
Vermessung von Siliziumsensoren für das Upgrade des CMS-Detektors

Electrical measurements of silicon sensors
for the upgrade of the CMS detector

Bachelorarbeit der Physik

an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus

Fakultät 1
Institut für Physik und Chemie

1. Gutachter: Prof. Dr. Wolfgang Lohmann

2. Gutachter: Prof. Dr. Götz Seibold

Eingereicht von:

Martin Stegler
Matrikelnummer: 2092540



Zusammenfassung

Aufgrund des Upgrades am LHC (2020-2022), bei dem die Luminosität auf über $5 \cdot 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ erhöht wird, ist am CMS-Tracker eine weit höhere Strahlenbelastung als bisher zu erwarten. Daher werden strahlungshärtere Sensoren benötigt. Aus diesem Grund werden im Rahmen der Hamamatsu-Photonics-KK-Kampagne unter anderem Mpix-Sensoren untersucht. Des Weiteren werden sie auf ihre Materialeigenschaften geprüft, indem sie vor und nach der Bestrahlung charakterisiert werden. Außerdem wird die optimale Geometrie gesucht. Diese Arbeit untersucht zwei Substrattypen derselben Dicke mit zwei Isolationsmechanismen. Dabei wird auch der Einfluss der Geometrie und unterschiedlicher Biasstrukturen berücksichtigt, um Schlüsse auf die Strahlungshärte zu ziehen.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	4
1.1	Der Large Hadron Collider	4
1.2	Das Compact Muon Solenoid Experiment (CMS)	5
1.3	Die Eigenschaften von Silizium	6
1.4	Der Siliziumsensor	7
1.5	Die Hamamatsu-Photonics-K.K.-Kampagne	9
2	Die Messaufbauten und ihre Ziele	12
2.1	Die Messgeräte	12
2.2	CVBias - die Biasringkapazität	13
2.3	IVBias - der Leckstrom	13
2.4	Cint - die Zwischenpixelkapazität	14
2.5	Rint - der Zwischenpixelwiderstand	15
2.6	IVPixel - der Leckstrom eines Pixels	16
2.7	CVPixel - die Kapazität eines Pixels zur Rückseite	16
2.8	Rbias - der Biaswiderstand	17
	2.8.1 Polysiliziumwiderstände	17
	2.8.2 Punch-Through Strukturen	18
3	Auswertung	18
3.1	Messungen unbestrahlter Sensoren bei 22°C	18
	3.1.1 Kapazitätsmessungen	18
	3.1.2 Strommessung	20
	3.1.3 Widerstände	21
3.2	Gekühlte Messungen (-20°C) im Vergleich zu Raumtemperaturmessungen (22°C)	21
	3.2.1 Kapazitätsmessungen	21
	3.2.2 Strommessungen	22
	3.2.3 Widerstände	23
3.3	Bestrahlte Proben (-20°C) und der Vergleich zu den gekühlten Messungen (-20°C)	23
	3.3.1 Kapazitätsmessungen	23
	3.3.2 Strommessungen	24
	3.3.3 Widerstände	24
4	Ergebnisse	25
5	Ein Uploadprogramm	26
5.1	Konzept	26
5.2	Oberfläche und Verwendung	26
5.3	Implementierung	27
6	Referenzen und Verzeichnisse	28
7	Danksagung	32
8	Anhang	33

1 Motivation

1.1 Der Large Hadron Collider

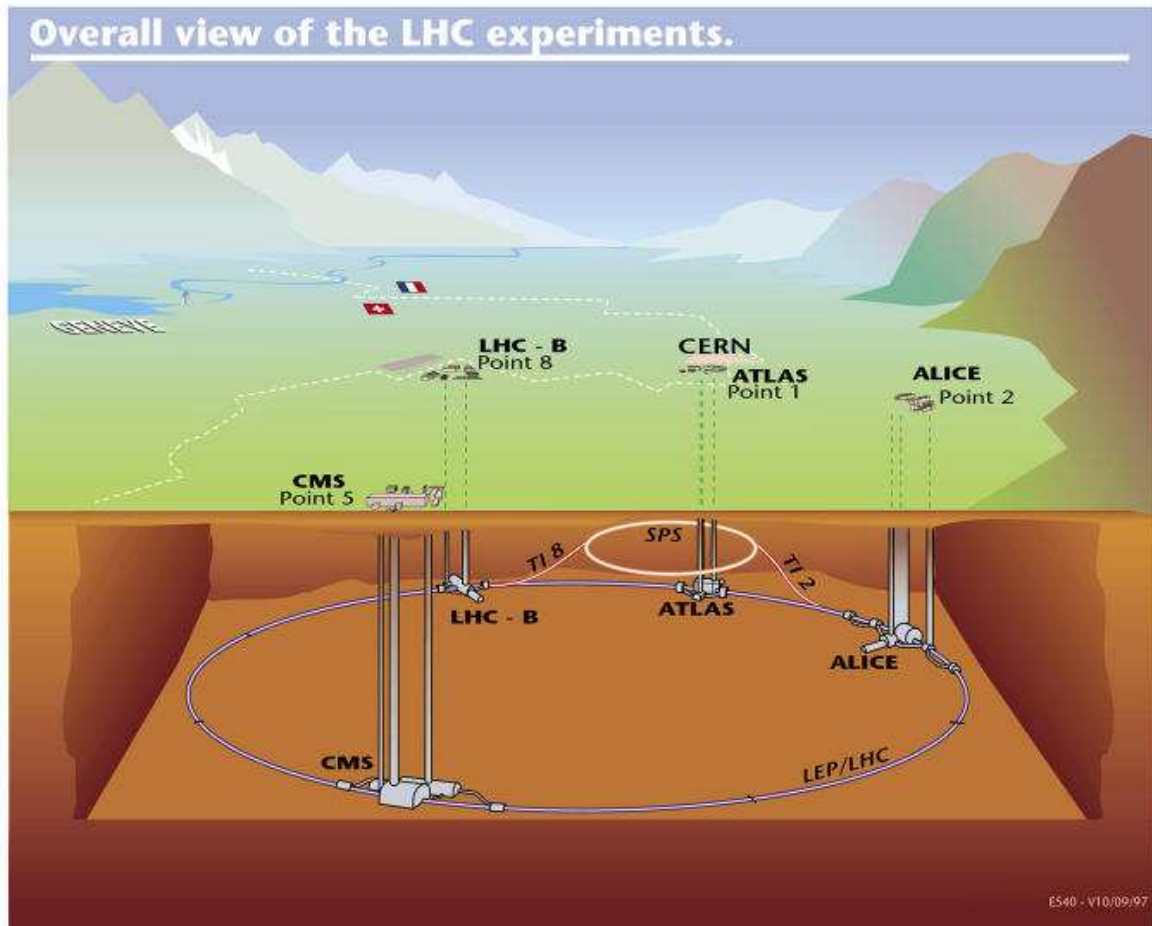


Abbildung 1.1: Der LHC am CERN mit den vier Experimenten CMS, LHC-b, ATLAS und ALICE [CER99]

Der Large Hadron Collider (LHC) ist ein ringförmiger Teilchenbeschleuniger, welcher sich am Europäischen Kernforschungszentrum CERN bei Genf befindet. Der gesamte Ring liegt etwa 100 m unter dem Erdboden und hat einen Umfang von rund 27 km. Mit Hilfe von Vorbeschleunigern werden Protonenpakete oder Schwerionen-Pakete beschleunigt (Protonen auf 450 GeV). Anschließend werden diese Pakete in den LHC eingespeist und auf weiter beschleunigt. Geplant ist eine Schwerpunktsenergie von 14 TeV zu erreichen (zurzeit 8 TeV). Die Strahlen haben eine Luminosität von $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. An vier Orten im Ring kreuzen sich die Bahnen der Protonen oder Ionen, so dass es zur Kollision der Pakete kommt. Die daraus entstehenden Wechselwirkungsprodukte werden anschließend in den Experimenten nachgewiesen. Ihre Bahn und ihr Impuls werden gemessen. Die vier Experimente sind CMS, LHC-b, ALICE und ATLAS.

Das Hauptziel des CMS ist die Suche nach dem Higgs-Boson. Dazu ist eine große Anzahl von Kollisionen notwendig, die in den Detektoren registriert werden. Des Weiteren ist man auf der Suche nach Teilchen, welche über das Standardmodell der Elementarteilchenphysik hinaus gehen, wie zum Beispiel Teilchen der Supersymmetrie und neuen massive Vektorbosonen. Am 04.07.2012 wurde die Entdeckung eines Teilchens bekannt gegeben, bei dem es sich um das gesuchte Higgs-Boson handeln könnte. Um das zu bestätigen, sind weitere Messungen nötig.

1.2 Das Compact Muon Solenoid Experiment (CMS)

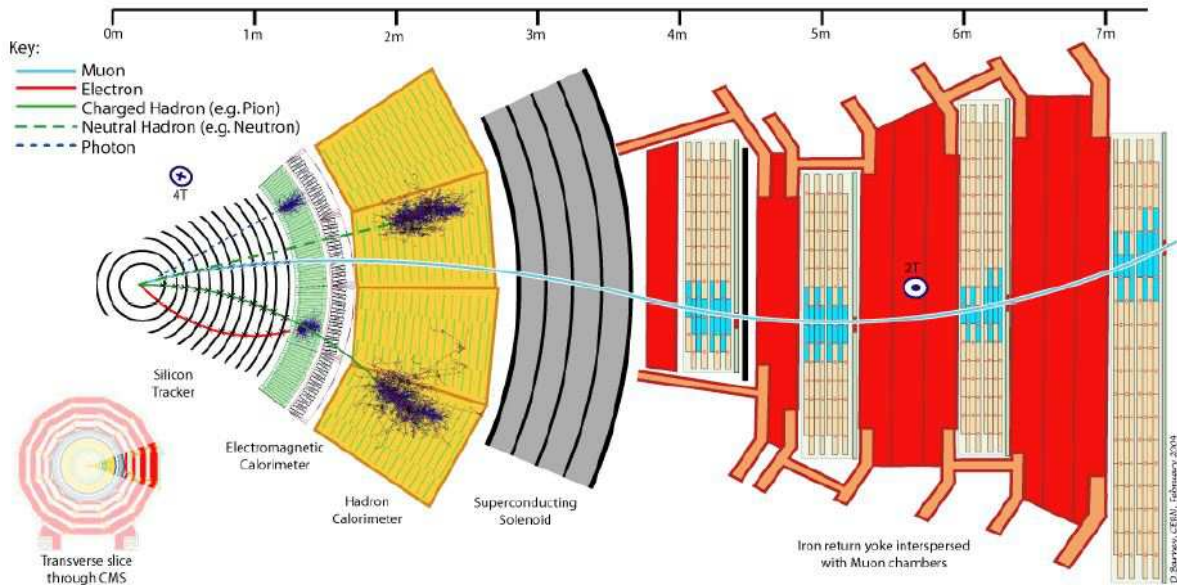


Abbildung 1.2: CMS-Detektor im Querschnitt - es sind die Bahnen unterschiedlicher Teilchen verzeichnet [Col08]

Der CMS Detektor (Abbildung 1.2) dient zur Vermessung der Kollisionsprodukte der Wechselwirkung von hoch-energetischen Protonen oder Ionen. Hierbei sollen sowohl Impuls als auch Energie jedes Teilchens bestimmt werden. Um die nötigen Größen der Zerfallsprodukte messen zu können, besteht der Detektor aus mehreren Komponenten. Von innen nach außen besteht der CMS-Detektor aus:

- Einem zylindrischen Silizium Spurdetektor zur Bahnbestimmung aller geladenen Teilchen, bestehend aus
 - einem Silizium-Pixeldetektor ($r = 4 \text{ cm}, 7 \text{ cm}, 11 \text{ cm}$)
 - einem Silizium-Streifendetektor ($22 \text{ cm} < r < 110 \text{ cm}$)
- Einem elektromagnetischen Kalorimeter aus Bleiwolframat-Kristallen zur Messung der Energie von Photonen und Elektronen
- Einem hadronischen Sandwich-Kalorimeter, welches abwechselnd aus Messing-Platten und Lagen von Szintillatoren besteht, um die Energie von Hadronen wie zum Beispiel Protonen und Pionen messen zu können.
- Einem supraleitenden Solenoid Magneten, zur Erzeugung des 4 T starken Magnetfeldes parallel zum Protonenstrahl
- Myon-Kammern, welche sich im Eisenjoch der Magnetspule befinden, um Myonen zu detektieren.

Die Streifensensoren unterscheiden sich von den Pixelsensoren in ihrer Geometrie. Die Pixelsensoren benötigen eine höhere Ortsauflösung als die Streifensensoren, da sie sich näher am Wechselwirkungspunkt befinden.

1.3 Die Eigenschaften von Silizium

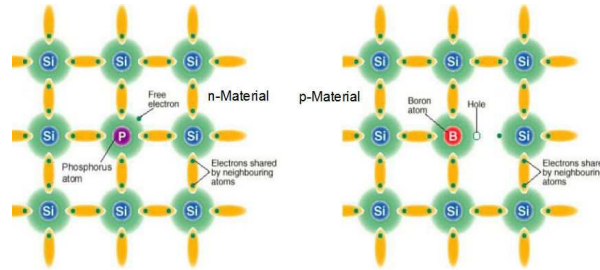


Abbildung 1.3: Dotierung mittels Phosphor und Bor - die Fremdatome nehmen Gitterplätze ein und führen so zu einem Elektron- oder Löcherüberschuss[Dra10]

Silizium ist ein Halbleiter mit einer Bandlücke von 1,12 eV bei Raumtemperatur. Das bedeutet, dass Ladungsträger aus dem Valenzband in das Leitungsband gehoben werden können. Bringt man in diesen Halbleiter Fremdatome (wie Phosphor oder Bor bei Silizium) ein, so besetzen sie dort Gitterplätze des Siliziums. Dabei werden sie entweder als Elektronendonator (Phosphor gibt ein Elektron ab, erzeugt ein freies Elektron) oder Elektronakzeptor (Bor nimmt ein Elektron auf, erzeugt ein freies Loch) fungieren (siehe Abbildung 1.3). Im Falle eines Elektronenüberschusses sprechen wir von einem n-dotierten Kristall, bei einem Löcherüberschuss von einem p-dotierten. Bei Kontakt eines n-dotierten und eines p-dotierten Kristalls bildet sich ein pn-Übergang. An der Kontaktfläche werden Elektronen und Löcher, die aufgrund der Diffusion in die p- und n-dotierte Region wandern, rekombinieren. Sie lassen die Ladung der Dotierionen zurück. Diese ist der Ladung der Majoritätsträger (n-Kristall Elektronen, p-Kristall Löcher) entgegengesetzt. Die resultierende Spannung zwischen den beiden Kristallen nennt man Feldspannung, welche im Gleichgewicht der Diffusionsspannung entspricht. So entsteht ein Potentialwall in der Höhe der Diffusionsspannung, welcher eine Drift hervorruft. Der Driftstrom ist dem Diffusionsstrom entgegengesetzt und im Gleichgewicht betragsgleich. Legt man nun eine Spannung V in Sperrrichtung an (+ am n-Kristall, - am p-Kristall), verstärkt man den Driftstrom, indem man den Potentialwall erhöht. Somit werden alle freien Ladungsträger aus der Raumladungszone herausgezogen. Der Bereich verarmt. Für den Strom J gilt[Sze01]:

$$J = J_s \left(e^{eV/kT} - 1 \right), \quad J_s : \text{Sättigungsstrom}$$

T : Temperatur
 k : Boltzmannkonstante
 e : Elementarladung

Im Fall, dass die p-Dotierung viel schwächer als die n-Dotierung ist, gilt für die Weite der Raumladungszone W [Mol99]:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon}{eN_D} \cdot (U_D - V)}, \quad \epsilon : \text{Dielektrizitätskonstante}$$

U_D : Diffusionsspannung
 N_D : Donorkonzentration im n-dotierten Gebiet

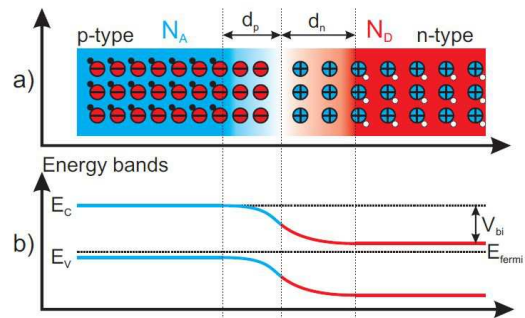


Abbildung 1.4: Der pn-Übergang - in a) ist die Bildung der Raumladungszone am kristall dargestellt und in b) am Bändermodell[Dra10]

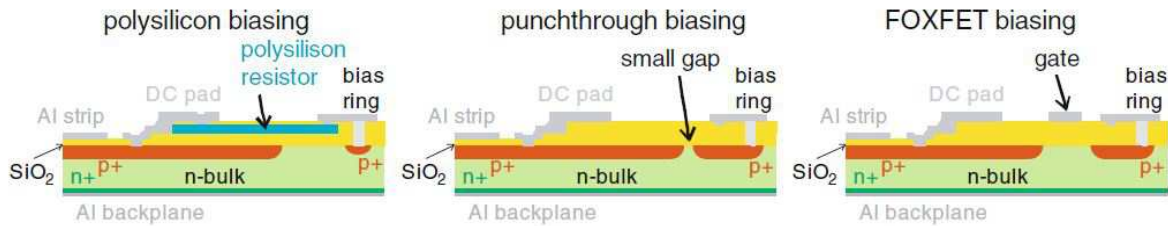


Abbildung 1.6: Die drei gängigsten Arten von Biaswiderständen - Polysiliziumwiderstände sind strahlungshärter, aber schwerer zu realisieren als Punch-Through- und FOXFET-Strukturen[Har09]

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, einen Biaswiderstand technisch zu realisieren. Das Einfachste ist ein Polysiliziumwiderstand. Da hier der Wert des Widerstandes proportional mit der Länge zunimmt, wird dieser entweder wie in Abbildung 1.5 zusammengefaltet oder um das Pixel "gewickelt". Eine weitere Möglichkeit ist das "Punch-Through biasing". Hierbei wird der Abstand zwischen Biasring und Pixel gering gehalten. Die Grenzschicht am Oxid in der Lücke zwischen Biasring und Pixel kann als "floating" Gate angenommen werden. So sieht man, dass das Ausbilden eines leitenden Kanals von Feldeffekten, ähnlich wie bei einer MOSFET-Struktur, bestimmt wird. Der Unterschied zum MOSFET ist, dass hier das Gate als gekoppelter Kondensator auf die angelegten Spannungen reagiert. Die dritte (in Abbildung 1.6) dargestellte Art ist die Möglichkeit einer FOXFET-Struktur. Hier kann, wie bei einem MOSFET, mit einer Spannung am Gate eine Inversion an der Oberfläche des Siliziumoxids zwischen Pixel und Biasring erzeugt werden, so dass es zum Stromfluss kommt. Eine weitere Möglichkeit wäre das Gate der FOXFET-Struktur mit dem Drain über dem Biasring kurzzuschließen. Dieses funktioniert wie eine einfache MOSFET-Struktur. Der einzige Unterschied ist, dass hier das Gate über den Biasring kurzgeschlossen wird. Der Polysiliziumwiderstand ist strahlungshärter als der Punch-Through-Widerstand, dafür aber auch aufwendiger herzustellen, da weitere Prozessschritte notwendig sind [Har09].

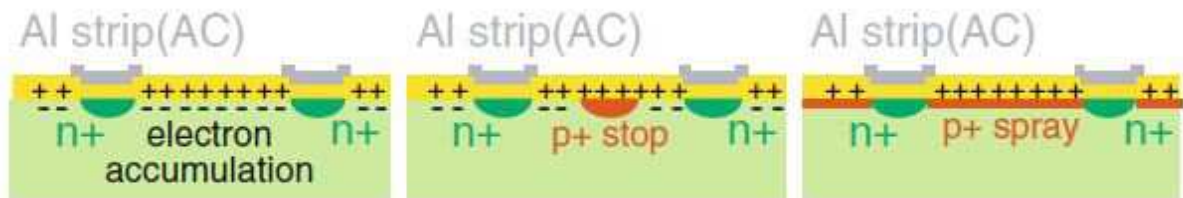


Abbildung 1.7: Schematische Darstellung von p-Spray und p-Stop Isolierungen bei einem n-in-p Sensor, um die Pixel voneinander zu trennen[Har09]

Um bei gegebener Geometry der Pixel die maximale Ortsauflösung zu erreichen, muss man den Abstand zwischen den Pixeln klein halten. Damit diese sich dann aber nicht gegenseitig beeinflussen, ist es bei n-in-p Sensoren nötig, diese voneinander zu trennen in dem man hochdotierte Bereiche dazwischen bringt.

An der Kontaktfläche zwischen Substrat und Oxid treten Defekte auf, welche zu einer positiven Oberflächenladung des Oxids führen. Deshalb werden sich freie Elektronen aus dem Substrat an der Oberfläche ansammeln und dort für eine Inversion sorgen. Um das zu verhindern, existieren zwei Methoden. Zum einen das p-Spray und zum anderen das p-Stop. Bei p-Stop wird ein schmaler Bereich p+ implantiert. Die Inversion findet zwischen dem Implantat und den Streifen nachwievor statt, es kann sich jedoch kein durchgängig leitender Kanal ausbilden. Bei p-Spray wird zwischen Oxid und Substrat eine Schicht p+ aufgedampft. Dadurch findet keine Inversion statt. Der Unterschied wird deutlich in Abusbildung 1.7.

Der Sensor wird vollständig verarmt, wenn man eine ausreichend hohe Spannung zwischen Backplane und Biasring anlegt. Die Depletions- oder Verarmungsspannung errechnet sich für die vollständige Verarmung wie folgt [Har09]:

$$V_{Depl} = \frac{D^2}{2\epsilon\mu\rho}$$

Hierbei ist D die Dicke des Sensors, ρ die Leitfähigkeit [$k\Omega/cm$] und μ die Beweglichkeit [cm^2/Vs].

Wenn nun ein ionisierendes Teilchen den Sensor passiert, werden Elektron-Lochpaare entlang seiner Bahn, durch elektromagnetische Wechselwirkung, erzeugt. Diese werden aufgrund des elektrischen Feldes sofort auseinander gezogen. Eines wird zur Backplane gezogen und das andere zum nächsten Pixel aufgrund ihrer jeweiligen Ladung. So kann man einen Strom an bestimmten Pixeln messen und erhält ein Signal. Dünne Sensoren sind leichter zu verarmen (niedrigere Spannungen) als dicke und streuen passierende ionisierende Teilchen weniger. Allerdings werden weniger Ladungsträger erzeugt, wenn ein ionisierendes Teilchen den Sensor passiert. Das senkt das Signal-Rausch-Verhältnis. Des Weiteren spielt der "Pitch" (Abstand zwischen zwei Pixeln) eine Rolle. Für eine hohe Ortsauflösung empfiehlt es sich den Abstand zwischen den Pixeln möglichst klein zu wählen, jedoch verteilt sich dann das schwache Signal auf mehrere Pixel, sodass das Signal-Rausch-Verhältnis sinkt. Selbes gilt für die Pixellänge. Die Ortsmessgenauigkeit $\sigma \propto \frac{pitch}{Signal/Rauschen}$ [Har09]. Für eine hohe Ortsmessgenauigkeit ist ein großes Signal-Rausch-Verhältnis notwendig.

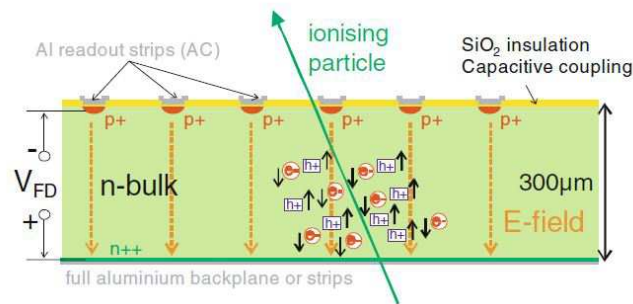


Abbildung 1.8: Darstellung eines ionisierenden Partikels, welches einen Siliziumsensors passiert [Har09]

1.5 Die Hamamatsu-Photonics-K.K.-Kampagne

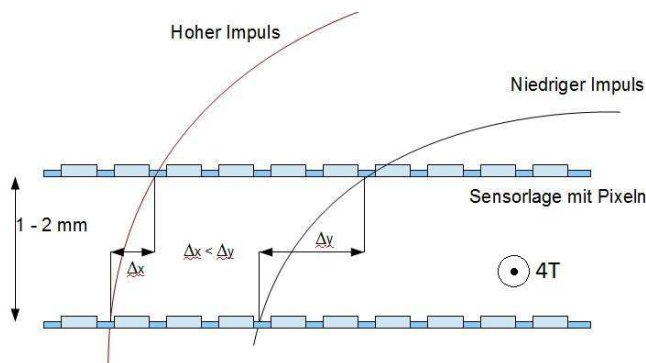


Abbildung 1.9: Selbsttriggerndes Modul - die Bahnkurve des Teilchens mit dem höheren Impuls hat einen größeren Radius und daher bei aufeinanderfolgenden Sensorlagen einen geringeren Pixelversatz als ein Teilchen mit niedrigerem Impuls

Es ist geplant, die Luminosität des LHC 2020-2022 um den Faktor Fünf zu erhöhen. Aus diesem Grund werden strahlungshärtere Sensoren benötigt. Des Weiteren ist die Datenrate aufgrund der gegenwärtigen maximalen Verarbeitungsrate der Trigger begrenzt. Deshalb möchte man selbsttriggernde Module bauen. Diese selektieren Ereignisse mit großem Impuls. Teilchen mit kleinem Impuls werden im Magnetfeld aufgrund der Lorentzkraft stärker abgelenkt und werden in einer zweiten Lage Sensoren mit einigen Pixeln Versatz registriert werden (Abbildung 1.9). Aufgezeichnet werden nur Ereignisse mit kleinen Versatz. Diese enthalten Spuren mit großem Impuls, welche z.B. vom Zerfall neuer schwerer Teilchen stammen. Deshalb hat man zum Upgrade des CMS-Spurdetektors eine Kampagne ins Leben gerufen, welche Sensorstrukturen verschiedener Herstellungsverfahren, Geometrien und Substrattypen charakterisiert und bewertet, um den optimalen Sensortyp für den zukünftigen CMS-Tracker zu bestimmen.

Als Hersteller wurde Hamamatsu gewählt. Untersucht werden drei verschiedene Herstellungsverfahren:

- Floatzone(FZ)
- Magnetic-Czochalski(MCz)
- Epitaxial(Epi)

mit jeweils drei verschiedene Substrattypen:

- p-in-n (N-type)
- n-in-p (p-Stop) (P-type)
- n-in-p (p-Spray) (Y-type)

in jeweils verschiedenen Dicken. Somit ergeben sich 158 verschiedene Wafer (siehe Tabelle 1.1), welche charakterisiert, bestrahlt und anschließend wieder charakterisiert werden [Ber11].

	FZ 200 μm^*	FZ 200 μm	FZ 320 μm	FZ 120 μm^*	FZ 120 μm	MCz 200	Epi 100 μm	Epi 50 μm
p-in-n	6	6	6	6	6	6	6	6
n-in-p (p-Stop)	6	6	6	6	6	6	6	6
n-in-p (p-Spray)	6	4	6	6	4	6	6	6
2'nd metal p-in-n	6	* Physikalische Dicke 320 μm , aktive Dicke durch Tiefendiffusion reduziert						
2'nd metal n-in-p (p-Stop)	6							
2'nd metal n-in-p (p-Spray)	6							

Tabelle 1.1: Wafereigenschaften und Stückzahlen in der Hamamatsu-Photonics-K.K.-Kampagne

An dieser Kampagne sind gegenwärtig 13 Institute beteiligt (u.a. CERN und DESY). Die Ziele der Kampagne sind:

- Identifizieren der besten Technologie für das CMS Tracker Upgrade-Phase II und im Rahmen dessen
 - Untersuchung der aufgeführten Substratmaterialien und der verschiedenen Sensortechnologien auf ihre Nachweiseigenschaften und auf ihre Strahlungsfestigkeit
 - Entwicklung eines Modulkonzepts für den ausgewählten Sensortyp

Jeder Wafer ist in verschiedene Strukturen aufgeteilt. Der Multigeometrie-Pixelsensor, welcher hier untersucht wird, ist in Abbildung 1.10 orange dargestellt. Im Folgenden wird das Namensschema (z.B. M320Y-04-Mpix-2) erklärt. Die

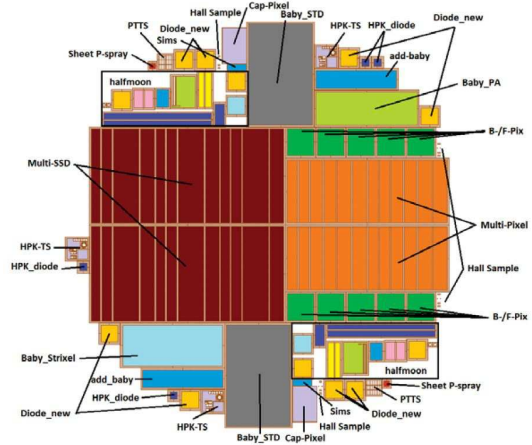


Abbildung 1.10: Waferaufteilung der Hamamatsukampagne - orange Bereiche stellen 2 Multipixel-Strukturen dar [CTCi]

ersten Buchstaben stehen für das Herstellungsverfahren “FZ” steht für Floatzone, “M” für Magnetic-Czochalski und “E” für Epitaxial. Die Zahlen im Anschluss geben die Dicke des Sensors in μm an. Das Substrat wird anschließend mit “N” für p-in-n, mit “P” für n-in-p mit “p-Stop” und “Y” für n-in-p mit “p-Spray” bezeichnet. Damit ist der Wafer bezeichnet und es folgt die Wafernummer. “Mpix” steht für “Multigeometry”-Pixel und die letzte Zahl gibt an, um welchen der beiden Sensoren auf dem Wafer es sich handelt.

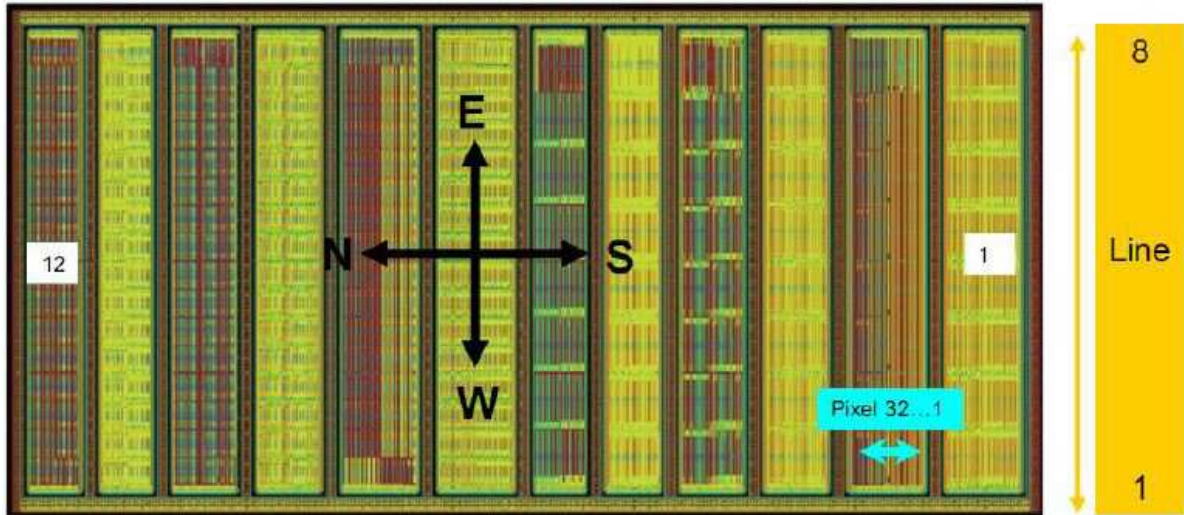


Abbildung 1.11: Aufbau einer Mpix-Sensors aus 12 Regionen mit 3 verschiedenen Pixel-Pixel-Abständen, 2 verschiedenen Pixellängen und 2 verschiedenen Biaswiderständen. Eine Region besteht, je nach Länge der Pixel, aus 8 oder 16 Pixelreihen mit jeweils 32 Pixeln.

Ein Sensor (Abbildung 1.11) umfasst zwölf Regionen, die sich in ihrer Geometrie unterscheiden. Diese Unterschiede sind in Tabelle 1.2 aufgelistet.

Eigenschaften/Regionen	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Pixelraster [μm]	120	120	100	100	80	80	120	120	100	100	80	80
Pixelbreite (Si) [μm]	28	28	23	23	18	18	28	28	23	23	18	18
Pixelbreite (Al) [μm]	41	41	36	36	31	31	41	41	36	36	31	31
Pixellänge (Al) [μm]	2421	2421	2421	2421	2421	2421	1171	1171	1171	1171	1171	1171
Biaswiderstand	PT	Poly	PT	Poly	PT	Poly	PT	Poly	PT	Poly	PT	Poly

Tabelle 1.2: Eigenschaften der einzelnen Regionen auf einer Multipixelstruktur

PT: Punch-Through Struktur

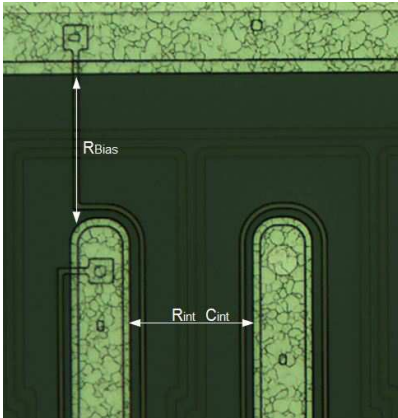
Poly: Polysiliziumwiderstand

Im Rahmen dieser Kampagne wurden die Sensoren vor und nach der Bestrahlung vermessen und die Resultate verglichen. Die Protonenbestrahlung fand am KIT in Karlsruhe und die Neutronenbestrahlung in Ljubljana statt. In dieser Arbeit werden Sensoren untersucht, die mit einer Dosis bestrahlt wurden, welche der erwarteten Dosis im Abstandes von 20 cm vom Wechselwirkungspunkt nach 10 Betriebsjahren am LHC, entspricht.

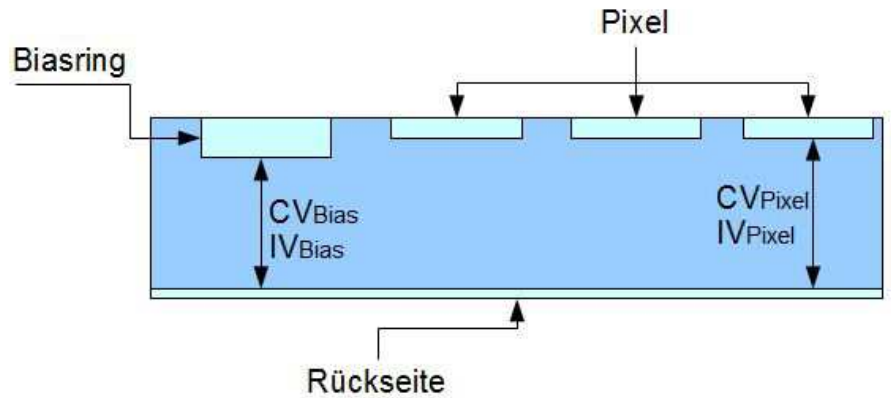
Radius [cm]	Protonen [$10^{14} n_{eq} \cdot \text{cm}^{-2}$]	Neutronen [$10^{14} n_{eq} \cdot \text{cm}^{-2}$]	Summe [$10^{14} n_{eq} \cdot \text{cm}^{-2}$]	Verhältnis $\frac{P}{N}$
5	130	10	140	13
10	30	7	37	4,3
15	15	6	21	2,5
20	10	5	15	2
40	3	4	7	0,75

Tabelle 1.3: Bestrahlungspläne für die Teststrukturen anhand von Simulationen für den zukünftigen Detektor in Abhängigkeit des Abstands (Radius) zum Wechselwirkungspunkt

2 Die Messaufbauten und ihre Ziele



(a) Ausschnitt aus einer Sensorregion nahe dem Biasring. Die Pixel sind über einen Polysiliziumwiderstand mit dem Biasring verbunden - zwischen den Pixeln wird R_{int} sowie C_{int} gemessen und zwischen Biasring und einem Pixel der Biaswiderstand bestimmt



(b) Schematische Querschnittsdarstellung eines Mpix-Sensors - zwischen Biasring und Rückseite wird CV_{Bias} und IV_{Bias} gemessen, sowie zwischen Pixel und Rückseite IV_{Pixel} und CV_{Pixel}

Abbildung 2.1: Darstellung der zu messenden Größen

2.1 Die Messgeräte



Abbildung 2.2: Die Probestation

Als Spannungsquellen wurden Keithleys (Typ 2410) verwendet [KI02]. Der Fehler der Spannung ist 0,01 % der Sollspannung plus 1 mV.

Als Strommessgerät wurden Keithleys (Typ 6485) verwendet [KI03].

Als LCR-Meter wurde das Agilent (Typ E4981A) verwendet [Tec08].

Die Messungen fanden alle an der vollautomatischen Probestation statt (Abbildung 2.2), in der der Sensor mit Nadeln kontaktiert wird. Verschiebungen zwischen Pixeln sind automatisiert.

2.2 CVBias - die Biasringkapazität

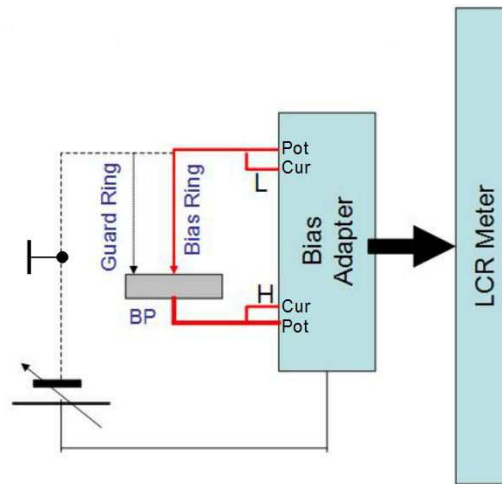


Abbildung 2.3: Schaltplan zur Bestimmung der Biasringkapazität - am LCR-Meter wird die Kapazität zwischen Biasring und Rückseite (BP - Backplane) in Abhängigkeit der Versorgungsspannung gemessen. Die Wechselspannung wird über den Biasadapter auf die Verarmungsspannung moduliert.

Mit einer regelbaren Spannungsquelle wird der Sensor zunehmend verarmt. Vor jeder Messung wird eine "open correction" durchgeführt. Diese Untergrundkorrektur berichtigt die Messung durch Abzug aller zusätzlichen Kapazitäten (von Kabeln, dem Biasadapter usw.). Zwischen Biasring und Rückseite wird mit Hilfe eines LCR-Meters die Kapazität gemessen. Der Biasadapter hat keine Auswirkung auf die Messergebnisse, da die zusätzlichen Kapazitäten mit der "open correction" korrigiert wurden. Der Adapter schützt das LCR-Meter vor hohen Gleichspannungen. Der Verlauf der Kapazitäts-Spannungs-Kurve (siehe 3.6) ist mit zunehmender Verarmung bei steigender Spannung zu erklären. Ist der Sensor vollständig verarmt bleibt die Kapazität konstant. Aus dieser Messung lässt sich die Verarmungsspannung berechnen, indem man das Reziproke des Quadrats der Kapazität $1/C^2$ als Funktion der Spannung darstellt und von zwei linearen Fits den Schnittpunkt bestimmt (siehe Abbildung 3.2). Alle Kapazitäten wurden mit einer Frequenz von 1 MHz aufgenommen um nur die kapazitiven Anteile zu messen.

2.3 IVBias - der Leckstrom

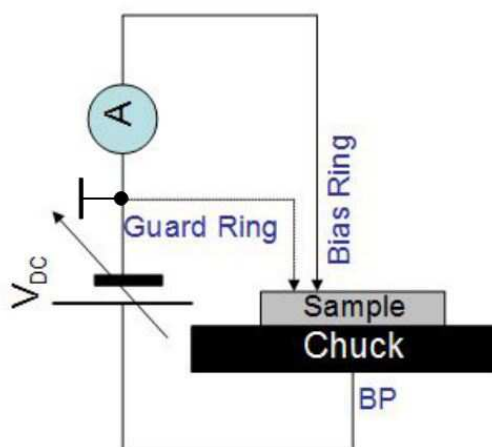


Abbildung 2.4: Schaltplan zur Bestimmung des Leckstroms in Abhängigkeit der Spannung zwischen Rückseite und Biasring.

Der Sensor wird zunehmend verarmt und der Stromfluss zwischen der Rückseite und der Sensoroberfläche gemessen. Der Leckstrom ist ein Maß für die Verlustleistung. Ein hoher Leckstrom erzeugt höheres Schrotrauschen, sodass das Signal-Rausch-Verhältnis sinkt [Har09]. Diese Messung dient des Weiteren zum Erklären von Untergrundströmen bei den Widerstandsbestimmungen.

2.4 C_{int} - die Zwischenpixelkapazität

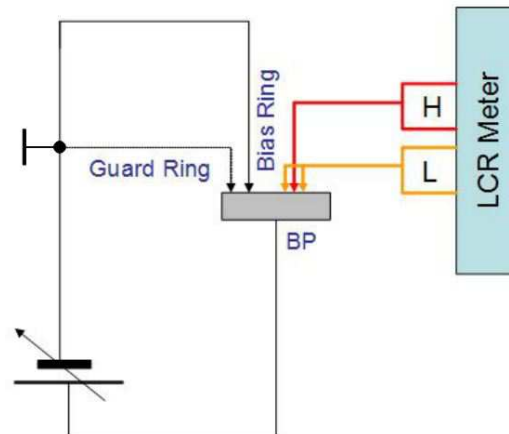


Abbildung 2.5: Schaltplan zur Bestimmung der Zwischenpixelkapazität - mit einem LCR-Meter wird die Kapazität zwischen einem Pixel und seinen Nachbarn gemessen in Abhängigkeit der Versorgungsspannung.

Zwischen Biasring und Rückseite (BP) wird mit einer regelbaren Spannungsquelle der Sensor zunehmend verarmt, und die Kapazität zwischen einem Pixel und seinen Nachbarn gemessen. Ist die Kapazität zwischen den Pixeln hoch, so wird ein gebildetes Ladungspaar besser getrennt, allerdings kommt es zur kapazitiven Kopplung mit den benachbarten Pixeln. Ist die Zwischenpixelkapazität größer als der Kopplungskondensator der Ausleseelektronik, sammeln sich freigesetzte Ladungen am "Zwischenpixelkondensator" und fließen nicht in die Ausleseelektronik. So ergibt sich ein Richtwert von 1 pF je cm bei einem Verhältnis von Zwischenpixelkapazität zu Kopplungskapazität von 1 zu 20 [Har09]. Da für die Kapazität $C = \epsilon \frac{A}{d}$ gilt, werden Pixelabstand und Pixellänge direkt Einfluss nehmen. Auch ob es sich um p-Spray oder p-Stop handelt sollte zu Unterschieden führen, da sich die effektive Dielektrizitätskonstante zwischen den Pixeln ändert.

2.5 R_{int} - der Zwischenpixelwiderstand

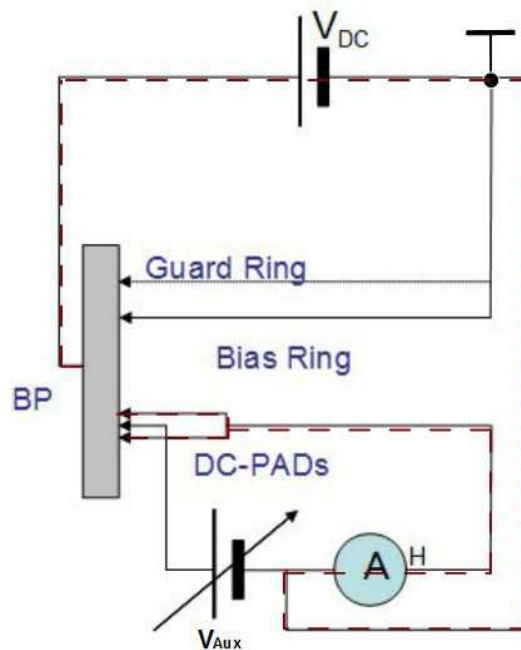


Abbildung 2.6: Schaltplan zur Bestimmung des Zwischenpixelwiderstandes - mit einem Amperemeter wird der Strom von einem Pixel zu seinen Nachbarn in Abhängigkeit der Spannung zwischen ihnen bei vollständiger Verarmung des Sensors gemessen. V_{Aux} ist bipolar.

Ein Stromkreis zwischen Rückseite (BP - Backplane) und Biasring sorgt für die Verarmung des Sensors. Dabei wird eine Spannung von 500 V verwendet, da so die vollständige Verarmung gewährleistet wird. Die Messung der IV-Kurve (IV - Strom in Abhängigkeit der Spannung) findet zwischen einem Pixel und seinen zwei Nachbarn statt. So wird an der regelbaren Spannungsquelle die Spannung V_{Aux} von -2,5 V bis 2,5 V variiert und mit einem Amperemeter der Strom gemessen. Die Massen beider Stromkreise werden zusammengeschaltet, somit wird die IV-Kurve um den Untergrund (Leckstrom) von zwei Pixeln angehoben (rote Masche Abbildung 2.6). Es sind Unterschiede zwischen den p-Stop- und p-Spray-Strukturen zu erwarten. Ein sehr hoher Widerstand ist für die Funktion als Sensor essentiell. Wenn der Widerstand zu gering ist, verschwimmt die Ortsauflösung, da die von einem ionisierenden Teilchen erzeugten Ladungen nicht ausschliesslich zu einem Pixel gezogen werden, sondern auch zu seinen Nachbarn.

2.6 IVPixel - der Leckstrom eines Pixels

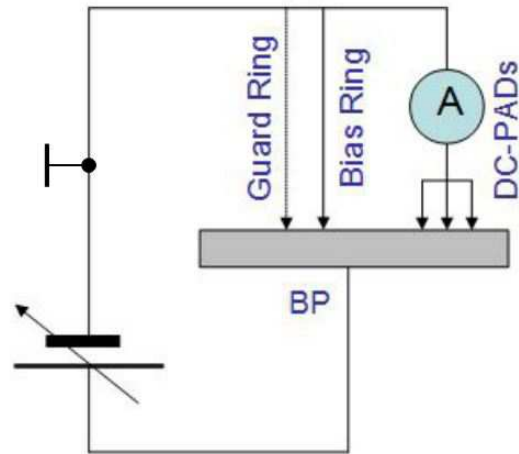


Abbildung 2.7: Die Dunkelstrommessung zwischen drei Pixeln und der Rückseite in Abhängigkeit der Versorgungsspannung

In dieser Messung wird der Dunkelstrom eines Pixels gemessen. Die Messung wird an drei Pixeln durchgeführt, da der Leckstrom an einem Pixel sehr gering ist. Es wird das selbe Ergebnis wie in Messung 2.3 erwartet, da es sich um die gleiche Messung wie in 2.3 handelt, nur an 3 Pixeln statt an der gesamten Region. Daher wird der Strom um einen bestimmten Faktor geringer sein als der Strom zwischen Biasring und Rückseite.

2.7 CVPixel - die Kapazität eines Pixels zur Rückseite

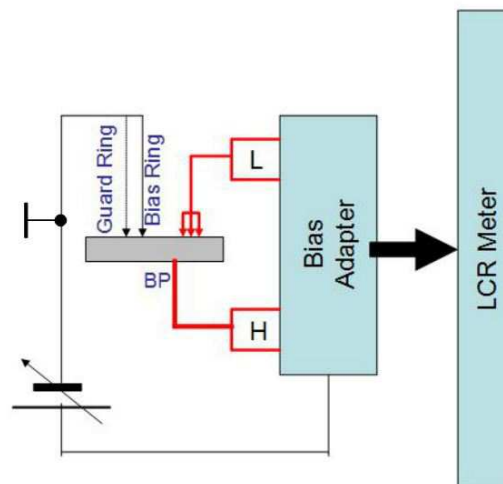


Abbildung 2.8: Schaltplan zur Bestimmung der Kapazität zwischen einem Pixel und der Rückseite - am LCR-Meter wird die Kapazität zwischen drei Pixeln und der Rückseite (BP) in Abhängigkeit von der Versorgungsspannung gemessen.

Hier wird die Kapazität zwischen einem Pixel und der Rückseite bei zunehmender Verarmung bestimmt. Auch hier wurden zusätzliche Kapazitäten mit der "open correction" korrigiert. Die Messungen fanden bei 1 MHz statt. Dazu werden drei Pixel parallel gemessen, da es sich um sehr kleine Kapazitäten handelt. Der Biasadapter dient wieder zum Schutz des LCR-Meters.

2.8 Rbias - der Biaswiderstand

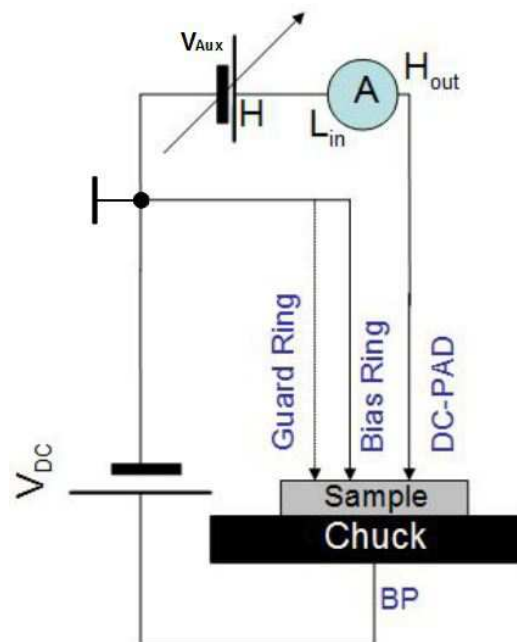


Abbildung 2.9: Schaltplan zur Bestimmung des Biaswiderstandes - mit einem Amperemeter wird der Strom zwischen Biasring und Pixel in Abhängigkeit der dazwischen anliegenden Spannung bei vollständiger Verarmung gemessen. V_{Aux} ist bipolar.

Die konstante Spannungsquelle (500 V) sorgt für die Verarmung des Sensors. Die zweite, regelbare Spannungsquelle legt eine Spannung V_{Aux} zwischen Biasring und Pixel an, so dass hier eine IV-Kurve aufgenommen werden kann, aus der sich der Widerstand bestimmen lässt.

2.8.1 Polysiliziumwiderstände

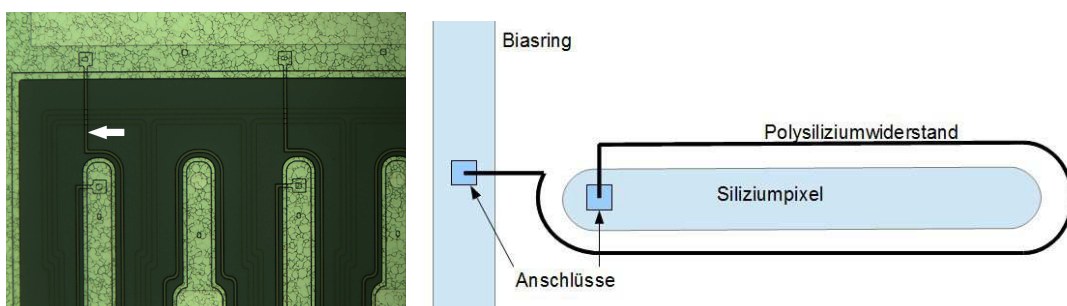


Abbildung 2.10: Der Polysiliziumwiderstand - am oberen Rand ist der Biasring zu erkennen. Von dort geht der Biaswiderstand ab und ist einmal um den gesamten Pixel "gewickelt".

Bei dem Polysiliziumwiderstand (Abbildung 2.10) handelt es sich um einen ohmschen Widerstand, also ist er über $U = R \cdot I$ aus dem Anstieg der IV-Kurve zu bestimmen.

2.8.2 Punch-Through Strukturen

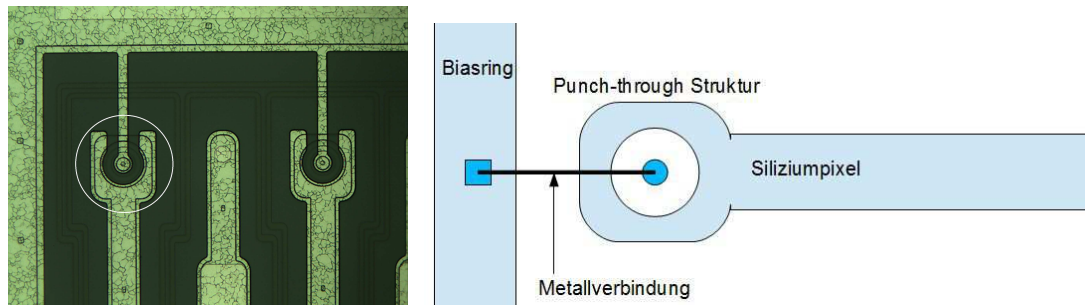


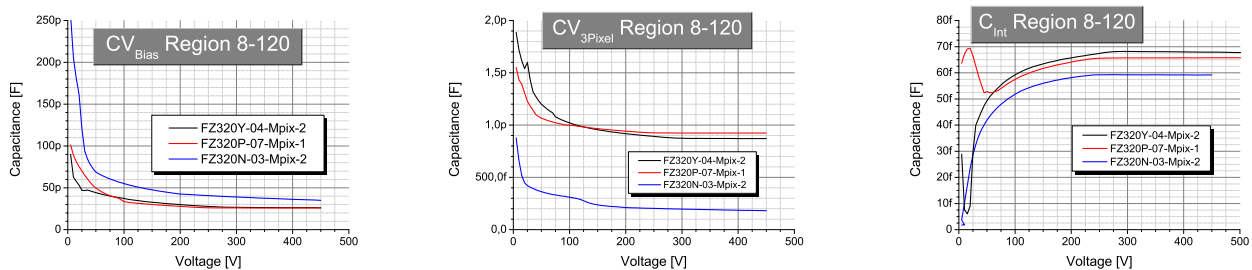
Abbildung 2.11: Der Punch-Through Widerstand - am oberen Rand ist der Biasring zu erkennen.

Die Punch-Through Struktur (Abbildung 2.11) verhält sich nicht ohmsch, da es sich hier um Feldeffekte handelt (Kapitel 1.4). Bei kleinen Spannungen wird ein sehr hoher ohmscher Widerstand des Siliziumsubstrats erwartet. Bei hohen Spannungen kommt es zu einem Stromfluss (Punch-Through Effekt). Im Durchbruchbereich wird der Widerstand differenziell dargestellt.

3 Auswertung

3.1 Messungen unbestrahlter Sensoren bei 22°C

3.1.1 Kapazitätsmessungen



(a) Kapazität zwischen Biasring und der Rückseite in Abhängigkeit der Spannung (b) Kapazität zwischen 3 Pixeln und der Rückseite in Abhängigkeit der Spannung (c) Zwischenpixelkapazität in Abhängigkeit der Spannung

Abbildung 3.1: Die Kapazitätsmessungen am Beispiel der Region 8 der Sensoren FZ320Y-04-Mpix-2, FZ320P-07-Mpix-1 und FZ320N-03-Mpix-2. Die Pixelmessungen wurden auf einen Pixel normiert und die Messungen des P- und Y-Sensors negiert.

Die Biasringkapazität und die Pixelkapazität zeigen ein $\frac{1}{V}$ Verhalten bis zur vollständigen Verarmung des Sensors. Ab der Verarmung stellt sich eine nahezu konstante Kapazität ein. Die Verarmungsspannung lässt sich, wie in Kapitel 2.2 erklärt, bestimmen. Der Y-Sensor und der P-Sensor haben im Rahmen der Messgenauigkeit die gleiche Verarmungsspannung von etwa 260 V. Eine geringere Verarmungsspannung hat der N-Sensor mit $236 \text{ V} \pm 10 \text{ V}$ (Tabelle 3.1). Die Zwischenpixelkapazität steigt mit zunehmender Spannung und stagniert ab der Verarmungsspannung (Anhang Seite 36). In der Zwischenpixelkapazitätsmessung ist eine klare Aufspaltung zwischen langen und kurzen Pixeln zu erkennen, da mit der Länge die Fläche des Pixels zum Nachbarn zunimmt. Ein hoher Zwischenpixelabstand führt zu einer geringeren Kapazität. Punch-Through Regionen haben eine höhere Zwischenpixelkapazität als Polysiliziumregionen (Abbildung 3.6 und Anhang Seite 8). Dies bestätigt die Erwartungen aus Kapitel 2.4.

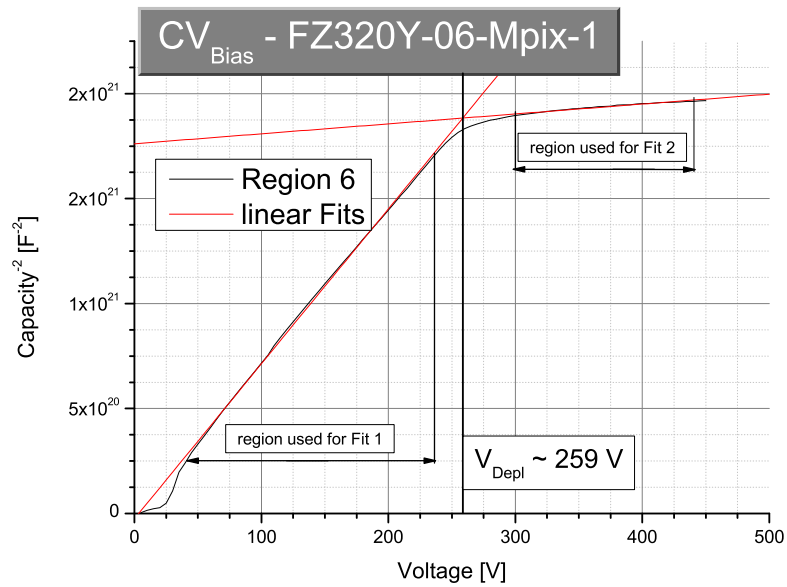
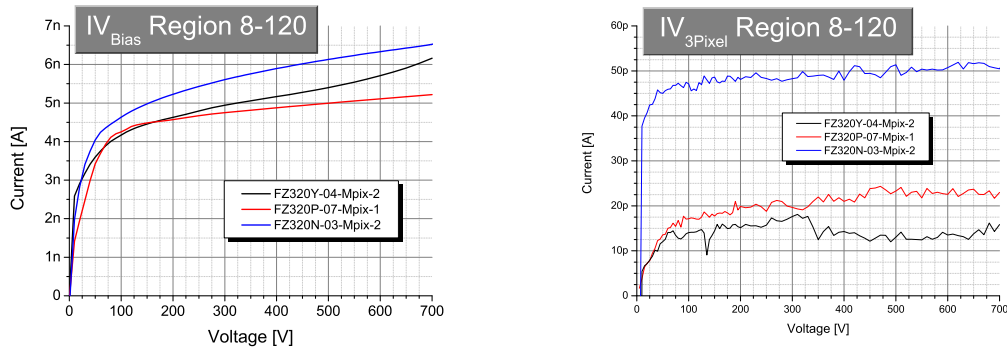


Abbildung 3.2: Bestimmung der Verarmungsspannung der Region 6 des FZ320Y-06-Mpix-1 Sensors bei Raumtemperatur

Region	FZ320Y-06-Mpix-1	FZ320P-07-Mpix-1	FZ320N-03-Mpix-2
1	267	263	250
2	288	250	233
3	257	259	243
4	249	246	224
5	242	263	248
6	259	244	220
7	257	264	229
8	288	252	236
9	284	258	240
10	264	243	239
11	253	262	241
12	261	246	228
Ø	264 ± 16	254 ± 9	236 ± 10

Tabelle 3.1: Verarmungsspannung der drei Sensoren (FZ320Y-06-Mpix-1, FZ320P-07-Mpix-1 und FZ320N-03-Mpix-2) und ihren Regionen vor der Bestrahlung in Volt

3.1.2 Strommessung



(a) Strom des Biasrings in Abhängigkeit der Spannung an der Rückseite (b) Strom des Pixels in Abhängigkeit der Spannung an der Rückseite

Abbildung 3.3: Die Strommessungen am Beispiel der Region 8 der Sensoren FZ320Y-04-Mpix-2, FZ320P-07-Mpix-1 und FZ320N-03-Mpix-2. Die Pixelmessungen wurden auf einen Pixel normiert und die Messungen des P- und Y-Sensors negiert.

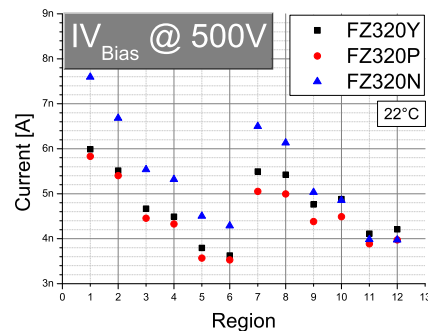
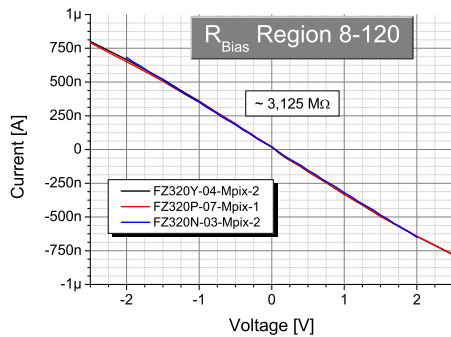


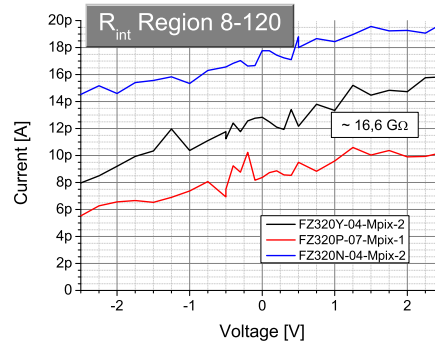
Abbildung 3.4: IV_{Bias} - dargestellt sind die Stromstärken der jeweiligen Regionen der 3 Sensoren (FZ320Y-04-Mpix-2, FZ320P-07-Mpix-1 und FZ320N-03-Mpix-2) bei 500V Biasspannung.

Der Dunkelstrom beträgt einige Nanoampere. Ein höherer Pixelabstand führt zu höheren Strömen, da die entsprechenden Pixelflächen größer werden (Tabelle 1.2). Regionen mit Polysiliziumwiderständen haben einen kleineren Leckstrom als Regionen mit Punch-Through-Widerständen sowohl in den Pixel- als auch in den Biasringmessungen (Abbildung 3.4 und Tabelle 8.6). Die Leckströme des p-in-n Typs sind höher als die der n-in-p Typen. Der p-Spray Sensor hat geringfügig höhere Leckströme als der p-Stop Sensor.

3.1.3 Widerstände



(a) Der Polysiliziumbiaswiderstand



(b) Der Zwischenpixelwiderstand

Abbildung 3.5: Die Strommessungen zur Bestimmung der Widerstände am Beispiel der Region 8 der Sensoren FZ320Y-04-Mpix-2, FZ320P-07-Mpix-1 und FZ320N-03-Mpix-2

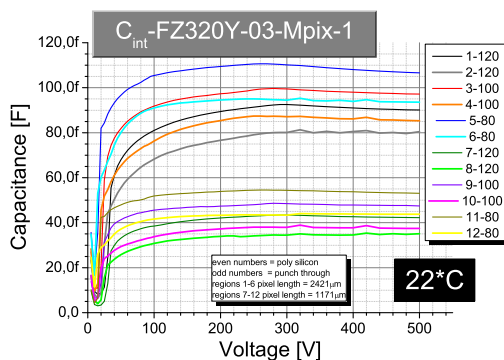
Der Polysiliziumbiaswiderstand beträgt bei allen Sensoren $3,1 \text{ M}\Omega \pm 0,2 \text{ M}\Omega$ bei den kurzen und $5,8 \text{ M}\Omega \pm 0,3 \text{ M}\Omega$ bei den langen Pixeln (Tabelle 3.2). Der Zwischenpixelwiderstand ist bei allen Sensoren größer als $15 \text{ G}\Omega$ (Anhang 8). Es lässt sich kein Unterschied zwischen p-Stop und p-Spray feststellen. Die Punch-Through Struktur zeigt einen exponentiellen Verlauf des differentiellen Widerstandes, sodass wir einen linearen Verlauf im doppelt logarithmischen Plot erhalten (Anhang Seite 39).

Region	FZ320Y-04-Mpix-2	FZ320P-07-Mpix-1	FZ320N-03-Mpix-2
2	5,8	5,6	5,8
4	5,7	5,5	5,8
6	5,8	5,6	6,0
8	3,1	3,1	3,0
10	3,1	3,1	2,9
12	3,2	3,1	3,0

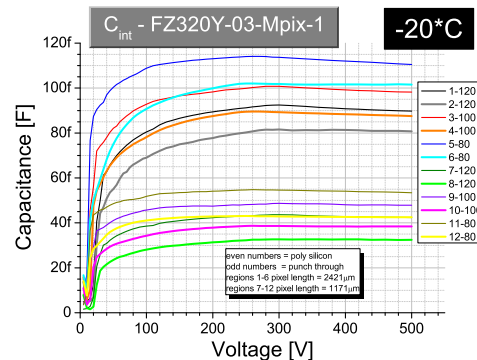
Tabelle 3.2: Polysiliziumwiderstände in Megaohm

3.2 Gekühlte Messungen (-20°C) im Vergleich zu Raumtemperaturmessungen (22°C)

3.2.1 Kapazitätsmessungen



(a) Messung bei Raumtemperatur.



(b) Messung bei -20°C .

Abbildung 3.6: Die Zwischenpixelkapazität zwischen einem Pixel und seinen Nachbarn in Abhängigkeit von der Versorgungsspannung des Sensors.

Die Zwischenpixelkapazität (Abbildung 3.6), die Biaskapazität und die Kapazität zwischen Pixel und Rückseite werden durch die Kühlung des Sensors nicht beeinflusst (Anhang Seite 34 und 35). In der Zwischenpixelkapazitätsmessung sind die gleichen Einflüsse, wie bei Raumtemperaturmessung, der Biasanschlüsse, der Pixelabstände und der Pixellängen zu erkennen.

3.2.2 Strommessungen

Für den Leckstrom I in Silizium gilt in Abhängigkeit der Temperatur T folgendes[Dob04]:

$$I(T_R) = I(T) \left(\frac{T}{T_R} \right)^2 \exp \left(-\frac{E}{2k_B} \left[\frac{1}{T_R} - \frac{1}{T} \right] \right), \quad T_R : \text{Referenztemperatur}$$

E : Energie der Bandlücke
 k : Boltzmannkonstante

Beim Vergleich von Messungen bei -20°C und 22°C erhält man aus der Rechnung einen Faktor von etwa 62, um den sich die Ströme unterscheiden. In Tabelle 3.3 ist das gemessene Verhältnis dargestellt. Das Temperaturverhalten der IV-Biasmessung und der IV-Pixelmessung stimmen sehr gut mit der Rechnung überein.

Region	IV-Bias		
	22°C	-20°C	Verhältnis
1	5,86E-09	2,11E-10	28
2	5,41E-09	8,28E-11	65
3	4,57E-09	7,04E-11	65
4	4,42E-09	6,68E-11	66
5	3,74E-09	5,68E-11	66
6	3,57E-09	5,62E-11	64
7	5,38E-09	8,48E-11	63
8	5,33E-09	8,53E-11	63
9	4,67E-09	7,48E-11	63
10	4,80E-09	7,98E-11	60
11	4,04E-09	6,86E-11	59
12	4,15E-09	7,14E-11	58
Ø			63 ± 3

Tabelle 3.3: Einfluss der Temperatur auf die IV-Biasmessung am Beispiel des FZ320Y-03-Mpix-1 - dargestellt sind die Stromstärken bei 450 V in Ampere. Die eingefärbten Zellen sind Ausreißer und werden bei statistischen Berechnungen nicht berücksichtigt.

Region	IV-Pixel		
	22°C	-20°C	Verhältnis
1	1,89E-11	2,81E-13	67
3	1,44E-11	2,15E-13	67
5	1,13E-11	1,48E-13	76
7	8,66E-12	2,33E-13	37
9	7,40E-12	1,19E-13	62
11	5,69E-12	1,22E-13	65
Ø			67 ± 7

Tabelle 3.4: Einfluss der Temperatur auf die IV-Pixelmessung am Beispiel des FZ320Y-03-Mpix-1 - dargestellt sind die Stromstärken bei 450 V in Ampere.

3.2.3 Widerstände

Da es sich bei den Widerstandsmessungen ebenfalls um IV-Messungen handelt, ist auch hier der Strom der gekühlten Messungen geringer als der der Messungen bei Raumtemperatur. Der Polysiliziumwiderstand wird mit sinkender Temperatur größer (Tabelle 3.5). Die Punch-Through Struktur erfährt keine Änderung, da es sich um einen reinen Feldeffekt handelt (Anhang Seite 39).

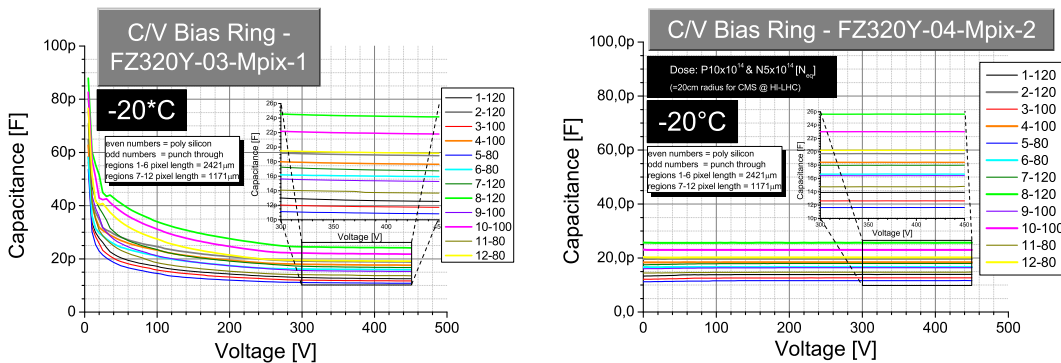
Region	FZ320Y-03-Mpix-1			FZ320N-03-Mpix-2		
	22°C	-20°C	Quotient	22°C	-20°C	Quotient (Hephy)
2	5,583	6,684	1,1972	5,847	6,836	1,1692
4	5,415	6,475	1,1958	5,834	6,821	1,1692
6	5,523	6,545	1,1850	6,001	7,017	1,1692
8	2,793	3,314	1,1865	3,045	3,560	1,1692
10	2,798	3,328	1,1894	2,955	3,455	1,1692
12	2,821	3,347	1,1865	3,038	3,552	1,1692

Tabelle 3.5: Einfluss der Temperatur auf den Polysiliziumwiderstand des FZ320Y-Sensors - dargestellt sind die Widerstände bei der entsprechenden Temperatur in Megaohm und der resultierende Temperaturquotient. Die Berechnung des Polysiliziumwiderstandes erfolgt mit Hilfe des Temperaturkoeffizienten, der aus den Messungen der Teststrukturen vom Institut für Hochenergiephysik in Wien (Hephy), berechnet wurde [Daten von Wolfgang Teberspurgl].

3.3 Bestrahlte Proben (-20°C) und der Vergleich zu den gekühlten Messungen (-20°C)

Im Folgenden werden drei Sensoren betrachtet, welche mit einem 1,8 MeV Neutronenstrahl, mit einer Äquivalentdosisleistung eines 1 MeV Neutronenstrahls von $10 \cdot 10^{14}$ Neutronen im TRIGA Reactor in Ljubljana und eines 23 MeV Protonenstrahls mit einer Äquivalentdosisleistung eines 1 MeV Neutronenstrahls von $5 \cdot 10^{14}$ Neutronen im Zyklotron vom Karlsruher Institut für Technologie bestrahlt worden sind.

3.3.1 Kapazitätsmessungen



(a) Messung bei -20°C eines unbestrahlten Sensors. (b) Messung bei -20°C eines bestrahlten Sensors.

Abbildung 3.7: Die Kapazität zwischen dem Biasring und der Rückseite in Abhängigkeit der Spannung.

Nach der Bestrahlung hat sich keine Veränderung in dem Wert der Kapazität zwischen Biasring und Rückseite oberhalb von 300 V eingestellt (Tabelle 8.5). Die Pixelkapazität erfährt ebenfalls keine Änderung oberhalb der 300 V (Tabelle 8.4). Alle Kapazitäten nehmen nach Bestrahlung bereits bei kleinen Spannungen den Sättigungswert an, wohingegen der unbestrahlte Sensor einen $\frac{1}{V}$ Abfall bei kleinen Spannungen zeigt und erst bei etwa 300 V in die Sättigung geht (Anhang Seite 34, 35 und 36). Aufgrund des linearen Messkurvenverlaufs lässt sich die Verarmungsspannung der bestrahlten Sensoren nicht bestimmen.

3.3.2 Strommessungen

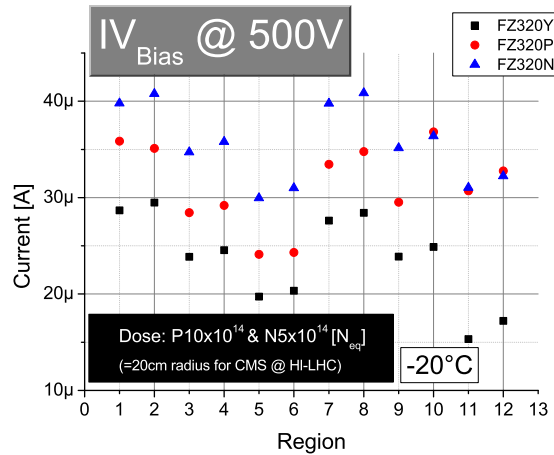


Abbildung 3.8: IVBias - dargestellt sind die Stromstärken der jeweiligen Regionen der 3 Sensoren (FZ320Y-04-Mpix-2, FZ320P-07-Mpix-1 und FZ320N-03-Mpix-2) bei 500 V Biasspannung. Die bestrahlten Sensoren wurden bei -20°C vermessen.

Bei etwa 200 V geht die IV-Kurve von dem erwarteten absättigenden Verlauf in einen linearen Anstieg über. Es findet bei der Biasleckstrommessung eine Aufspaltung nach dem Zwischenpixelabstand statt (Anhang Seite 8), da sich bei höherem Abstand auch die Fläche der Pixel vergrößert. Bei den Pixelleckstrommessungen ist auch ein Einfluss der Pixellänge zu sehen (Anhang Seite 8). Dieser Einfluss ist bei der Biasmessung nicht zu sehen, da bei Regionen kurzer Pixel doppelt so viele Reihen an Pixeln vorhanden sind und damit die Fläche gleich ist. Der Leckstrom hat mit der Bestrahlung stark zugenommen (Abbildung 3.4 und Abbildung 3.8). Im Vergleich zwischen den drei Substrattypen (Tabelle 3.6) erkennt man, dass die Zunahme des Leckstromes am größten bei dem P-Sensor ist, am geringsten bei dem Y-Sensor. Des Weiteren ist der Anstieg in einer Polysiliziumregion etwa um einen Faktor von 1,07 bei den Biasringmessungen (1,12 bei den Pixelmessungen) höher als der Anstieg in der vergleichbaren Punch-Through-Region (siehe auch Tabelle 42).

Region	FZ320Y-04-Mpix-2			FZ320P-07-Mpix-1			FZ320N-03-Mpix-2		
	v.B.	n.B.	Zunahme	v.B.	n.B.	Zunahme	v.B.	n.B.	Zunahme
1	$5,989 \cdot 10^{-9}$	$2,86767 \cdot 10^{-5}$	4788	$5,831 \cdot 10^{-9}$	$3,58533 \cdot 10^{-5}$	6149	$7,593 \cdot 10^{-9}$	$3,979 \cdot 10^{-5}$	5240
2	$5,51567 \cdot 10^{-9}$	$2,949 \cdot 10^{-5}$	5347	$5,404 \cdot 10^{-9}$	$3,511 \cdot 10^{-5}$	6497	$6,681 \cdot 10^{-9}$	$4,07767 \cdot 10^{-5}$	6103
3	$4,66967 \cdot 10^{-9}$	$2,38533 \cdot 10^{-5}$	5108	$4,45567 \cdot 10^{-9}$	$2,84467 \cdot 10^{-5}$	6384	$5,537 \cdot 10^{-9}$	$3,47067 \cdot 10^{-5}$	6268
4	$4,49 \cdot 10^{-9}$	$2,456 \cdot 10^{-5}$	5470	$4,32767 \cdot 10^{-9}$	$2,92 \cdot 10^{-5}$	6747	$5,319 \cdot 10^{-9}$	$3,58 \cdot 10^{-5}$	6731
5	$3,797 \cdot 10^{-9}$	$1,97253 \cdot 10^{-5}$	5195	$3,57133 \cdot 10^{-9}$	$2,412 \cdot 10^{-5}$	6754	$4,503 \cdot 10^{-9}$	$2,995 \cdot 10^{-5}$	6651
6	$3,62733 \cdot 10^{-9}$	$2,03403 \cdot 10^{-5}$	5608	$3,52967 \cdot 10^{-9}$	$2,431 \cdot 10^{-5}$	6887	$4,288 \cdot 10^{-9}$	$3,09933 \cdot 10^{-5}$	7228
7	$5,49333 \cdot 10^{-9}$	$2,76267 \cdot 10^{-5}$	5029	$5,05267 \cdot 10^{-9}$	$3,34533 \cdot 10^{-5}$	6621	$6,499 \cdot 10^{-9}$	$3,97767 \cdot 10^{-5}$	6120
8	$5,42467 \cdot 10^{-9}$	$2,84233 \cdot 10^{-5}$	5240	$4,996 \cdot 10^{-9}$	$3,47767 \cdot 10^{-5}$	6961	$6,13 \cdot 10^{-9}$	$4,085 \cdot 10^{-5}$	6664
9	$4,76133 \cdot 10^{-9}$	$2,38733 \cdot 10^{-5}$	5014	$4,38133 \cdot 10^{-9}$	$2,952 \cdot 10^{-5}$	6738	$5,033 \cdot 10^{-9}$	$3,51433 \cdot 10^{-5}$	6983
10	$4,881 \cdot 10^{-9}$	$2,48933 \cdot 10^{-5}$	5100	$4,491 \cdot 10^{-9}$	$3,682 \cdot 10^{-5}$	8199	$4,854 \cdot 10^{-9}$	$3,63967 \cdot 10^{-5}$	7498
11	$4,113 \cdot 10^{-9}$	$1,5327 \cdot 10^{-5}$	3726	$3,88767 \cdot 10^{-9}$	$3,06967 \cdot 10^{-5}$	7896	$3,985 \cdot 10^{-9}$	$3,10333 \cdot 10^{-5}$	7788
12	$4,20867 \cdot 10^{-9}$	$1,7217 \cdot 10^{-5}$	4091	$3,97433 \cdot 10^{-9}$	$3,27633 \cdot 10^{-5}$	8244	$3,973 \cdot 10^{-9}$	$3,22433 \cdot 10^{-5}$	8116
Ø			4976 ± 549			7006 ± 707			6783 ± 804

Tabelle 3.6: Die Biasleckströme der drei Sensortypen vor der Bestrahlung (v.B.) und nach der Bestrahlung (n.B.) bei 500 V Versorgungsspannung, sowie der Faktor, um den der Strom ansteigt.

3.3.3 Widerstände

Die Polysiliziumwiderstände werden durch die Bestrahlung hochohmiger (P- und Y-Sensor 5 %, N-Sensortyp 14 % (Tabelle 3.7)). Der Zwischenpixelwiderstand liegt bei allen Sensortypen über den $10 \text{ G}\Omega$ (siehe Seite 40). Der

Region	FZ320Y-04-Mpix-2			FZ320P-07-Mpix-1			FZ320N-03-Mpix-2		
	v.B.	n.B.	Steigerung	v.B.	n.B.	Steigerung	v.B.	n.B.	Steigerung
2	6,72	7,27	8,2 %	6,58	6,95	5,6 %	6,84	7,67	12,1 %
4	6,59	7,19	9,1 %	6,44	6,92	7,4 %	6,82	7,84	15,0 %
6	6,72	7,35	9,4 %	6,59	7,13	8,2 %	7,02	7,76	10,5 %
8	3,64	3,69	1,4 %	3,61	3,66	1,4 %	3,56	4,12	15,7 %
10	3,65	3,82	4,7 %	3,56	3,68	3,4 %	3,46	3,97	14,7 %
12	3,71	3,85	3,8 %	-	4,33	-	3,55	4,05	14,1 %
∅			6,1 % ± 3,3 %			5,2 % ± 2,8 %			13,7 % ± 2,0 %

Tabelle 3.7: Einfluss der Bestrahlung auf den Polysiliziumwiderstand des FZ320Y-Sensors - dargestellt sind die Widerstände bei -20°C in Megaohm vor der Bestrahlung (v.B.) und nach der Bestrahlung (n.B.), sowie der prozentuale Anstieg des Widerstandes.

differentielle Punch-Through-Widerstand sättigt bei kleinen Strömen im Bereich einiger zehn Megaohm. Nach der Bestrahlung ist in der IV-Kurve im Bereich des Durchbruchs ein Sprung zu sehen und der Durchbruch verschiebt sich zu höheren Spannungen (Abbildung 3.9). Dies führt zu einem Peak im differentiellen Widerstand. Um diesen Sprung zu verstehen sind noch weitere Messungen nötig. (siehe auch Abbildungen auf Seite 39).

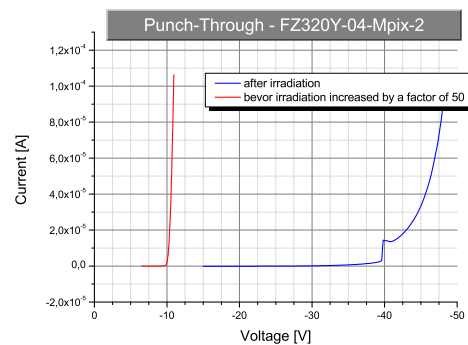


Abbildung 3.9: Die Punch-Through Messung des FZ320Y-04-Mpix-2 vor und nach der Bestrahlung

4 Ergebnisse

Das Ziel der Arbeit war es verschiedene Sensortypen und Geometrien zu charakterisieren und auf ihre Strahlungshärte zu untersuchen, um den am besten geeigneten Sensor für das CMS-Upgrade zu finden.

Nach der Bestrahlung ist der Leckstrom stark angestiegen und zeigt oberhalb der 300 V einen linearen Verlauf. Die Kapazitäten haben oberhalb der 300 V die selben Werte, aber zeigen nicht mehr den typischen Verlauf einer CV-Kurve ohne Bestrahlung. Erwartet wurde der Kurvenverlauf eines unbestrahlten Sensors mit höherer Verarmungsspannung [Mol99]. Der Polysiliziumwiderstand ist größer geworden, der Zwischenpixelwiderstand bleibt unverändert.

Aufgrund der zusätzlich erzeugten Defekte durch die Strahlung, entstanden, unabhängig vom Substratyp, in der Bandlücke Zwischenzustände[Mol99]. Das erklärt die nahezu konstanten Kapazitäten und auch den linearen Verlauf der IV-Messungen oberhalb der 300 V, sowie den Anstieg des Leckstromes.

Das Substrat des p-Spray Sensors ist nicht so strahlungsempfindlich wie das des p-Stop Sensors. Der Anstieg des Leckstroms des P-Sensors durch die Bestrahlung ist höher als der Anstieg des Y-Sensors. So lässt sich schließen, dass der Y-Sensor strahlungshärter als der P-Sensor ist. Der N-Sensor zeigt den höchsten Dunkelstrom sowohl vor als auch nach der Bestrahlung und eignet sich daher in diesem Punkt am wenigsten. Die Steigerung des Polysiliziumwiderstandes ist gering und verursacht somit keine Probleme für den Sensorbetrieb. Der Zwischenpixelwiderstand bleibt unverändert. Das Verhalten der Punch-Trough-Struktur ist unverstanden und bedarf weiterer Untersuchungen.

Somit wäre der Y-Sensor als strahlungshärtester der drei Sensortypen am besten geeignet.

Weiter untersucht werden die anderen Sensordicken und Herstellungsverfahren (Tabelle 1.1).

5 Ein Uploadprogramm

5.1 Konzept

Alle aufgenommenen Daten werden auf der Datenbank “Zeuthen Measurement Data Base” gespeichert. Diese Datenbank kann über einen Internetbrowser als Html-Konstruktion aufgerufen werden. Der Browser kommuniziert dann mit der Datenbank über Https. Das Uploadprogramm soll zur Vereinfachung des Hochladens von Messdaten auf die Datenbank “Zeuthen Measurement Data Base” dienen. Das Uploadprogramm erstellt intern eine Kopie der Seite des Datenbanksservers in Html, sodass der Benutzer hier nur die Login Daten und die hochzuladenden Files angibt. Zusätzlich war eine Umsetzung des Programmes mit Labview geplant, um die existierende Messsoftware mit dieser Funktion zu erweitern. Dafür wurde eine VI entwickelt. Allerdings konnte dieses Programm, wegen Problemen beim Senden von Daten mittels https bei den benutzten Labviewbibliotheken, nicht mehr innerhalb dieser Arbeit fertiggestellt werden.

5.2 Oberfläche und Verwendung

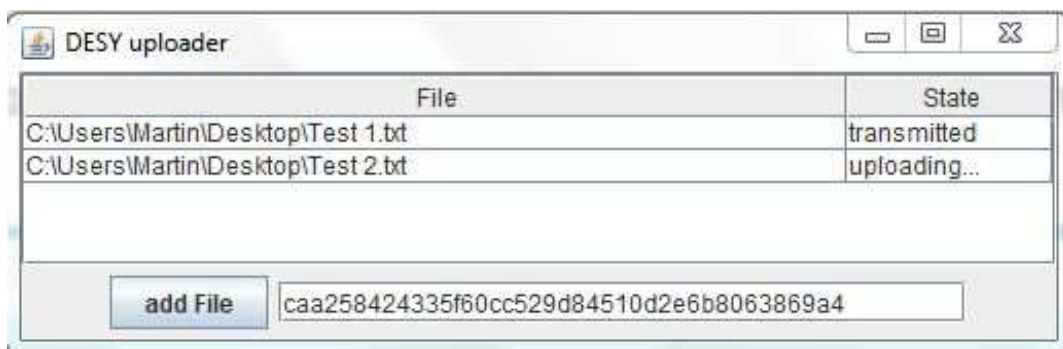


Abbildung 5.1: Die Benutzeroberfläche des “DESY Uploaders”

In Abbildung 5.1 ist die Benutzeroberfläche des Programms dargestellt. Betätigt man den Add-Button kann man den Pfad einer Datei (oder mehrerer Dateien) auswählen, welche dann in der Tabelle darüber eingetragen wird (werden). Dort wird neben der Datei auch der Bearbeitungszustand angezeigt. “waiting” solange das Programm diese Datei noch nicht bearbeitet, “uploading” wenn sie in Bearbeitung ist und “transmitted” wenn sie gesendet wurde. Des Weiteren muss anstelle der Login Daten der Session ID mithilfe eines Internet Explorers manuell ausgelesen und eingetragen werden (Abbildung 5.2). Mit diesen Informationen wird der Cookie erstellt.

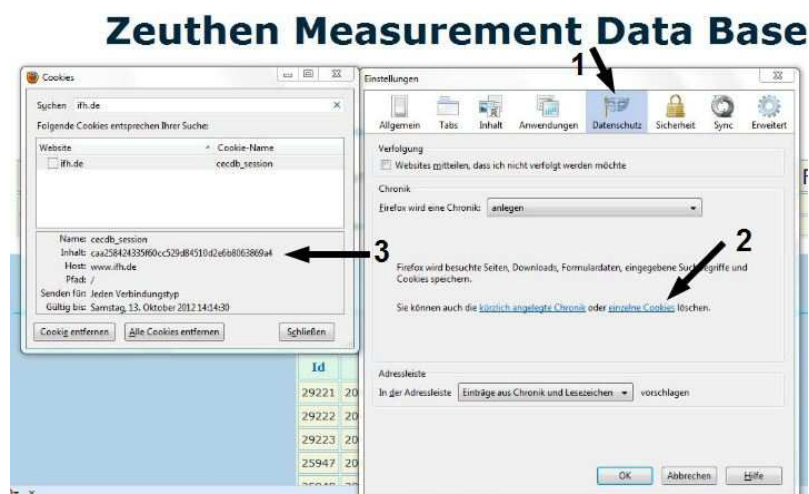


Abbildung 5.2: Das Auslesen der Session ID mit Mozilla Firefox - unter “Einstellungen/Datenschutz” (1) ist der Link “einzelne Cookies” zu finden (2), dort ist unter “Inhalt” die Session ID aufgeführt

5.3 Implementierung

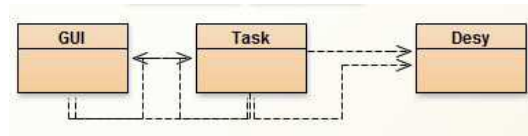


Abbildung 5.3: Klassendiagramm der Benutzeroberfläche

In Abbildung 5.3 werden die Abhängigkeiten zwischen den Klassen gezeigt. Bei den Klassen handelt es sich von links nach rechts um die Benutzeroberflächeninitialisierung (GUI), das Einbinden der hochzuladenden Elemente in die Benutzeroberfläche (Task) und die Klasse, welche die Dateien an den Server verschickt (Desy).

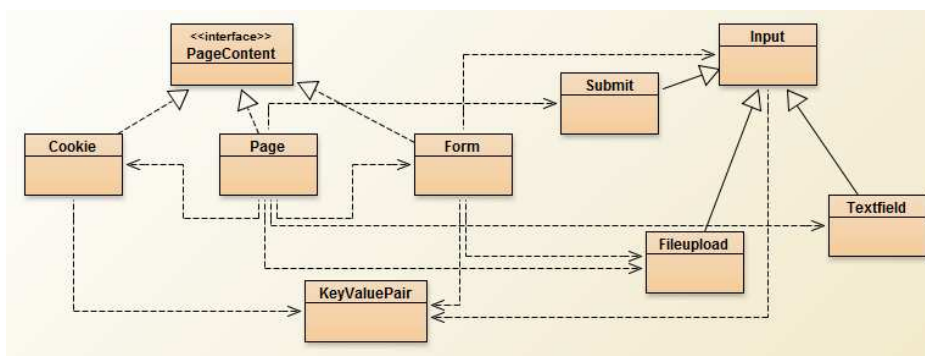


Abbildung 5.4: Klassendiagramm der Funktionalität

Um die Funktionalität von Desy zu gewährleisten, sind die in Abbildung 5.4 dargestellten Klassen nötig (Abbildung 5.5).

```

20     public void sendFile(String file) throws IOException{
21         Form f=new Form();
22         f.setRequestMethod("POST");
23         f.addInput(new Submit());
24         f.addInput(new Textfield("form_submit", "yes"));
25         f.addInput(new Fileupload("my_file", new File(file)));
26         Page p=new Page(new URL("https://www.ifh.de/cecdb/measaction/upload"));
27         p.setForm(f);
28         p.addCookie(new Cookie("cecdb_session",sessionid));
29         p.submit();
30         p.getContent();
31     }

```

Abbildung 5.5: Ausschnitt der Klasse Desy - die Unterklassen werden hier erzeugt

Die Unterklasse Page implementiert die Schnittstelle PageContent. So wird eine Html Seite simuliert. Page verwaltet Cookies, wie "cecdb_session" (Abbildung 5.2) und Form. Form verwaltet die Inputs wie Textfield, Submit und FileUpload. Submit entspricht dem Bestätigungsknopf der Html-Seite. Textfield sendet zusätzliche Konstanten mit, welche notwendig sind. FileUpload liest die hochzuladende Datei aus und stellt dies zur Verfügung. Form erstellt die Anfrage an den Server und Page fügt die Cookies hinzu. Aus einem Input wird ein KeyValuePair erstellt mit Hilfe der Klasse KeyValuePair. Des Weiteren können in dieser Klasse auch mehrere KeyValuePairs zu einer Zeichenkette zusammengefügt.

6 Referenzen und Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

1.1	Der LHC am CERN mit den vier Experimenten CMS, LHC-b, ATLAS und ALICE [CER99]	4
1.2	CMS-Detektor im Querschnitt - es sind die Bahnen unterschiedlicher Teilchen verzeichnet [Col08] . .	5
1.3	Dotierung mittels Phosphor und Bor - die Fremdatome nehmen Gitterplätze ein und führen so zu einem Elektron- oder Löcherüberschuss[Dra10]	6
1.4	Der pn-Übergang - in a) ist die Bildung der Raumladungszone am kristall dargestellt und in b) am Bändermodell[Dra10]	6
1.5	Grundlegender Aufbau eines Siliziumsensors - die Pixel sind über Biasstrukturen mit dem Biasring verbunden und werden auf dasselbe Potential gehoben, sodass das Substrat zwischen Sensorfläche und Rückseite bei hoher Spannung verarmt. Der Guardring bewirkt die Homogenität der inneren Felder und der n++ Schutzring schirmt äußere Felder ab.[Har09]	7
1.6	Die drei gängigsten Arten von Biaswiderständen - Polysiliziumwiderstände sind strahlungshärter, aber schwerer zu realisieren als Punch-Through- und FOXFET-Strukturen[Har09]	8
1.7	Schematische Darstellung von p-Spray und p-Stop Isolierungen bei einem n-in-p Sensor, um die Pixel voneinander zu trennen[Har09]	8
1.8	Darstellung eines ionisierenden Partikels, welches einen Siliziumsensor passiert[Har09]	9
1.9	Selbsttriggerndes Modul - die Bahnkurve des Teilchens mit dem höheren Impuls hat einen größeren Radius und daher bei aufeinanderfolgenden Sensorlagen einen geringeren Pixelversatz als ein Teilchen mit niedrigerem Impuls	9
1.10	Waferaufteilung der Hamamatsukampagne - orange Bereiche stellen 2 Multipixel-Strukturen dar [CTCi] 10	
1.11	Aufbau einer Mpix-Sensors aus 12 Regionen mit 3 verschiedenen Pixel-Pixel-Abständen, 2 verschiedenen Pixellängen und 2 verschiedenen Biaswiderständen. Eine Region besteht, je nach Länge der Pixel, aus 8 oder 16 Pixelreihen mit jeweils 32 Pixeln.	11
2.1	Darstellung der zu messenden Größen	12
2.2	Die Probestation	12
2.3	Schaltplan zur Bestimmung der Biasringkapazität - am LCR-Meter wird die Kapazität zwischen Biasring und Rückseite (BP - Backplane) in Abhängigkeit der Versorgungsspannung gemessen. Die Wechsellspannung wird über den Biasadapter auf die Verarmungsspannung moduliert.	13
2.4	Schaltplan zur Bestimmung des Leckstroms in Abhängigkeit der Spannung zwischen Rückseite und Biasring.	13
2.5	Schaltplan zur Bestimmung der Zwischenpixelkapazität - mit einem LCR-Meter wird die Kapazität zwischen einem Pixel und seinen Nachbarn gemessen in Abhängigkeit der Versorgungsspannung. . .	14
2.6	Schaltplan zur Bestimmung des Zwischenpixelwiderstandes - mit einem Amperemeter wird der Strom von einem Pixel zu seinen Nachbarn in Abhängigkeit der Spannung zwischen ihnen bei vollständiger Verarmung des Sensors gemessen. V_{Aux} ist bipolar.	15
2.7	Die Dunkelstrommessung zwischen drei Pixeln und der Rückseite in Abhängigkeit der Versorgungsspannung	16
2.8	Schaltplan zur Bestimmung der Kapazität zwischen einem Pixel und der Rückseite - am LCR-Meter wird die Kapazität zwischen drei Pixeln und der Rückseite (BP) in Abhängigkeit von der Versorgungsspannung gemessen.	16
2.9	Schaltplan zur Bestimmung des Biaswiderstandes - mit einem Amperemeter wird der Strom zwischen Biasring und Pixel in Abhängigkeit der dazwischen anliegenden Spannung bei vollständiger Verarmung gemessen. V_{Aux} ist bipolar.	17
2.10	Der Polysiliziumwiderstand - am oberen Rand ist der Biasring zu erkennen. Von dort geht der Biaswiderstand ab und ist einmal um den gesamten Pixel "gewickelt".	17
2.11	Der Punch-Through Widerstand - am oberen Rand ist der Biasring zu erkennen.	18
3.1	Die Kapazitätswmessungen am Beispiel der Region 8 der Sensoren FZ320Y-04-Mpix-2, FZ320P-07-Mpix-1 und FZ320N-03-Mpix-2. Die Pixelmessungen wurden auf einen Pixel normiert und die Messungen des P- und Y-Sensors negiert.	18
3.2	Bestimmung der Verarmungsspannung der Region 6 des FZ320Y-06-Mpx-1 Sensors bei Raumtemperatur	19

3.3	Die Strommessungen am Beispiel der Region 8 der Sensoren FZ320Y-04-Mpix-2, FZ320P-07-Mpix-1 und FZ320N-03-Mpix-2. Die Pixelmessungen wurden auf einen Pixel normiert und die Messungen des P- und Y-Sensors negiert.	20
3.4	IVBias - dargestellt sind die Stromstärken der jeweiligen Regionen der 3 Sensoren (FZ320Y-04-Mpix-2, FZ320P-07-Mpix-1 und FZ320N-03-Mpix-2) bei 500V Biasspannung.	20
3.5	Die Strommessungen zur Bestimmung der Widerstände am Beispiel der Region 8 der Sensoren FZ320Y-04-Mpix-2, FZ320P-07-Mpix-1 und FZ320N-03-Mpix-2	21
3.6	Die Zwischenpixelkapazität zwischen einem Pixel und seinen Nachbarn in Abhängigkeit von der Versorgungsspannung des Sensors.	21
3.7	Die Kapazität zwischen dem Biasring und der Rückseite in Abhängigkeit der Spannung.	23
3.8	IVBias - dargestellt sind die Stromstärken der jeweiligen Regionen der 3 Sensoren (FZ320Y-04-Mpix-2, FZ320P-07-Mpix-1 und FZ320N-03-Mpix-2) bei 500 V Biasspannung. Die bestrahlten Sensoren wurden bei -20°C vermessen.	24
3.9	Die Punch-Through Messung des FZ320Y-04-Mpix-2 vor und nach der Bestrahlung	25
5.1	Die Benutzeroberfläche des "DESY Uploaders"	26
5.2	Das Auslesen der Session ID mit Mozilla Firefox - unter "Einstellungen/Datenschutz" (1) ist der Link "einzelne Cookies" zu finden (2), dort ist unter "Inhalt" die Session ID aufgeführt	26
5.3	Klassendiagramm der Benutzeroberfläche	27
5.4	Klassendiagramm der Funktionalität	27
5.5	Ausschnitt der Klasse Desy - die Unterklassen werden hier erzeugt	27
8.1	6485 Picoammeter Spezifikationen ¹ Bei einer Netzspannungsperiode – Begrenzung auf 60 Messungen je Sekunde ² Bei sechs Netzspannungsperioden, einer Standardabweichung, 100 Werten, ohne Filterung und "capped input" – Begrenzung auf 10 Messungen je Sekunde ³ Gemessen am Analogausgang bei ohmscher Last > 100 kΩ.[KI03]	33
8.2	Die Biaskapazitätsmessungen der FZ320Y Sensoren	34
8.3	Die Biaskapazitätsmessungen der FZ320P-07-Mpix-1 Sensoren	34
8.4	Die Biaskapazitätsmessungen der FZ320N Sensoren	34
8.5	Die Kapazitätsmessung zwischen Pixel und der Rückseite der FZ320Y Sensoren	35
8.6	Die Kapazitätsmessung zwischen Pixel und der Rückseite des FZ320P-07-Mpix-1 Sensors	35
8.7	Die Kapazitätsmessung zwischen Pixel und der Rückseite der FZ320N Sensoren	35
8.8	Die Zwischenpixelkapazitätsmessung der FZ320Y Sensoren	36
8.9	Die Zwischenpixelkapazitätsmessung des FZ320P-07-Mpix-1 Sensors	36
8.10	Die Zwischenpixelkapazitätsmessung der FZ320N Sensoren	36
8.11	Die Biasleckstrommessung der FZ320Y Sensoren	37
8.12	Die Biasleckstrommessung des FZ320P-07-Mpix-1 Sensors	37
8.13	Die Biasleckstrommessung der FZ320N Sensoren	37
8.14	Die Pixelleckstrommessung der FZ320Y Sensoren	38
8.15	Die Pixelleckstrommessung des FZ320P-07-Mpix-1 Sensors	38
8.16	Die Pixelleckstrommessung der FZ320Y Sensoren	38
8.17	Die Punch-Through Messungen der FZ320Y Sensoren	39
8.18	Die Punch-Through Messungen der FZ320N Sensoren	39
8.19	Die Zwischenpixelwiderstandsmessung der FZ320Y Sensoren	40
8.20	Die Zwischenpixelwiderstandsmessung des FZ320P-07-Mpix-1 Sensors	40
8.21	Die Zwischenpixelwiderstandsmessung der FZ320N Sensoren	40
8.22	Die Polysiliziumbiaswiderstandsmessung der FZ320Y Sensoren	41
8.23	Die Polysiliziumbiaswiderstandsmessung des FZ320P-07-Mpix-1 Sensors	41
8.24	Die Polysiliziumbiaswiderstandsmessung der FZ320N Sensoren	41

Tabellenverzeichnis

1.1	Wafereigenschaften und Stückzahlen in der Hamamatsu-Photonics-K.K.-Kampagne	10
1.2	Eigenschaften der einzelnen Regionen auf einer Multipixelstruktur PT: Punch-Through Struktur Poly: Polysiliziumwiderstand	11

1.3	Bestrahlungspläne für die Teststrukturen anhand von Simulationen für den zukünftigen Detektor in Abhängigkeit des Abstands (Radius) zum Wechselwirkungspunkt	11
3.1	Verarmungsspannung der drei Sensoren (FZ320Y-06-Mpx-1, FZ320P-07-Mpix-1 und FZ320N-03-Mpix-2) und ihren Regionen vor der Bestrahlung in Volt	19
3.2	Polysiliziumwiderstände in Megaohm	21
3.3	Einfluss der Temperatur auf die IV-Biasmessung am Beispiel des FZ320Y-03-Mpix-1 - dargestellt sind die Stromstärken bei 450 V in Ampere. Die eingefärbten Zellen sind Ausreißer und werden bei statistischen Berechnungen nicht berücksichtigt.	22
3.4	Einfluss der Temperatur auf die IV-Pixelmessung am Beispiel des FZ320Y-03-Mpix-1 - dargestellt sind die Stromstärken bei 450 V in Ampere.	22
3.5	Einfluss der Temperatur auf den Polysiliziumwiderstand des FZ320Y-Sensors - dargestellt sind die Widerstände bei der entsprechenden Temperatur in Megaohm und der resultierende Temperaturquotient. Die Berechnung des Polysiliziumwiderstandes erfolgt mit Hilfe des Temperaturkoeffizienten, der aus den Messungen der Teststrukturen vom Institut für Hochenergiephysik in Wien (Hephy), berechnet wurde [Daten von Wolfgang Teberspurg].	23
3.6	Die Biasleckströme der drei Sensortypen vor der Bestrahlung (v.B.) und nach der Bestrahlung (n.B.) bei 500 V Versorgungsspannung, sowie der Faktor, um den der Strom ansteigt.	24
3.7	Einfluss der Bestrahlung auf den Polysiliziumwiderstand des FZ320Y-Sensors - dargestellt sind die Widerstände bei -20°C in Megaohm vor der Bestrahlung (v.B.) und nach der Bestrahlung (n.B.), sowie der prozentuale Anstieg des Widerstandes.	25
8.1	Messeinstellungen - Angaben der Schrittweite in den entsprechenden Messbereichen	33
8.2	Zunahme des Biasleckstroms der drei Sensortypen durch Bestrahlung der Punch-Through Region im prozentualen Verhältnis zu der Zunahme der entsprechenden Polysiliziumregion.	42
8.3	Kapazität zwischen Biasring und Backplane bei 400V und 22°C, -20°C sowie der Faktor um den die Kapazität abnimmt.	42
8.4	Die Kapazitätsmessung zwischen Pixel und Rückseite bei 400 V Versorgungsspannung vor der Bestrahlung (v.B.) und nach der Bestrahlung (n.B.)	42
8.5	Die Kapazitätsmessungen zwischen Biasring und Rückseite bei 400 V Versorgungsspannung vor der Bestrahlung (v.B.) und nach der Bestrahlung (n.B.)	43
8.6	Die Pixelleckstrommessungen bei 500 V Versorgungsspannung vor der Bestrahlung (v.B.) und nach der Bestrahlung (n.B.)	43

Literatur

- [Ber11] BERGHOLZ, M.: Radiation Hard Sensor Materials for the CMS Tracker Upgrade. (2011), S. 1–5. [http://dx.doi.org/CMS CR -2011/308](http://dx.doi.org/CMS%20CR%20-2011/308). – DOI CMS CR -2011/308
- [CER99] CERN: Overall view of the LHC. (1999). <http://dx.doi.org/CERN-AC-9906026>. – DOI CERN-AC-9906026
- [Col08] COLLABORATION, CMS: Technical Proposal for the Upgrade of the CMS Detector through 2020. (2008), 1-321. <http://dx.doi.org/CMS/UG-TP-1>. – DOI CMS/UG-TP-1
- [CTCi] CMS-TRACKER-COLLOBARATION-INTERNAL: <https://twiki.cern.ch/twiki/pub/CMS/SLHCSensorDevelopment>
- [Dob04] DOBOS, D.: Production accompanying testing of the ATLAS pixel module. (2004), S. 100–104
- [Dra10] DRAGICEVIC, Dipl.-Ing. M.: *The New Silicon Strip Detectors for the CMS, Tracker Upgrade*. Technischen Universität Wien, 2010
- [Har09] HARTMANN, Frank: *Evolution of Silicon Sensor Technology in Particle Physics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. – ISBN 978-3-540-25094-4
- [KI02] KEITHLEY INSTRUMENTS, Inc.: *Keithley Model 2400 Series SourceMeter*. 2002
- [KI03] KEITHLEY INSTRUMENTS, Inc.: Model 6485 Picoammeter and Model 6487 Picoammeter/Voltage Source. In: *Document Number 6487-900-01 Rev. B* (2003)
- [Mol99] MOLL, Michael: *Radiation Damage in Silicon Particle Detectors - Microscopic defects and macroscopic properties*. Dissertationsschrift an der Universität Hamburg, 1999

- [Sze01] SZE, S.M.: *Semiconductor Devices Physics and Technology*. John Wiley & Sons, Inc., 2001. – ISBN 0-471-33372-7978-9-290-83224-9
- [Tec08] TECHNOLOGIES, Agilent: Agilent E4981A 120 Hz/1 kHz/1 MHz Capacitance Meter. In: *First Edition* (2008)

7 Danksagung

Ich möchte mich bei allen bedanken, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben.

Zuerst bedanke ich mich bei Prof. Dr. Wolfgang Lohmann, welcher mir diese interessante Arbeit ermöglicht und sie betreut hat. Insbesondere möchte ich mich bei Dr. Wolfgang Lange und Matthias Bergholz bedanken, welche mich während der Arbeit unterstützt haben und mir mit Rat und Tat zur Seite standen. Ohne sie wäre diese Arbeit in dieser Form nicht entstanden. Weiterer Dank geht an Oliver Reetz und Sandro Kollowa, deren Messungen ich in dieser Arbeit mit verwenden durfte. Des Weiteren bedanke ich mich auch bei dem Institut für Hochenergiephysik Wien, deren Daten ich zur Berechnung des Temperaturkoeffizienten verwenden durfte. Thomas Schwarz hat mir bei der programmierung des Uploadtools sehr geholfen, ohne ihn wären meine Kenntnisse nicht ausreichend gewesen ein solches Programm zu erstellen. Danke! Ich möchte mich des Weiteren bei allen Mitgliedern der CMS-Gruppe am DESY Zeuthen bedanken.

8 Anhang

Messeinstellungen

Messung	Spannungsbereich	Spannungsschritte	Mittelung über x Werte	Zeit zwischen den Messungen
CVBias	5 V - 200 V	5 V	3	100 ms
	200 V - 450 V	10 V	3	100 ms
IVBias	0 V - 100 V	5 V	3	100 ms
	100 V - 300 V	10 V	3	100 ms
	300 V - 700 V	20 V	1	100 ms
Cint	5 V - 100 V	5 V	3	100 ms
	100 V - 300 V	10 V	3	100 ms
	300 V - 700 V	20 V	1	100 ms
Rint	-2,5 V - 2,5 V	0,25 V	3	100 ms
IVPixel	0 V - 100 V	5 V	3	100 ms
	100 V - 300 V	10 V	3	100 ms
	300 V - 1000 V	20 V	3	100 ms
CVPixel	5 V - 200 V	5 V	3	100 ms
	200 V - 450 V	10 V	3	100 ms
Rpoly	-2,5 V - 2,5 V	0,25 V	3	100 ms
RPT	je nach Durchbruch	0,25	3	100 ms
		0,2	3	100 ms

Tabelle 8.1: Messeinstellungen - Angaben der Schrittweite in den entsprechenden Messbereichen

Messgeräte

RANGE	5½ DIGIT DEFAULT RESOLUTION	ACCURACY (1YR) ¹ ±(% RDG. + OFFSET) 18°-28°C, 0-70% RH	TYPICAL RMS NOISE ²	ANALOG RISE TIME ³ (10% to 90%)
2 nA	10 fA	0.4 % + 400 fA	20 fA	8 ms
20 nA	100 fA	0.4 % + 1 pA	100 fA	8 ms
200 nA	1 pA	0.2 % + 10 pA	1 pA	500 µs
2 µA	10 pA	0.15% + 100 pA	10 pA	500 µs
20 µA	100 pA	0.1 % + 1 nA	100 pA	500 µs
200 µA	1 nA	0.1 % + 10 nA	1 nA	500 µs
2 mA	10 nA	0.1 % + 100 nA	10 nA	500 µs
20 mA	100 nA	0.1 % + 1 µA	100 nA	500 µs

Abbildung 8.1: 6485 Picoammeter Spezifikationen

¹ Bei einer Netzspannungsperiode – Begrenzung auf 60 Messungen je Sekunde

² Bei sechs Netzspannungsperioden, einer Standardabweichung, 100 Werten, ohne Filterung und “capped input” – Begrenzung auf 10 Messungen je Sekunde

³ Gemessen am Analogausgang bei ohmscher Last > 100 kΩ.[KI03]

Messungen

Für alle Diagramme ohne Temperaturangabe fanden die Messungen bei 22°C statt.

CVBias

FZ320Y

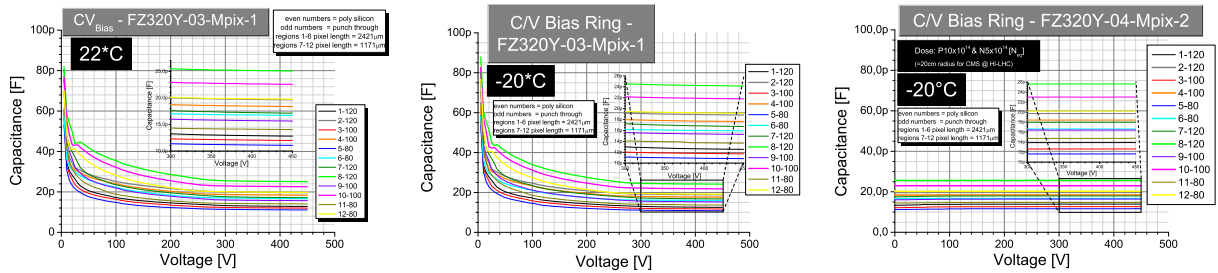


Abbildung 8.2: Die Biaskapazitätsmessungen der FZ320Y Sensoren

FZ320P

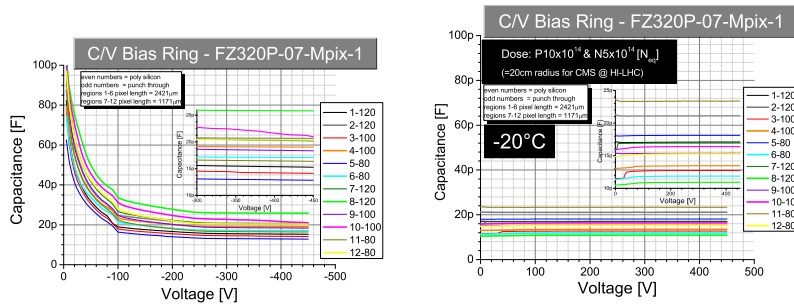


Abbildung 8.3: Die Biaskapazitätsmessungen der FZ320P-07-Mpix-1 Sensoren

FZ320N

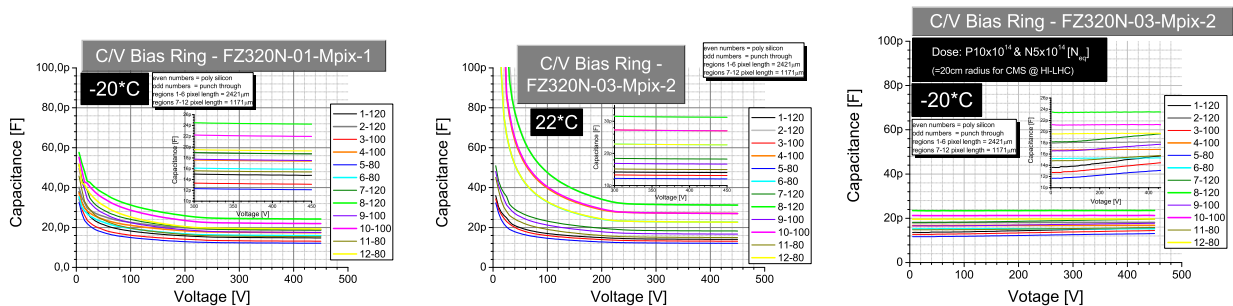


Abbildung 8.4: Die Biaskapazitätsmessungen der FZ320N Sensoren

CVPixel

FZ320Y

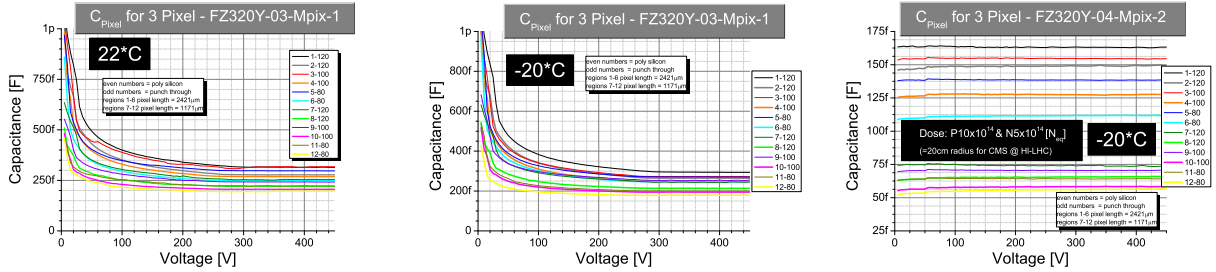


Abbildung 8.5: Die Kapazitätsmessung zwischen Pixel und der Rückseite der FZ320Y Sensoren

FZ320P

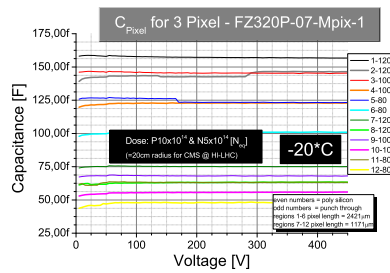


Abbildung 8.6: Die Kapazitätsmessung zwischen Pixel und der Rückseite des FZ320P-07-Mpix-1 Sensors

FZ320N

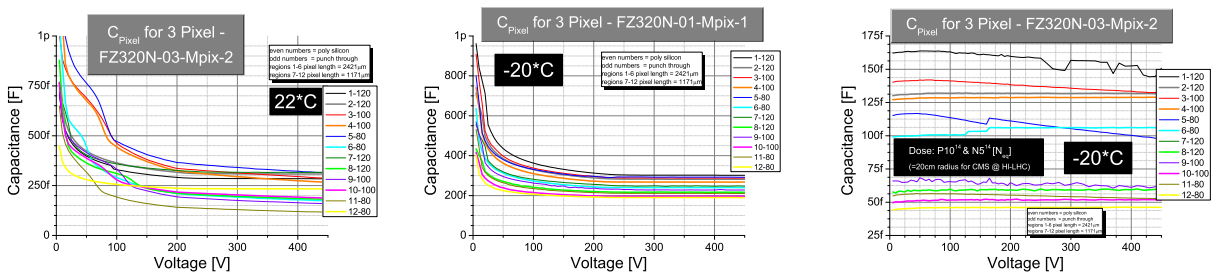


Abbildung 8.7: Die Kapazitätsmessung zwischen Pixel und der Rückseite der FZ320N Sensoren

C_{int}

FZ320Y

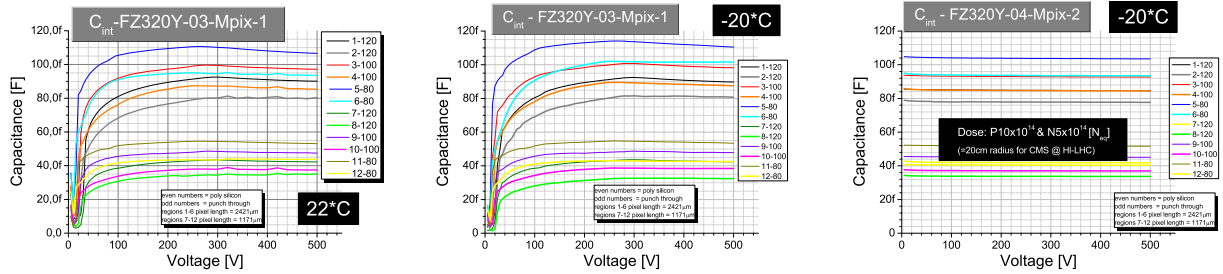


Abbildung 8.8: Die Zwischenpixelkapazitätsmessung der FZ320Y Sensoren

FZ320P

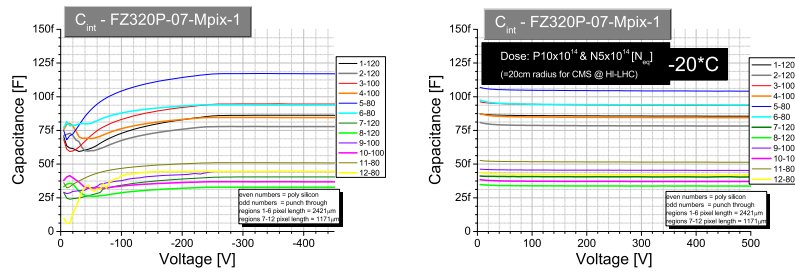


Abbildung 8.9: Die Zwischenpixelkapazitätsmessung des FZ320P-07-Mpix-1 Sensors

FZ320N

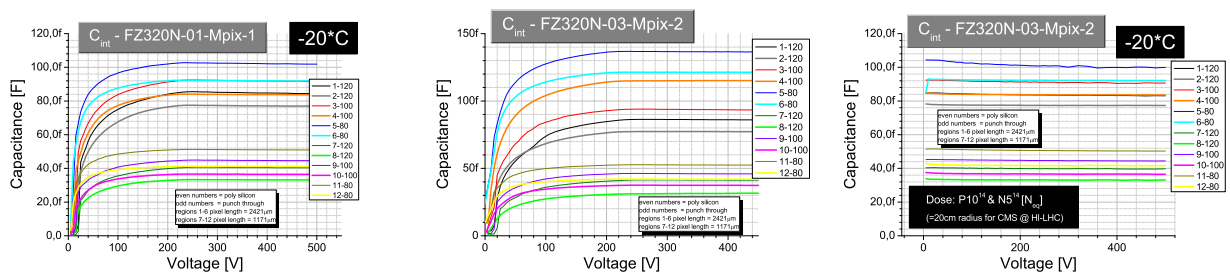


Abbildung 8.10: Die Zwischenpixelkapazitätsmessung der FZ320N Sensoren

IVBias

FZ320Y

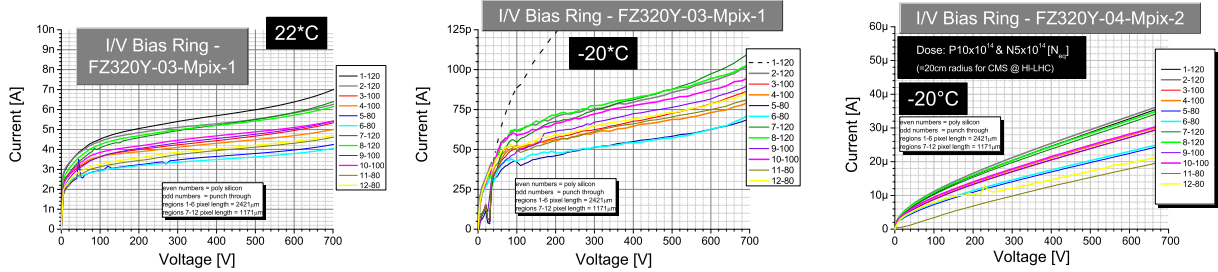


Abbildung 8.11: Die Biasleckstrommessung der FZ320Y Sensoren

FZ320P

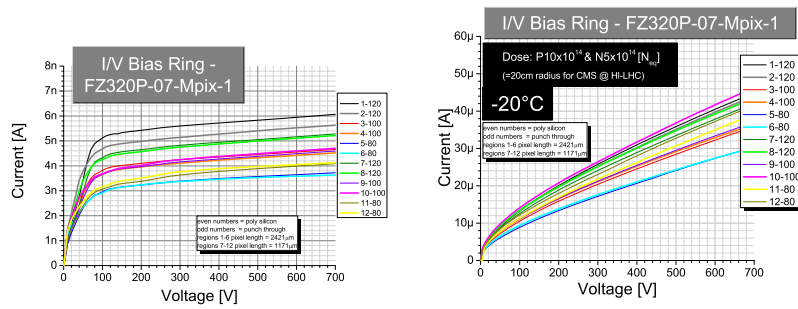


Abbildung 8.12: Die Biasleckstrommessung des FZ320P-07-Mpix-1 Sensors

FZ320N

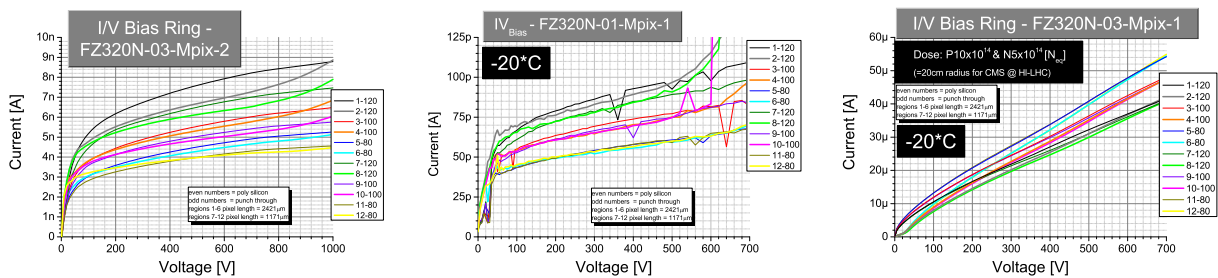


Abbildung 8.13: Die Biasleckstrommessung der FZ320N Sensoren

IVPixel

FZ320Y

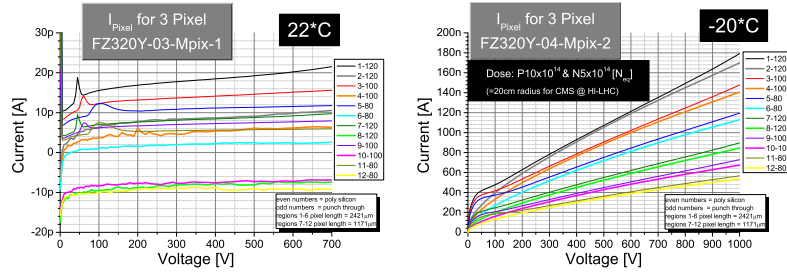


Abbildung 8.14: Die Pixelleckstrommessung der FZ320Y Sensoren

FZ320P

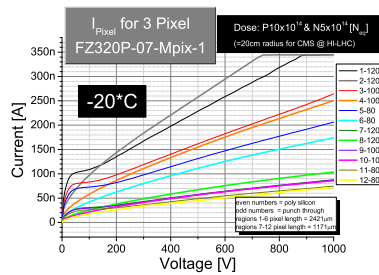


Abbildung 8.15: Die Pixelleckstrommessung des FZ320P-07-Mpix-1 Sensors

FZ320N

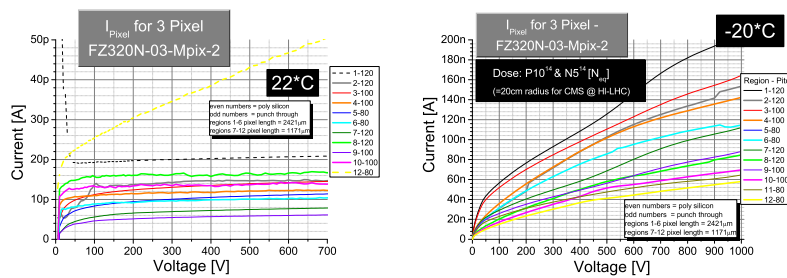


Abbildung 8.16: Die Pixelleckstrommessung der FZ320Y Sensoren

Punch-Through

FZ320Y

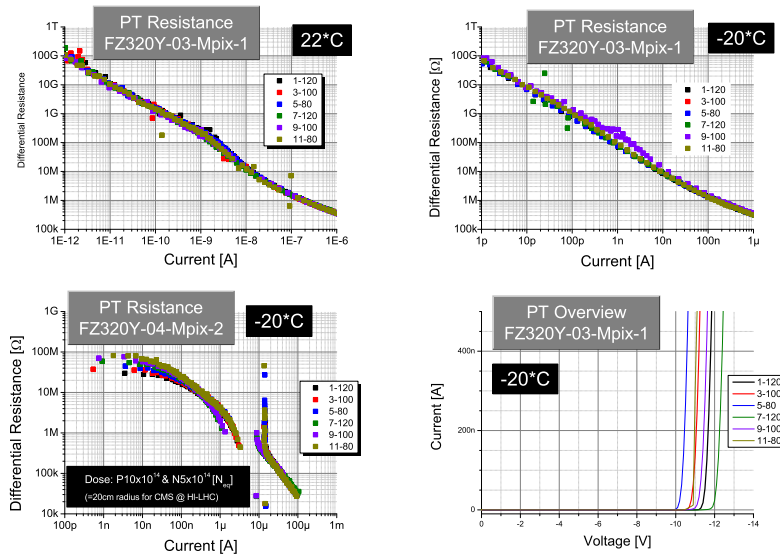


Abbildung 8.17: Die Punch-Through Messungen der FZ320Y Sensoren

FZ320N

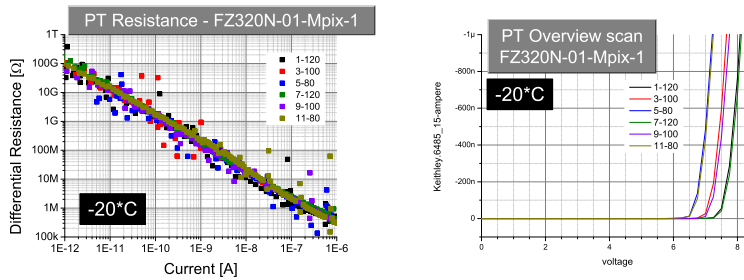


Abbildung 8.18: Die Punch-Through Messungen der FZ320N Sensoren

R_{int}

FZ320Y

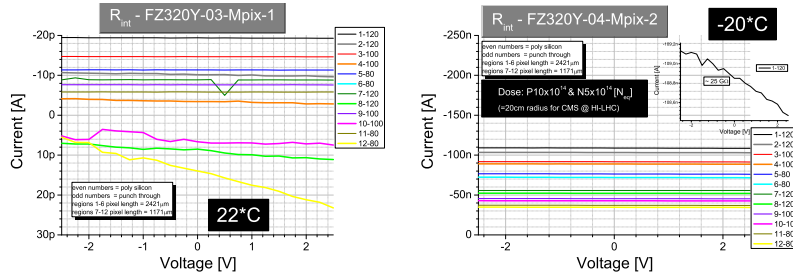


Abbildung 8.19: Die Zwischenpixelwiderstandsmessung der FZ320Y Sensoren

FZ320P

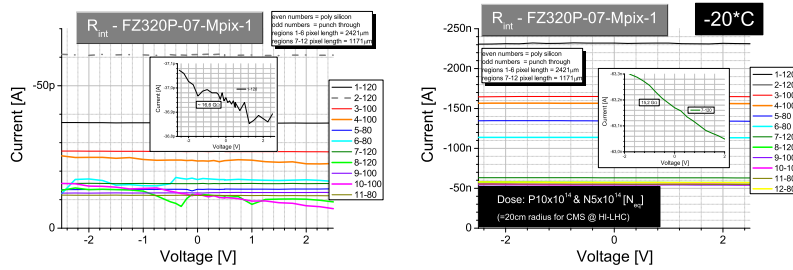


Abbildung 8.20: Die Zwischenpixelwiderstandsmessung des FZ320P-07-Mpix-1 Sensors

FZ320N

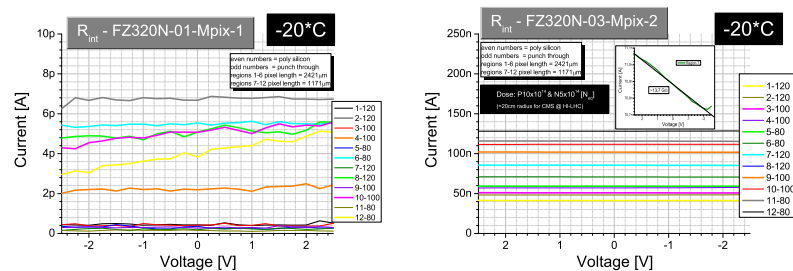


Abbildung 8.21: Die Zwischenpixelwiderstandsmessung der FZ320N Sensoren

Rpoly
FZ320Y

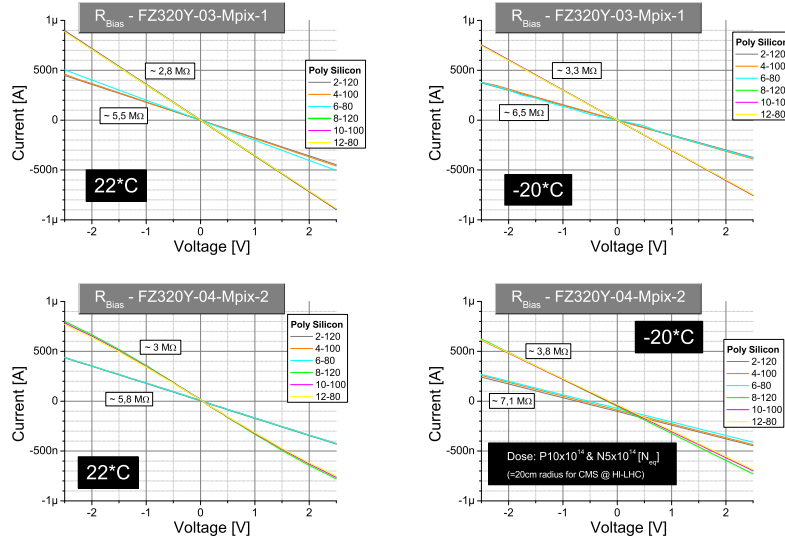


Abbildung 8.22: Die Polysiliziumbiaswiderstandsmessung der FZ320Y Sensoren

FZ320P

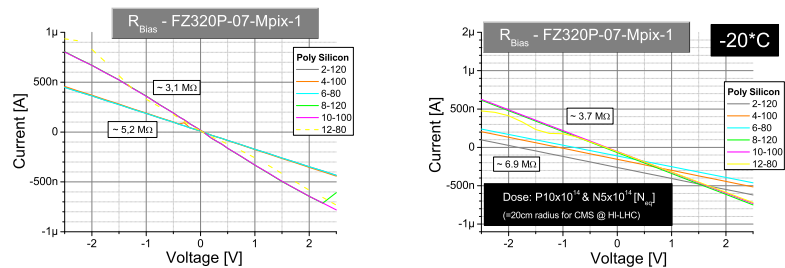


Abbildung 8.23: Die Polysiliziumbiaswiderstandsmessung des FZ320P-07-Mpix-1 Sensors

FZ320N

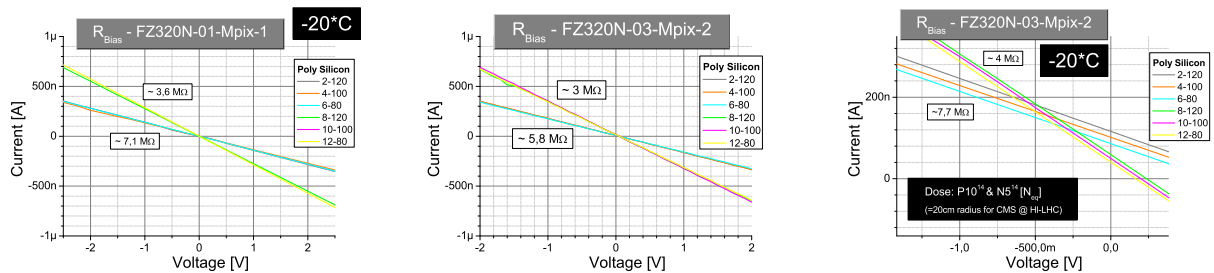


Abbildung 8.24: Die Polysiliziumbiaswiderstandsmessung der FZ320N Sensoren

Auswertungen

Regionen	FZ320Y-04-Mpix-2	FZ320P-07-Mpix-1	FZ320N-03-Mpix-2
1 & 2	89,5 %	94,6 %	85,9 %
3 & 4	93,4 %	94,6 %	93,1 %
5 & 6	92,6 %	98,1 %	92,0 %
7 & 8	96,0 %	95,1 %	91,8 %
9 & 10	98,3 %	82,2 %	93,1 %
11 & 12	91,1 %	95,8 %	96,0 %
Ø	93,5 % ± 3,2 %	93,4 % ± 5,7 %	92,0 % ± 3,4 %

Tabelle 8.2: Zunahme des Biasleckstroms der drei Sensortypen durch Bestrahlung der Punch-Through Region im prozentualen Verhältnis zu der Zunahme der entsprechenden Polysiliziumregion.

Region	FZ320Y-03-Mpix-1		
	22°C	-20°C	Quotient
1	1,289720E-11	1,261480E-11	1,02239
2	1,970930E-11	1,889860E-11	1,0429
3	1,206660E-11	1,178250E-11	1,02411
4	1,847717E-11	1,770730E-11	1,04348
5	1,113620E-11	1,088657E-11	1,02293
6	1,679107E-11	1,600790E-11	1,04892
7	1,723857E-11	1,683073E-11	1,02423
8	2,517883E-11	2,423933E-11	1,03876
9	1,573210E-11	1,535253E-11	1,02472
10	2,264170E-11	2,188233E-11	1,0347
11	1,411347E-11	1,373477E-11	1,02757
12	1,984343E-11	1,922783E-11	1,03202
Ø			1,03223 ± 0,00934

Tabelle 8.3: Kapazität zwischen Biasring und Backplane bei 400V und 22°C, -20°C sowie der Faktor um den die Kapazität abnimmt.

Region	FZ320Y-04-Mpix-2			FZ320P-07-Mpix-1			FZ320N-03-Mpix-2		
	22°C v.B.	-20°C n.B.	Sinkfaktor	22°C v.B.	-20°C n.B.	Sinkfaktor	22°C v.B.	-20°C n.B.	Sinkfaktor
1	1,18395E-13	1,630624E-13	0,726	1,56794E-13	1,567938E-13	0,799	9,48556E-14	1,558509E-13	0,609
2	9,72092E-14	1,498548E-13	0,649	-	1,470499E-13	-	1,02762E-13	1,266440E-13	0,811
3	1,1543E-13	1,541644E-13	0,749	-	1,460102E-13	-	9,8433E-14	1,331353E-13	0,739
4	9,29039E-14	1,250086E-13	0,743	1,14189E-13	1,285736E-13	0,881	-	1,289816E-13	-
5	-	1,384211E-13	-	1,16766E-13	1,237608E-13	0,943	-	9,533922E-14	-
6	1,03962E-13	1,119944E-13	0,928	-	8,942667E-14	-	5,97427E-14	1,060442E-13	0,563
7	9,6783E-14	7,347411E-14	1,317	1,07229E-13	7,522067E-14	1,426	1,05429E-13	-	-
8	7,50753E-14	6,568811E-14	1,143	1,02644E-13	6,022700E-14	1,704	6,18047E-14	6,024844E-14	1,026
9	8,92483E-14	7,070411E-14	1,262	7,70543E-14	6,850289E-14	1,125	5,46521E-14	6,179622E-14	0,884
10	7,60137E-14	5,936967E-14	1,280	-	5,588633E-14	-	6,39998E-14	5,282767E-14	1,211
11	-	6,435778E-14	-	-	6,339678E-14	-	-	5,296833E-14	-
12	5,54921E-14	5,651300E-14	0,982	1,05663E-13	4,958467E-14	2,131	-	4,628889E-14	-
Ø	0,978 ± 0,257			1,288 ± 0,491			0,835 ± 0,229		

Tabelle 8.4: Die Kapazitätsmessung zwischen Pixel und Rückseite bei 400 V Versorgungsspannung vor der Bestrahlung (v.B.) und nach der Bestrahlung (n.B.)

Region	FZ320Y-04-Mpix-2			FZ320P-07-Mpix-1			FZ320N-03-Mpix-2		
	22°C v.B.	-20°C n.B.	Sinkfaktor	22°C v.B.	-20°C n.B.	Sinkfaktor	22°C v.B.	-20°C n.B.	Sinkfaktor
1	1,4835E-11	1,39128E-11	1,06628	1,53708E-11	1,2728E-11	1,20764	1,40737E-11	1,97134E-11	0,71392
2	2,06766E-11	1,97223E-11	1,04839	2,06817E-11	1,81219E-11	1,14125	3,13632E-11	1,56421E-11	2,00505
3	1,2414E-11	1,26404E-11	0,98209	1,42131E-11	1,18772E-11	1,19667	1,31595E-11	2,12641E-11	0,61886
4	1,92577E-11	1,84222E-11	1,04535	1,90594E-11	1,69496E-11	1,12447	2,71085E-11	1,76099E-11	1,53939
5	1,14811E-11	1,16397E-11	0,98637	1,29153E-11	1,0934E-11	1,18121	1,20972E-11	2,35512E-11	0,51366
6	1,73691E-11	1,6655E-11	1,04288	1,71101E-11	1,53642E-11	1,11363	2,27443E-11	1,94327E-11	1,17041
7	1,78892E-11	1,7984E-11	0,99473	2,03001E-11	1,64021E-11	1,23765	1,82872E-11	1,52903E-11	1,196
8	2,62826E-11	2,5634E-11	1,0253	2,58375E-11	2,33677E-11	1,10569	3,12963E-11	1,29533E-11	2,41609
9	1,63108E-11	1,6423E-11	0,99317	1,84265E-11	1,52994E-11	1,20439	1,67376E-11	1,68234E-11	0,9949
10	2,36071E-11	2,30132E-11	1,02581	2,1623E-11	2,11275E-11	1,02345	2,70972E-11	1,42458E-11	1,90212
11	1,47115E-11	1,47569E-11	0,99692	1,64475E-11	1,3476E-11	1,2205	1,49993E-11	1,81593E-11	0,82598
12	2,06337E-11	2,02247E-11	1,02022	2,03692E-11	1,70988E-11	1,19126	2,27228E-11	1,54389E-11	1,47179
Ø			1,01896 ± 0,028			1,16232 ± 0,06179			1,28068 ± 0,59991

Tabelle 8.5: Die Kapazitätsmessungen zwischen Biasring und Rückseite bei 400 V Versorgungsspannung vor der Bestrahlung (v.B.) und nach der Bestrahlung (n.B.)

Region	FZ320Y-04-Mpix-2			FZ320P-07-Mpix-1			FZ320N-03-Mpix-2		
	22°C v.B.	-20°C n.B.	Steigfaktor	22°C v.B.	-20°C n.B.	Steigfaktor	22°C v.B.	-20°C n.B.	Steigfaktor
1	2,032222E-11	1,072667E-7	5278	1,803333E-11	2,293222E-7	12717	2,046667E-11	1,249333E-7	6104,2319
2	1,736667E-11	1,049111E-7	6041	-	2,570111E-7	-	1,564000E-11	1,156556E-7	7394,85934
3	1,504444E-11	9,073333E-8	6031	1,315556E-11	1,617000E-7	12291	1,388000E-11	1,098222E-7	7912,26225
4	1,352222E-11	8,851111E-8	6546	1,426667E-11	1,548333E-7	10853	1,190667E-11	1,018222E-7	8551,69413
5	1,130000E-11	7,513333E-8	6649	9,266667E-12	1,313889E-7	14179	1,089333E-11	2,024667E-7	18586,30006
6	1,014444E-11	7,196667E-8	7094	7,733333E-12	1,112333E-7	14384	1,289333E-11	8,496666E-8	6589,97016
7	0,900000E-11	5,475889E-8	6084	7,622223E-12	5,764333E-8	7563	7,480000E-12	8,496666E-8	11359,17914
8	6,122223E-12	5,220222E-8	8527	7,766667E-12	6,734333E-8	8671	1,712000E-11	3,979222E-8	2324,31192
9	7,533333E-12	4,486667E-8	5956	6,477777E-12	5,644111E-8	8713	5,833333E-12	5,677222E-8	9732,38113
10	4,88889E-12	4,260778E-8	8715	5,622223E-12	5,659667E-8	10067	1,380000E-11	3,823667E-8	2770,77319
11	6,688890E-12	3,614111E-8	5403	9,366667E-12	4,928778E-8	5262	-	4,809778E-8	-
12	4,233333E-12	3,459889E-8	8173	-	4,114778E-8	-	4,204000E-11	4,115667E-8	978,98834
Ø			6708 ± 1178			10470 ± 2795			7482 ± 4884

Tabelle 8.6: Die Pixelleckstrommessungen bei 500 V Versorgungsspannung vor der Bestrahlung (v.B.) und nach der Bestrahlung (n.B.)