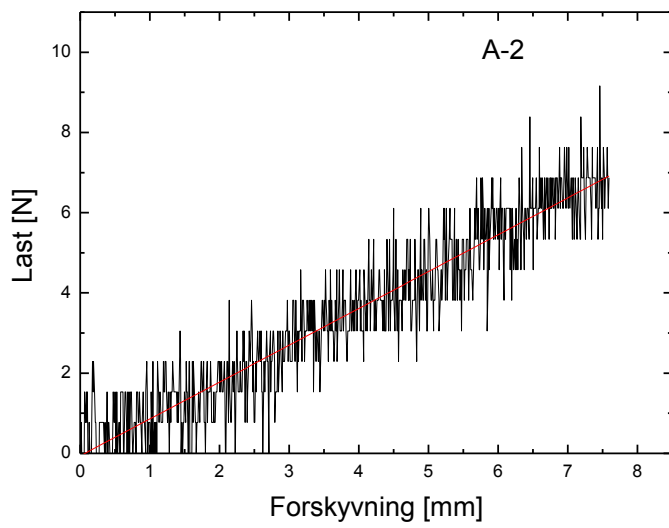


Figur 12: Last som er parallell med busbar, prøve 2.

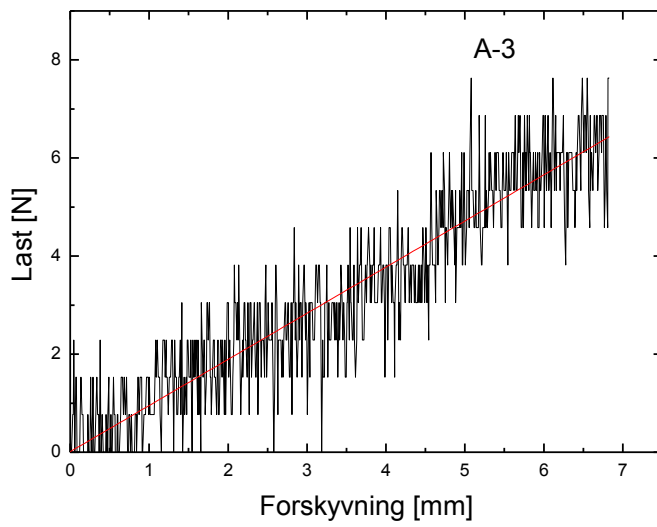
Vedlegg 3: Wafer brudd-test



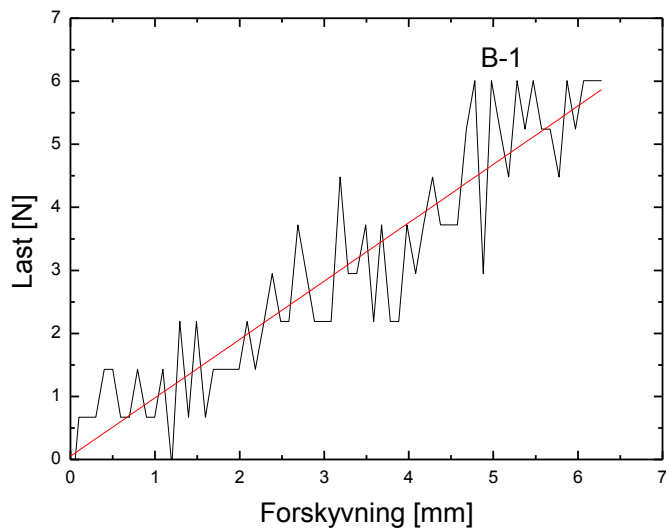
Figur 13: Brudd-test, wafer fra produsent A, prøve 1.



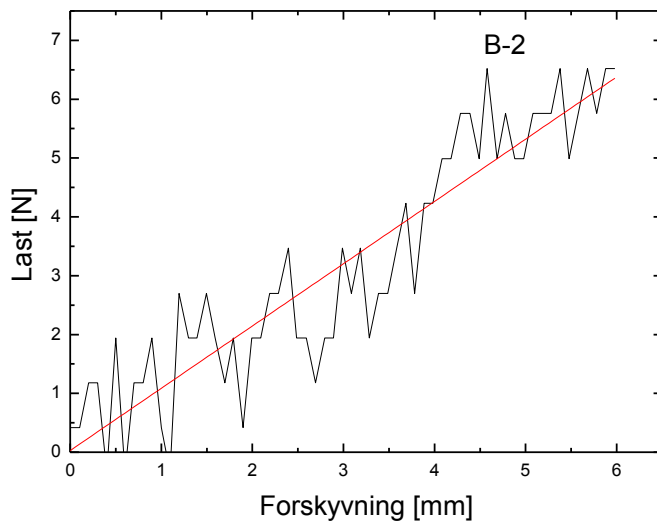
Figur 14: Brudd-test, wafer fra produsent A, prøve 2.



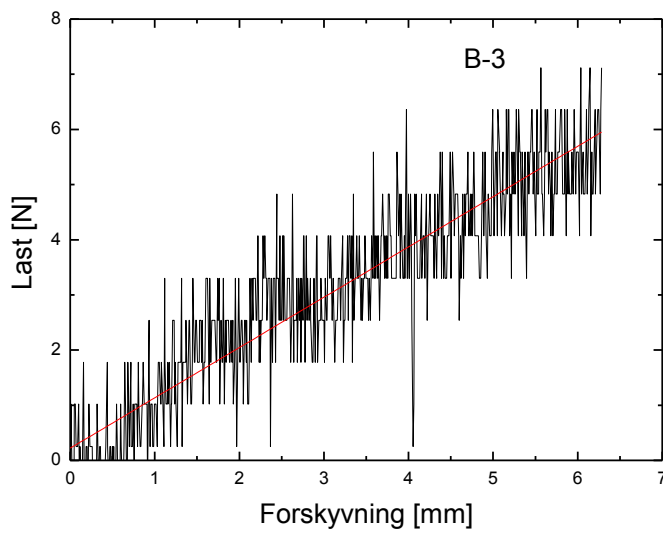
Figur 15: Brudd-test, wafer fra produsent A, prøve 3.



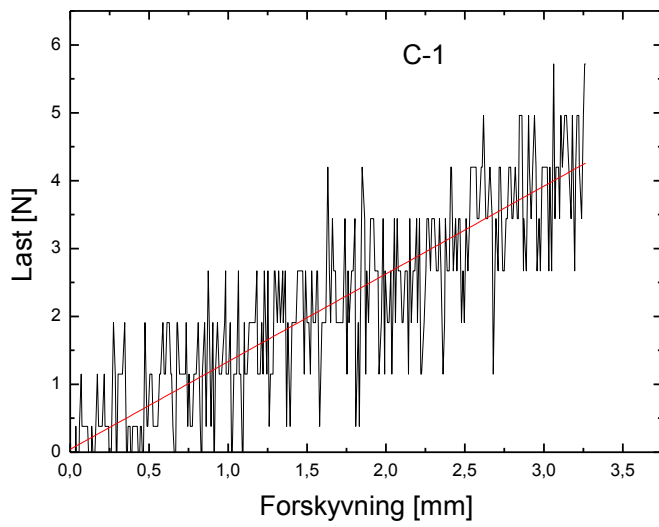
Figur 16: Brudd-test, wafer fra produsent b, prøve 1.



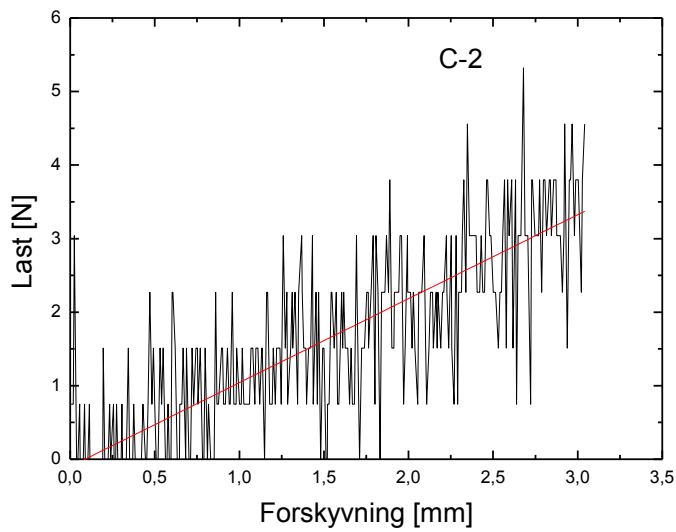
Figur 17: Brudd-test, wafer fra produsent b, prøve 2.



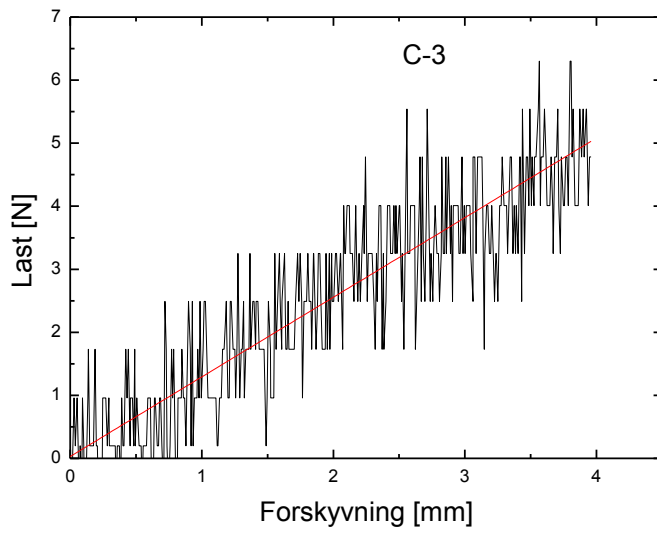
Figur 18: Brudd-test, wafer fra produsent b, prøve 3.



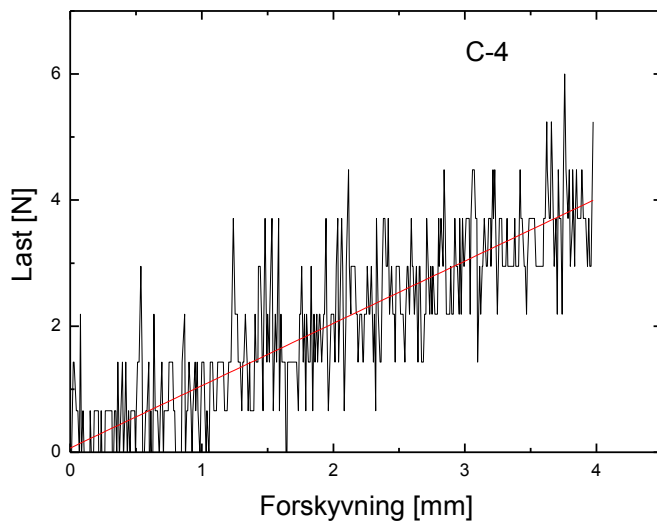
Figur 19: Brudd-test, wafer fra produsent c, prøve 1.



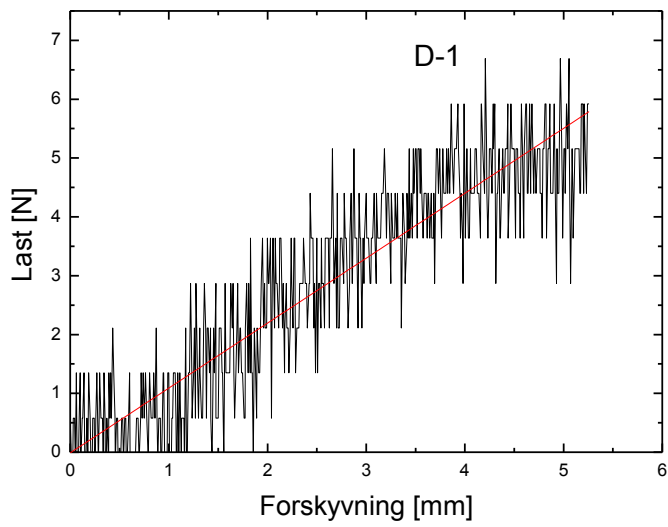
Figur 20: Brudd-test, wafer fra produsent c, prøve 2.



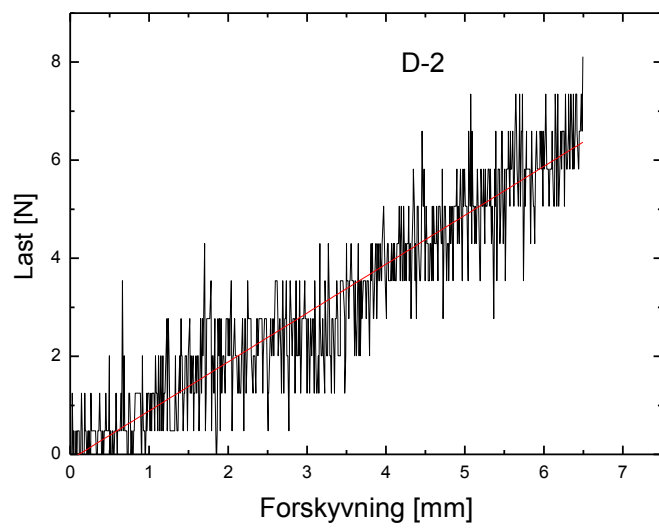
Figur 21: Brudd-test, wafer fra produsent c, prøve 3.



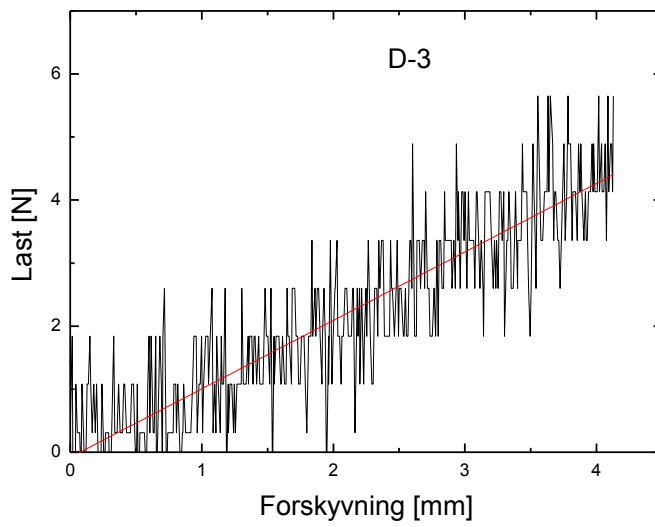
Figur 22: Brudd-test, wafer fra produsent c, prøve 4.



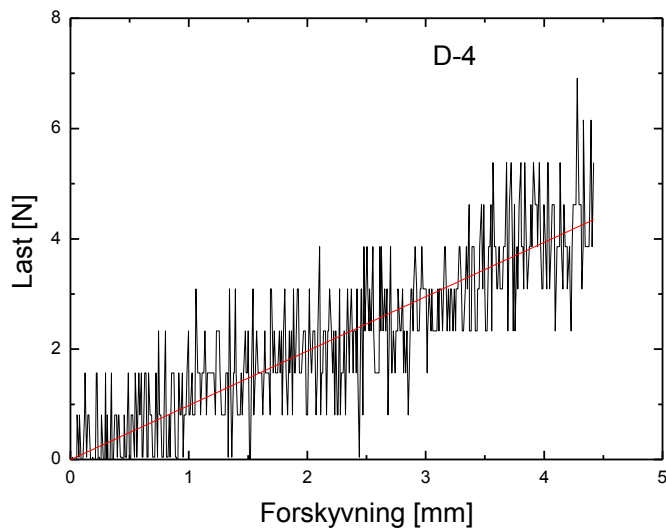
Figur 23: Brudd-test, wafer fra produsent D, prøve 1.



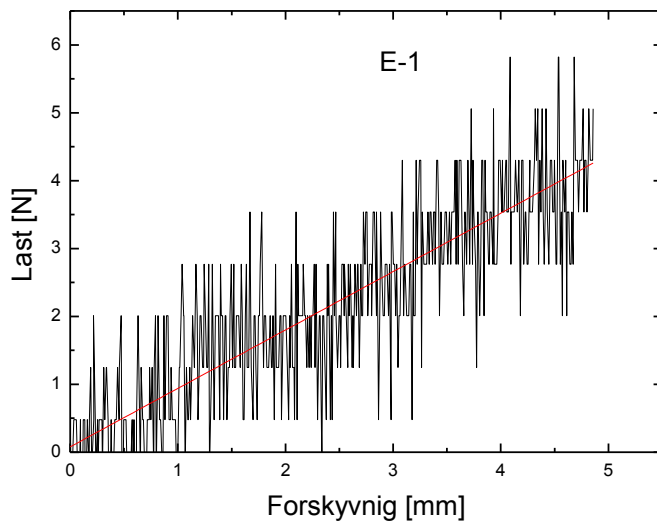
Figur 24: Brudd-test, wafer fra produsent D, prøve 2.



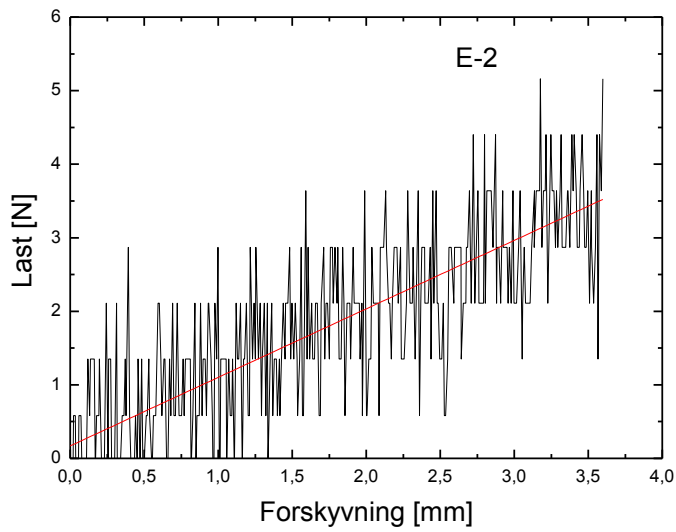
Figur 25: Brudd-test, wafer fra produsent D, prøve 3.



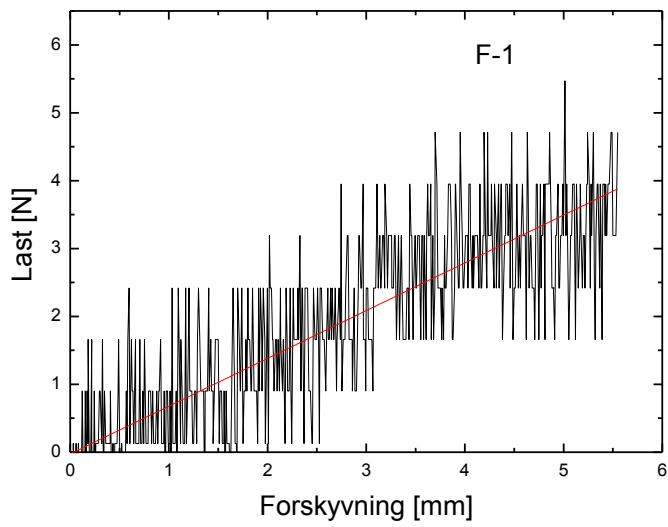
Figur 26: Brudd-test, wafer fra produsent D, prøve 4.



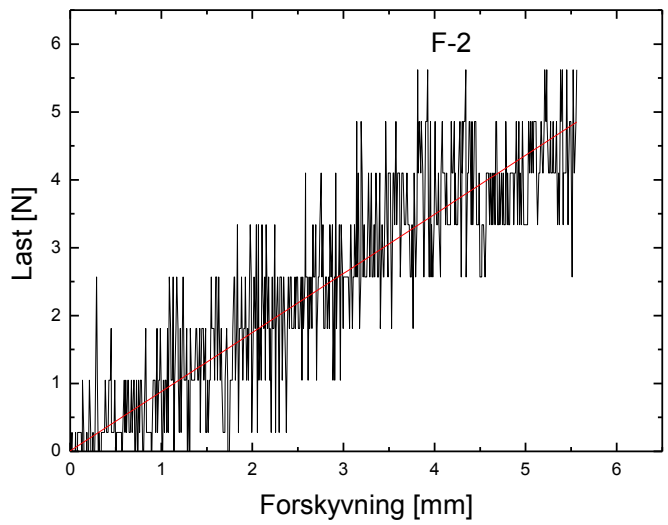
Figur 27: Brudd-test, wafer fra produsent E, prøve 1.



Figur 28: Brudd-test, wafer fra produsent E, prøve 2.

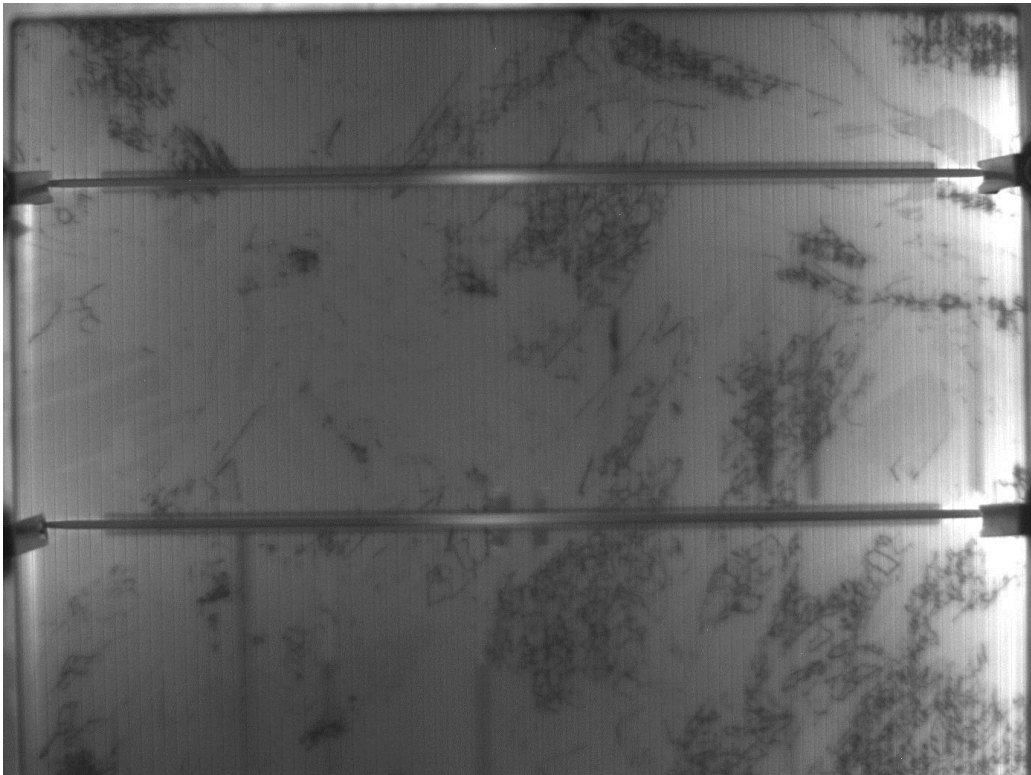


Figur 29: Brudd-test, wafer fra produsent F, prøve 1.



Figur 30: Brudd-test, wafer fra produsent F, prøve 2.

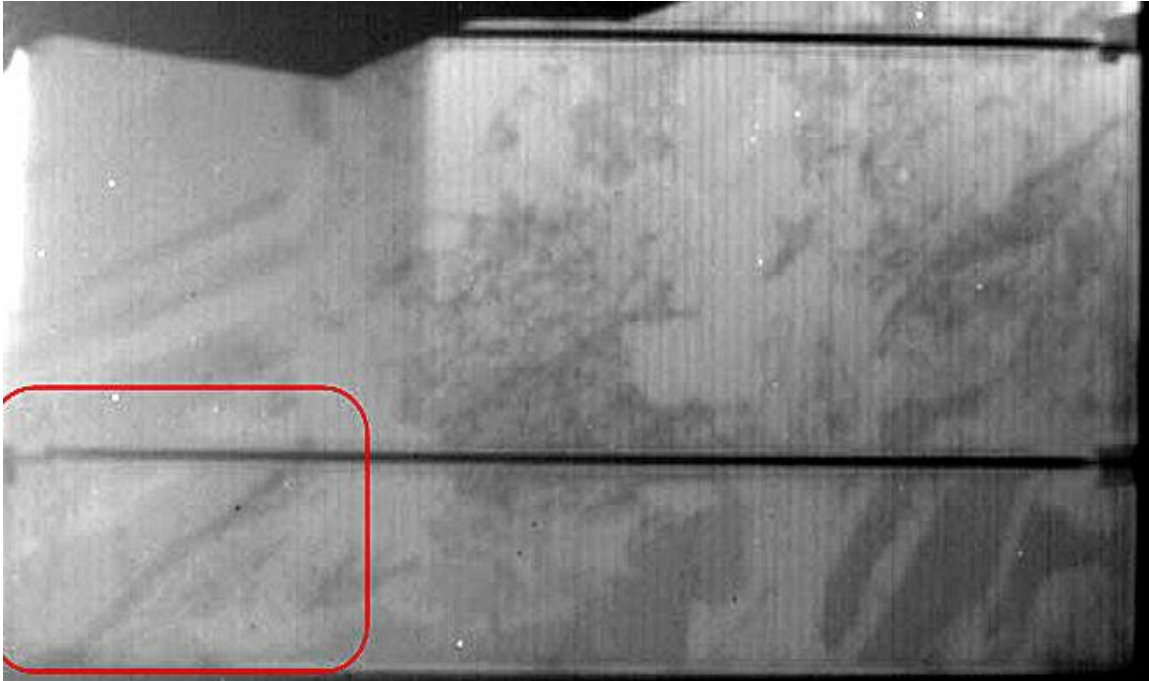
Vedlegg 4: Elektroluminescens bilder



Figur 31: EL bilde før testing.

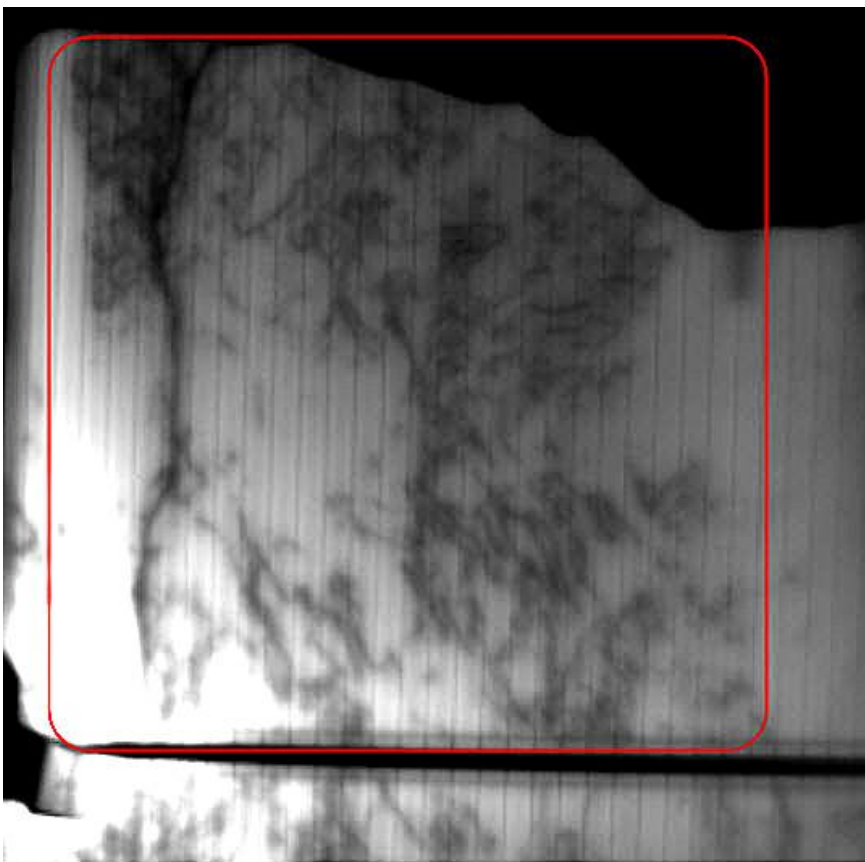


Figur 32: EL bilde før testing.



Figur 33: EL bilde etter testing.

Figur 33: EL bilde etter testing.



Figur 34: EL bilde etter testing.