

IEKP-KA/2009-27

ENTWICKLUNGEN FÜR
NEUE SILIZIUMSTREIFEN-
SENSOREN UND DEREN
QUALITÄTSKONTROLLE

JOACHIM ERFLE

Diplomarbeit

Institut für Experimentelle Kernphysik
AN DER FAKULTÄT FÜR PHYSIK
DER UNIVERSITÄT KARLSRUHE (TH)

Referent: Prof. Dr. Thomas Müller
Korreferent: Prof. Dr. Wim De Boer

29. September 2009

Joachim Erfle:
Entwicklungen für neue Siliziumstreifensensoren und deren Qualitätskontrolle
September 2009

INHALTSVERZEICHNIS

I	EINFÜHRUNG UND THEORETISCHE GRUNDLAGEN	1
1	LHC	5
1.1	Large Hadron Collider (LHC)	5
1.1.1	Compact Muon Solenoid (CMS)	6
1.1.2	Spurdetektor	7
1.2	Super-LHC	8
1.2.1	CMS-Tracker - Upgrade	8
2	HALBLEITER	11
2.1	Material	11
2.1.1	Gitterstruktur	11
2.1.2	Elektronen und Löcherleitung	12
2.1.3	Bändermodell	12
2.1.4	Fermienergie	12
2.1.5	Intrinsischer Halbleiter	14
2.1.6	Dotierung	15
2.1.7	pn-Übergang	17
2.2	Silizium als Detektor	21
2.2.1	Aufbau eines Streifensensors	21
2.2.2	Elektrische Kenngrößen	22
2.3	Strahlenschäden	24
2.3.1	Die Entstehung	24
2.3.2	Die Auswirkungen	24
2.3.3	Das Annealing	25
II	ENTWURF VON SENSOREN UND TESTSTRUKTUREN	27
3	HERSTELLUNGSVERFAHREN VON SILIZIUMSTREIFENSSENSOREN	29
3.1	Herstellung von Siliziumstreifenssensoren	29
4	WEITERENTWICKLUNG EINES WERKZEUGS ZUM ERSTELLEN VON MASKEN-DATEN	33
4.1	Zeichnen einer Diode mit LayoutEditor	33
4.1.1	Das Via	34
4.1.2	Eine spezielle Ecke	36
4.1.3	Ein Rechteck mit speziellen Ecken	37
4.1.4	Eine Anordnung von Außenringen	38
4.1.5	Die Diode	39
4.1.6	Weitere Entwicklungen	39
5	ENTWICKLUNGEN VON STRUKTURLAYOUTS	41
5.1	Im Sensor integrierter Pitchadapter	41
5.1.1	Nicht-abgewinkelter Pitchadapter	42
5.1.2	Einfach abgewinkelter Pitchadapter, Variante 1	43
5.1.3	Einfach abgewinkelter Pitchadapter, Variante 2	44
5.1.4	Einfach abgewinkelter Pitchadapter, Variante 3	45
5.1.5	Einfach abgewinkelter Pitchadapter, Variante 3, mit auseinandergezogenem Auslesefeld	46
5.1.6	Minisensoren mit integrierten Pitchadaptern	47
5.1.7	Schlussfolgerung	48
5.2	Weitere Strukturen	48

III ENTWICKLUNG UND REALISIERUNG EINER VOLLAUTOMATISCHEN PROBESTATION	
	51
6	PROBESTATION - HARDWARE 53
6.1	Die Anforderungen an eine Teststation zur Entwicklung und Qualitätsprüfung von Siliziumsensoren 53
6.2	Übersicht über den Aufbau der gesamten Teststation 54
6.3	Dämpfungssystem 55
6.4	Übersicht über den Aufbau der Probestation 55
6.5	Die Verfahrtsche 55
6.6	Die Mikromanipulatoren 56
6.7	Kühlbarer Jig 56
6.7.1	Das Peltier-Element 56
6.7.2	Aufbau 56
6.7.3	Kühlgerät 56
6.7.4	Sicherungssysteme 57
6.8	Das Mikroskop 57
6.9	Luftfeuchteschott 57
6.10	Relais 58
6.11	Manuelles Verfahrssystem fürs Mikroskop 58
6.12	Trägerstruktur und Hülle 58
6.13	Seitentisch 59
6.14	Tür 59
6.15	LED-Ringlicht mit infraroten und weissen LEDs 60
6.16	Die Geräte 61
7	PROBESTATION - SOFTWARE 63
7.1	Anforderungen an das Steuerungsprogramm 63
7.2	UML-Diagramme 64
7.3	Übersicht über den Aufbau 64
7.4	Übersicht über den Ablauf des Hauptprogramms 66
7.5	Temperaturkontrolle 66
7.6	Verfahrtschsteuerung 70
7.7	Sequenzen 70
7.7.1	Überblick über die Sequenzen 70
7.7.2	Verwaltung der Sequenzen 72
7.7.3	Lese Sequenz 73
7.7.4	Sequenzschritt speichern 73
7.7.5	Sequenzschritt starten 75
7.8	Messungen 75
7.8.1	IV/CV-Messung 76
7.8.2	Streifenmessung 78
7.9	Speichern der Daten 80
8	KALIBRATIONSMESSUNGEN ZWISCHEN DER ALTEN UND DER NEUEN PROBESTATION 81
8.1	Messungen der globalen Charakteristika des Minisensors 81
8.2	Messungen der Streifenwerte 83
8.3	Messung des Stroms über der Zeit 89
9	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK 91

IV ANHANG	93
A TECHNISCHE ZEICHNUNGEN DER PROBESTATION	95
DANKSAGUNG	97
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	99
LITERATURVERZEICHNIS	100

Teil I

EINFÜHRUNG UND THEORETISCHE GRUNDLAGEN

EINLEITUNG

Am CERN wurde mit dem LHC das größte Teilchenphysikexperiment der Welt gebaut. Jetzt, da dieses kurz davor steht seine Arbeit aufzunehmen, laufen schon die Planungen für eine Erweiterung zum SLHC. Diese beinhaltet hauptsächlich eine Erhöhung der Luminosität, um die Anzahl statistisch relevanter Ereignisse zu erhöhen. Diese erhöhte Luminosität stellt auch die einzelnen Experimente vor neue Herausforderungen. So muss bei CMS unter anderem, ein neuer Spurdetektor gebaut werden, der die benötigte Strahlenhärte aufweist und mit der erhöhten Datenrate zurechtkommt.

Dazu müssen neue Siliziumsensoren entwickelt werden, deren Material und Struktur eine hohe Strahlenhärte, sowie eine niedrigere Kanalbelegung, zum Beispiel durch eine höhere Anzahl kürzerer Auslestreifen, aufweist.

Für die Entwicklung neuer Strukturen habe ich ein quelloffenes Programm an unsere Bedürfnisse zur Entwicklung von Sensoren und Teststrukturen angepasst. Dadurch wird es möglich, eigene Designs zu erstellen, produzieren zu lassen und zu untersuchen. Dies vereinfacht die Entwicklung neuer Strukturen, da genau gezeichnet werden kann, was für eine Struktur gewünscht ist, so dass es zu keinen Missverständnissen oder Fehlinterpretationen durch den Hersteller kommt. Mit diesem Programm habe ich im Rahmen der Diplomarbeit auch einige Strukturen gezeichnet, die in Zukunft produziert und untersucht werden sollen.

Um diese Untersuchungen durchführen zu können, wurde im Rahmen dieser Diplomarbeit eine Teststation gebaut, die es ermöglicht Messungen bei Temperaturen bis -30°C , sowie weitestgehend automatisiert durchzuführen. Diese Teststation ermöglicht:

- Die Qualitätskontrolle während der Produktion von Sensoren.
- Die Endkontrolle der Sensoren.
- Die Untersuchung der Charakteristika bestrahlter Sensoren und Teststrukturen, um geeignete Materialien zu finden.
- Die Untersuchung der Charakteristika verschiedener neuer Strukturen, um geeignete Sensor-Layouts zu finden.

LHC

1.1 LARGE HADRON COLLIDER (LHC)

Der LHC ist ein Beschleunigerring mit einem Umfang von ca. 27 km am CERN¹. Durch eine Reihe von Vorbeschleunigern (Linac2 (50 MeV), Booster (1,4 GeV), PS (28 GeV), SPS (450 GeV)) werden Protonen in entgegengesetzten Richtungen in den LHC eingeschossen (siehe Abbildung 1). Dort werden sie weiter auf bis zu 7 TeV pro Strahl beschleunigt. Daraus ergibt sich eine Schwerpunktsenergie von 14 TeV. An den vier Kollisionspunkten stehen die Experimente ALICE, ATLAS, CMS und LHCb. Die Protonen im Ring sind in Paketen, sogenannten Bunches zusammengefasst, von denen ca. 2800 gleichzeitig im Ring sind. Ein Bunch umkreist den Ring in einer Sekunde ca. 11000 mal. Daraus resultiert eine Rate von ca. 40 MHz mit jeweils ca. 20 Kollisionen. Daraus ergeben sich also ca. 800 Millionen Kollisionen pro Sekunde.

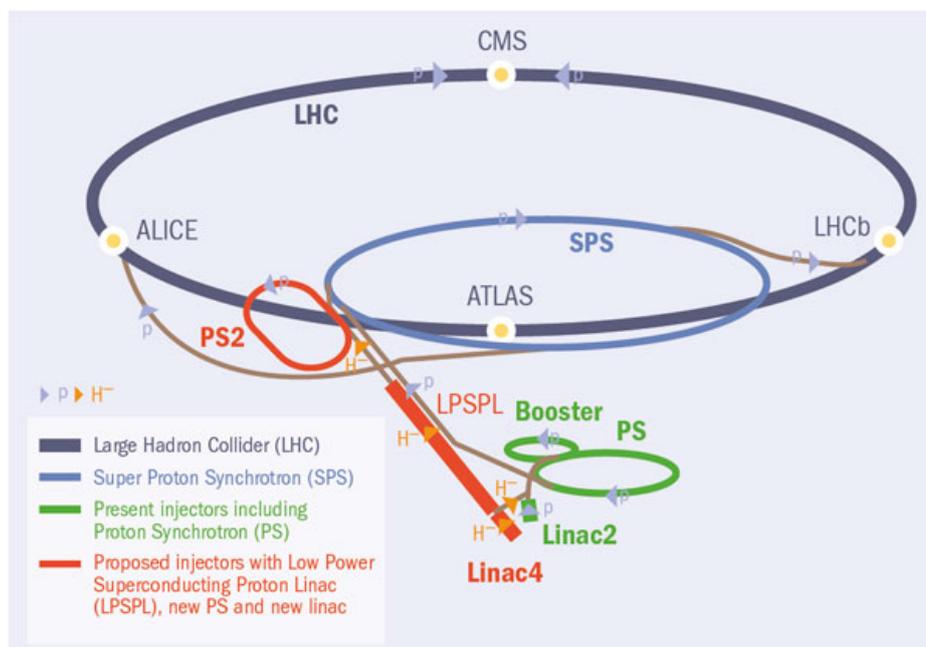


Abbildung 1: LHC und SLHC-Schema [ELo8]

Die vier verschiedenen Experimente sind[CERo8]:

- ALICE ist ein spezieller Detektor um Schwer-Ionen Kollisionen zu erforschen. Durch diese Art von Kollisionen soll ein Quark-Gluon Plasma erzeugt werden, das die Bedingungen im frühen Universum nachstellen soll.
- ATLAS und CMS sind Universal-Detektoren zur Untersuchung der Proton-Proton Kollisionen. Sie sollen unter anderem das Higgs-Boson finden und nach SUSY und extra Dimensionen suchen.

¹ CERN: Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, dt.: Europäische Organisation für Kernforschung

Auch wenn beide Detektoren die gleiche Zielsetzung haben, unterscheiden sie sich in ihrer technischen Umsetzung. Dadurch sind sie in der Lage, die Messungen unterschiedlich durchzuführen und die Ergebnisse des anderen zu überprüfen.

- LHCb ist ein spezieller Detektor zur Untersuchung der Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie in B-Mesonen. Im Gegensatz zu den anderen Detektoren ist LHCb nicht symmetrisch, aufgebaut sondern deckt nur eine Richtung entlang des Strahlrohrs ab.

1.1.1 Compact Muon Solenoid (CMS)

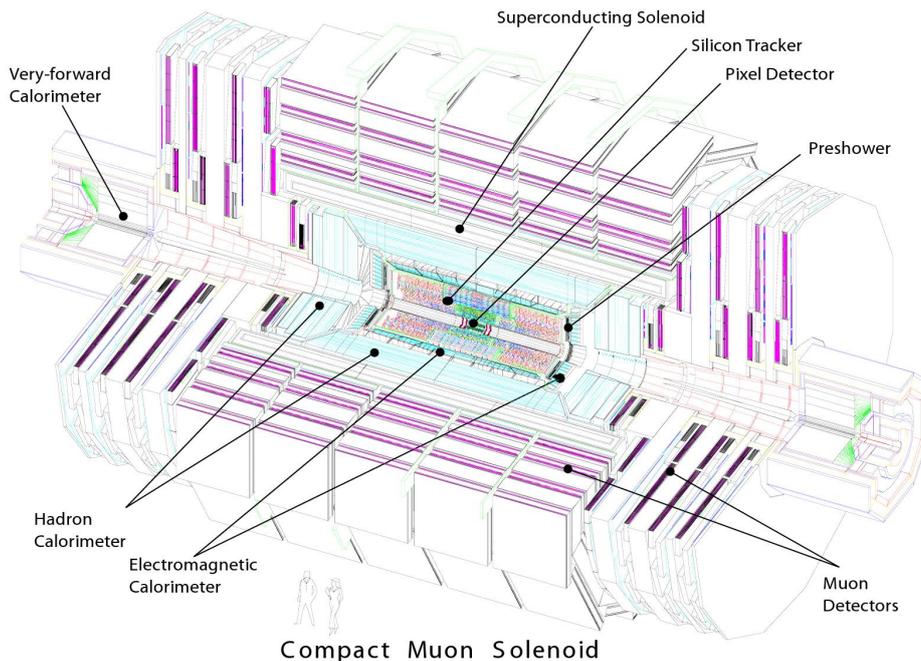


Abbildung 2: Ansicht des CMS [Aeo6]

Der Compact Muon Solenoid besteht, wie in Abbildung 2 zu sehen, aus

- Pixel-Detektor: bestehend aus drei Lagen im Barrel² und je zwei Lagen in den Endkappen. Ein Pixel hat dabei eine Größe von $100 \times 150 \mu\text{m}^2$. Der Pixeldetektor dient, dazu die Bahnen der Teilchen sehr präzise zu bestimmen. Dazu muss er strahlenhart, schnell auszulesen und hochauflösend sein.[Aeo6]
- Streifen-Detektor: bestehend aus einem Barrel mit zehn Lagen Sensoren, die zylindrisch um das Strahlrohr angeordnet sind, drei inneren Endkappen und neun äußeren Endkappen. Die verwendeten Sensoren bestehen aus Streifen mit einem Abstand von 80 bis 183 μm . Ein Modul besteht aus einem oder mehreren Sensoren, der Ausleseelektronik und sonstigem Zubehör (wie der mechanischen Befestigung). Insgesamt sind 15148 Module verbaut.[Sato8]
- Elektromagnetisches Kalorimeter (ECAL): bestehend aus 61200 Blei-Wolframat-Kristallen (PbWO_4) im Barrel und 7324 je Endkappe. Durch Verwendung dieses

² der Zylindrische Längsteil

Materials ergibt sich die Möglichkeit ein kompaktes, hochauflösendes, schnelles und strahlenhartes ECAL innerhalb des Magneten zu bauen. Elektronen oder Photonen erzeugen hier elektromagnetische Schauer. Diese werden mit Glasfasern aus dem Detektor zur Ausleseelektronik geleitet.[Aeo6]

- Hadronkalorimeter (HCAL): bestehend aus abwechselnden Schichten von Messing als Absorber-Material und Plastikszintillatoren. Das Licht, das von Hadronenschauern im Szintillator erzeugt wird, wird mittels Glasfasern aus dem Detektor zur Ausleseelektronik geleitet.[Aeo6]
- Supraleitender Solenoid-Magnet: bestehend aus supraleitenden Niob-Titan Spulen, die ein homogenes 3,8T Magnetfeld erzeugen. Mit Hilfe des Magnetfeldes werden die geladenen Teilchen auf eine gekrümmte Bahn gezwungen, die durch den Spurdetektor sichtbar wird. Diese Kreisbahn ist notwendig um den Impuls der Teilchen zu bestimmen.[Aeo6]
- Muon-System mit dem Rückführjoch: bestehend aus verschiedenen Arten von Gasedektoren, die zwischen den Streben des Eisenjochs sitzen. Da hier im Rückführbereich des Magnetfeldes dieses fast 2T beträgt, kann auch hier mittels gekrümmter Bahn der Impuls der Myonen bestimmt werden.[Aeo6]

1.1.2 Spurdetektor

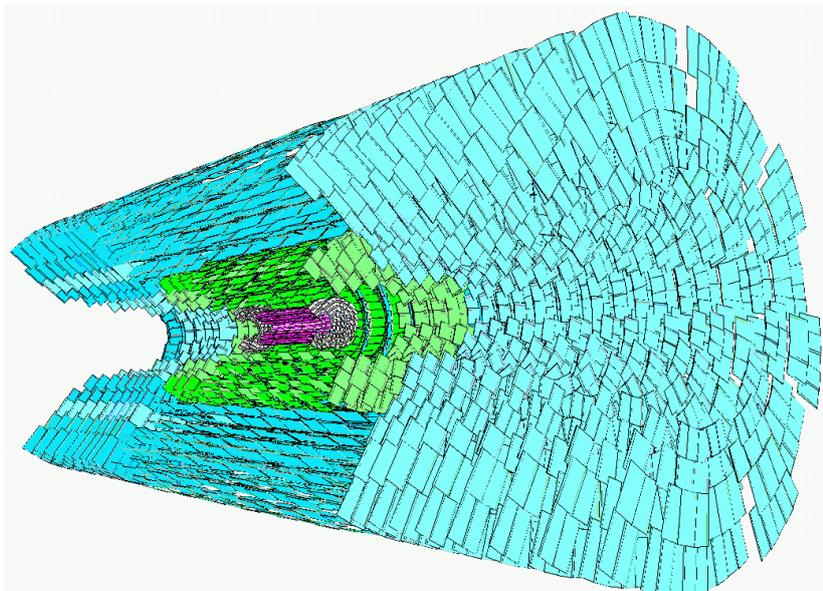


Abbildung 3: Schematische Ansicht des CMS-Spurdetektors [Zit09]

Der Spurdetektor³ (siehe Abbildung 3) setzt sich im Barrel-Bereich aus drei Lagen Pixel- und aus zehn Lagen Streifensensoren zusammen. Am Ende des Zylinders kommen dann nochmal zwei Lagen Pixel-, neun Lagen Streifen- und im inneren Bereich drei Lagen Streifensensoren dazu. Die innerste Pixellage hat einen Abstand von 4,4cm vom Wechselwirkungspunkt. Zusammen mit der hohen Auflösung der Sensoren (bis zu 10 μ m) kann so die Flugbahn der Teilchen bis zurück zur Wechselwirkung genau rekonstruiert werden.[Aeo6].

³ engl. Tracker

1.2 SUPER-LHC

Ziel der Erweiterung des LHC, dem SLHC, ist es die Luminosität und damit die Statistik zu erhöhen. Dadurch können dann einerseits bereits mit dem LHC entdeckte Effekte genauer vermessen werden, andererseits können aber auch Effekte mit sehr kleinem Wirkungsquerschnitt erst mit Hilfe hoher Statistik entdeckt werden.[ELo8]

Damit diese um Faktor zehn erhöhte Luminosität erreicht werden kann, müssen verschiedene Verbesserungen am LHC-Gesamtsystem (siehe Abbildung 1) vorgenommen werden. Einige Möglichkeiten dazu sind:

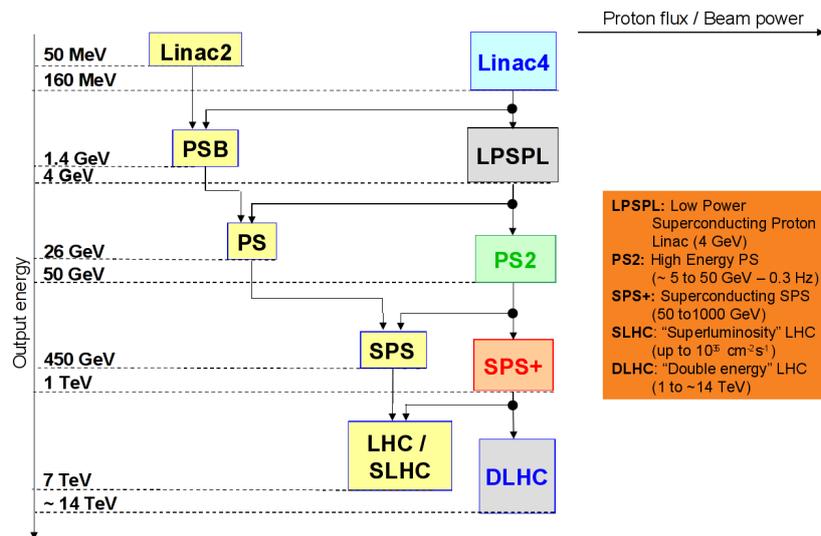


Abbildung 4: Vorbeschleuniger Upgrade Übersicht
auf der linken Seite sind die aktuell verwendeten Beschleunigersystem aufgeführt, auf der Rechten mögliche Nachfolger.[Evao8]

- Austausch der Fokussiermagnete um die Luminosität zu verdoppeln.[Evao8]
- Das System von Vorbeschleunigern (wie in Abbildung 4) soll zum Teil ausgetauscht werden, um Flaschenhälse aufgrund alter Technologie zu beheben. Dadurch soll die Luminosität auch noch einmal verdoppelt werden.
 1. Ersetzen von Linac2 (50 MeV Protonen) durch Linac4 (160 MeV H⁻ Ionen).
 2. Der Booster und das PS sollen durch eine Verbesserung des Linac4 (LPSPL, einige GeV) und ein neues Synchrotron (PS2, 50 GeV) ersetzt werden.
 3. Der SPS soll vorerst beibehalten werden.
- Die Anzahl von Bunches⁴ oder die Anzahl der Protonen pro Bunch soll verdoppelt werden.

1.2.1 CMS-Tracker - Upgrade

Die veränderte Anforderung an den CMS-Detektor durch das Upgrade zum SLHC ist zum einen, dass die erhöhte Datenrate verarbeitet werden muss und zum anderen CMS der höheren Strahlungsbelastung standhalten muss. Dabei sind die Anforderungen

⁴ Ein Bunch ist ein Protonenpaket, bestehend aus $1,1 \times 10^{11}$ Protonen. Diese Bunches, von denen 2808 im Umlauf sind, sind die Einheiten, in denen der Protonenstrahl gehandhabt wird.[CERo8]

an den Tracker am Größten, da er am nächsten am Wechselwirkungspunkt liegt und damit der höchsten Strahlungsintensität widerstehen muss. Dazu muss der Tracker neu entworfen und gebaut werden. Zudem muss die Anzahl der Kanäle erhöht werden, da pro Ereignis nur 1 – 2% getroffen werden dürfen, da ein getroffener Streifen für eine gewisse Zeit keine neuen Signale aufnehmen kann.[Halo8]

Die Anforderungen an den neuen Tracker sind:

1. Ein Energieverbrauch, der den des aktuellen Trackers nicht signifikant übersteigt.
2. Ein besseres Kühlsystem.
3. Ein schnelles Triggersystem.
4. Ein niedrigeres sogenanntes material budget, also weniger Material bzw. Material mit geringerer Dichte. Dies ist wünschenswert, da im Material unerwünschte Streuung auftritt.
5. Eine niedrige Kanalbelegung bzw. eine hohe Anzahl von Kanälen.

[CECo8] Die Entwicklungsarbeit geht in die Richtung die Sensoren aus anderem Material herzustellen, welches eine größere Strahlungshärte aufweist. Dazu werden eine Reihe von Teststrukturen auf verschiedenen Materialien und Dotierungen produziert und charakterisiert. Gleichzeitig werden neue Strukturen entwickelt, um eine größere Anzahl von Kanälen zu erhalten.

HALBLEITER

In den derzeit entwickelten Spurdetektoren kommen vorwiegend Halbleiter-Detektoren zum Einsatz. Dies liegt in den vielfältigen Vorteilen dieser Materialien begründet:[Kra09]

1. Halbleiter haben, im Vergleich zu Gasdetektoren, eine hohe Dichte. Dadurch ist der Energieverlust auf einer kurzen Strecke relativ hoch. Die erzeugten Ladungsträger können auch schneller zur Auslese gebracht werden.
2. Halbleitersensoren haben im Vergleich zu Gasdetektoren auch eine höhere Auflösung und eine höhere Teilchendichte.
3. Es werden nur wenige eV pro Elektron-Loch-Paar an Ionisationsenergie benötigt. Damit kann mit wenig Energie ein relativ großes Signal erzeugt werden.
4. Die Herstellungsverfahren sind stark verwandt mit denen der IT-Industrie, wodurch Kosten gesenkt werden können.
5. Bei Silizium könnten die Ausleselektronik und der Detektor aus dem gleichen Material hergestellt werden, was eine höhere Integration ermöglichen würde.
6. Silizium hat eine relativ hohe intrinsische Strahlungshärte.

2.1 MATERIAL

2.1.1 Gitterstruktur

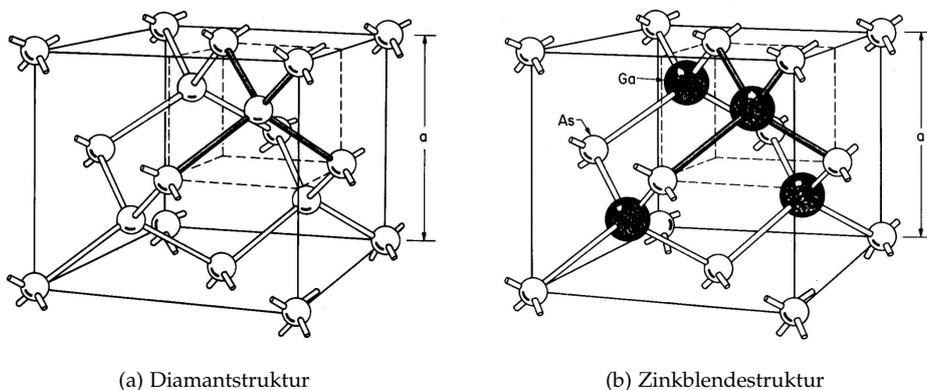


Abbildung 5: Gitterstruktur von Halbleitern.

Halbleiter der IV. Hauptgruppe weisen eine Diamantstruktur auf, wohingegen III-V-Halbleiter meistens eine Zinkblendestruktur haben. [Sze81]

Silizium und Germanium sind wie Kohlenstoff (Diamant) Elemente der IV. Hauptgruppe und kristallisieren alle in der Diamant-Struktur. Diese besteht im Prinzip aus zwei ineinandergeschobenen fcc¹-Gittern (siehe Abbildung 5a). Die III-V-Verbindungshalbleiter kristallisieren dagegen meistens in der Zinkblendestruktur. Diese besteht, analog zur Diamantstruktur aus zwei fcc-Gittern, wobei der eine Atomtyp (z.B. Gallium) auf dem einen und der andere Typ (z.B. Arsen) auf dem anderen Gitter sitzt (siehe Abbildung 5b). Im Folgenden wird nur noch das Material Silizium betrachtet, da es im Detektorbau den bei weitem wichtigsten Platz einnimmt.

¹ fcc: face centered cubic (dt.: Kubisch Flächenzentriert)

2.1.2 Elektronen und Löcherleitung

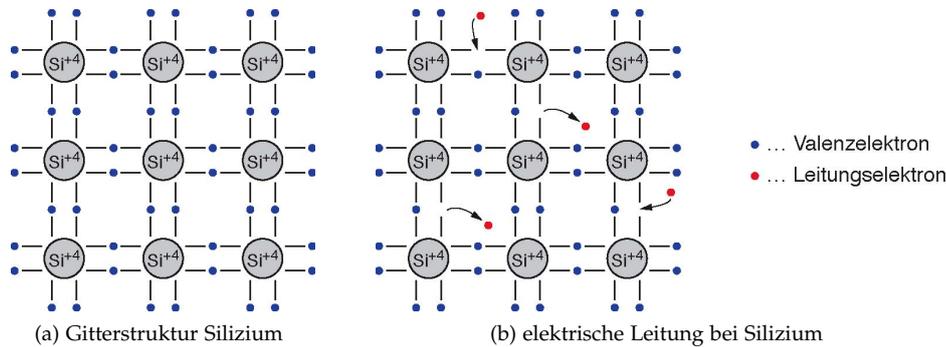


Abbildung 6: Gitterstruktur von Silizium mit Valenz- und Leitungselektronen. [Kra09]

Bei $T = 0\text{K}$ gilt für Halbleiter, dass sie Isolatoren sind. Die Leitfähigkeit ergibt sich folgendermaßen:[Kra09]

1. Im Grundzustand bilden zunächst alle 4 Elektronen eines Silizium-Atoms die kovalente Bindung (siehe Abbildung 6a).
2. Bei höheren Temperaturen brechen dann einige dieser Bindungen auf und die Elektronen führen zur elektrischen Leitfähigkeit (Elektronenleitung).
3. Die zurückbleibenden Fehlstellen können durch andere Elektronen aus der Nachbarschaft besetzt werden, wobei hier das Loch von einem Atom zum nächsten wandert. (Löcherleitung) (siehe Abbildung 6b).

2.1.3 Bändermodell

Bei der großen Anzahl von Atomen in einem Festkörper gibt es auch eine große Anzahl von möglichen Energie-Zuständen der Elektronen. Da sich die Bloch-Wellenfunktionen der Elektronen überlappen und diese nicht mehr einzeln voneinander zu trennen sind, werden diese Energiezustände zu Bändern zusammengefasst. Jedes dieser Bänder hat, aufgrund des Pauli-Prinzips, eine endliche Anzahl von Zuständen die, von Elektronen besetzt werden können.

Vollständig gefüllte Bänder spielen praktisch keine Rolle, da ihre Elektronen, um einen unbesetzten Zustand im Leitungsband zu erreichen, sehr viel Energie aufbringen müssten. Deshalb ist es ausreichend das oberste gefüllte Band, das sogenannte Valenzband-, sowie das unterste nicht gefüllte Band, das sogenannte Leitungsband, zu betrachten.

Die wichtigste Größe im Bändermodell ist der Abstand zwischen dem Valenzband und dem Leitungsband, die Bandlücke E_g . Diese drückt die Energie aus, die nötig ist, um ein Elektron vom Valenz ins Leitungsband zu befördern. Deshalb kann anhand der Bandlücke auch die Einteilung von Materialien in die Klassen Isolator ($E_g > 5\text{eV}$), Halbleiter ($0 < E_g < 3\text{eV}$) und Metall ($E_g = 0$) gemacht werden. (siehe Abbildung 7) [Sze81]

2.1.4 Fermienergie

Die Fermi-Dirac-Verteilungsfunktion

$$F(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-E_F}{kT}}}$$

mit der Boltzmannkonstanten k , der Temperatur T sowie der Fermi-Energie E_F , gibt bei Fermionen wie dem Elektron die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein Zustand mit der

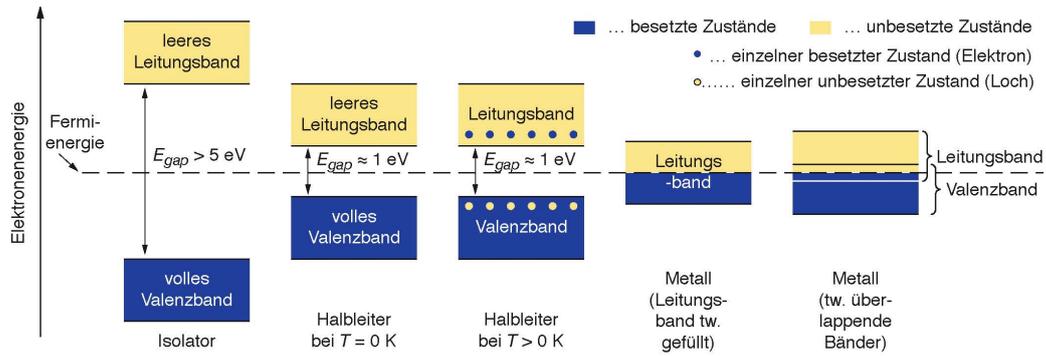


Abbildung 7: Bändermodell für verschiedene Materialklassen von Links nach Rechts sind hier der Isolator mit einer Bandlücke von über 5eV, zweimal der Halbleiter mit einer Bandlücke zwischen 0 und 3eV, sowie zweimal das Metall, dessen Leitungs- und Valenzband überlappen, das also eine Bandlücke von 0eV hat, zu sehen.[Krao9]

Energie E besetzt ist. Bei einer Temperatur von $T = 0\text{K}$ ist $F(E)$ eine Stufenfunktion mit der Stufe an der Stelle von E_F . Im Allgemeinen ist die Fermi-Energie E_F die Energie, bei der $F(E) = 0,5$ ist. (siehe Abbildung 8)

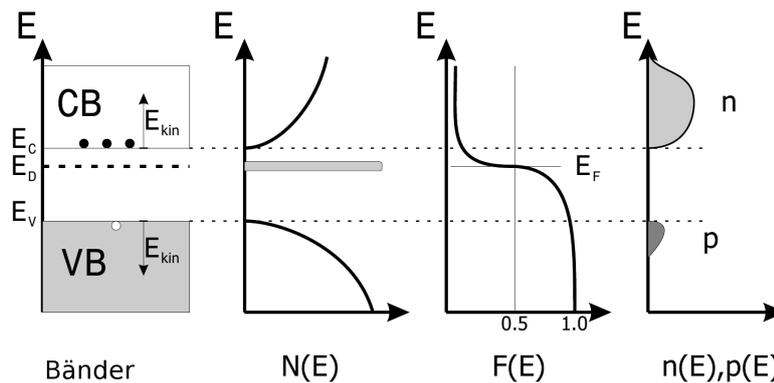


Abbildung 8: Die Bandlücke im Halbleiter Von Links nach Rechts sind die Bandlücke im Bändermodell, die Zustandsdichte $N(E)$, die Besetzungswahrscheinlichkeit $F(E)$ sowie die Ladungsträgerdichten $n(E)$ und $p(E)$ zu sehen[Dieo3]

Während die Fermi-Energie bei Metallen im Leitungsband liegt, liegt sie im Halbleiter und bei Isolatoren in der Bandlücke. Dies führt dazu, dass sich bei $T = 0\text{K}$ keine freien Ladungsträger im Leitungsband befinden. Erst bei einer Erhöhung der Temperatur steigt die Anzahl der freien Ladungsträger langsam an, bis zu einem Sättigungsbereich. Dieser Anstieg wird durch Störstellen im Kristall dominiert. Ab einer bestimmten Temperatur sind alle Störstellen erschöpft, was zu einer Sättigung der Anzahl freier Ladungsträger führt. Wird die Temperatur noch weiter erhöht, werden mittels Paarbildung neue freie Ladungsträger erzeugt. (siehe Abbildung 9) [Goso8]

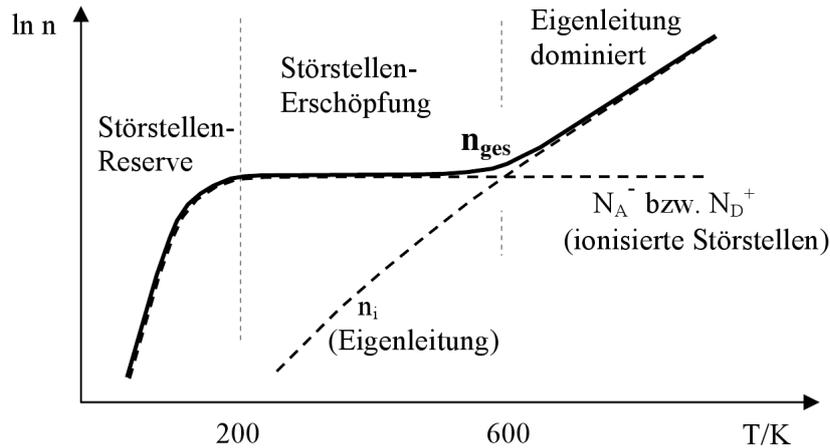


Abbildung 9: Die Ladungsträgerkonzentration im Halbleiter in Abhängigkeit der Temperatur
 Bei $T = 0\text{K}$ ist keine thermische Energie vorhanden, die freie Ladungsträger erzeugen könnte. Bei steigender Temperatur steht immer mehr Energie für die Paarbildung aus Löchern und Elektronen einerseits und der Anregung von Ladungsträgern aus Störstellen zur Verfügung. Zu Anfang dominiert die Störstellenleitung, bis bei einer bestimmten Temperatur alle Ladungsträger aus den Störstellen angeregt sind. Nach einem Bereich fast konstanter Ladungsträgerkonzentration wird die Eigenleitung mittels Paarbildung immer stärker und dominiert diese. [Goso8]

2.1.5 Intrinsischer Halbleiter

Durch die Wärmebewegung, die statistisch auf die Atome und Elektronen verteilt wird, kommt die sogenannte Paarbildung zustande. Dabei haben einige Elektronen genug Energie um aus ihrer Bindung auszubrechen. Bei Silizium sind dafür 1,1 eV erforderlich. Diese Elektronen hinterlassen eine Fehlstelle, die durch ein benachbartes Elektron gefüllt werden kann, allerdings hinterlässt dieses eine neue Fehlstelle. Durch diesen Effekt ergibt sich, bei einem elektrischen Feld, die sogenannte Löcherwanderung oder auch Löcherleitung. Es resultieren also aus der thermischen Energie Paare aus Löchern und freien Elektronen, die die Leitfähigkeit des Halbleiters (auch Eigenleitung genannt) erhöhen.

Freie Elektronen können auch wieder mit einem Loch rekombinieren. Dieser Prozess der Rekombination hängt, genauso wie die Paarbildung, von der Temperatur ab. Für jede Temperatur stellt sich nach einiger Zeit ein Gleichgewicht zwischen der Paarbildung und der Rekombination ein. Man spricht vom intrinsischen Halbleiter bzw. vom intrinsischen Fall. [Goso8]

Die intrinsische Ladungsträgerdichte ergibt sich wie folgt:

$$n = N_C \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{1/2} \left(\frac{E_F - E_C}{kT} \right) \quad p = N_V - \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{1/2} \left(\frac{E_V - E_F}{kT} \right)$$

Im nichtentarteten Fall lässt sich dies weiter zu:

$$n = N_C \exp \left(-\frac{E_C - E_F}{kT} \right) \quad p = N_V \exp \left(-\frac{E_F - E_V}{kT} \right)$$

vereinfachen. Im intrinsischen Fall lässt sich dies noch weiter vereinfachen:

$$np = n_i^2 = N_C N_V \exp(-E_g/kT)$$

Dabei sind N_C und N_V die Zustandsdichten des Leitungs- bzw. Valenzbandes, $F_{1/2}$ die Fermi-Dirac-Verteilung, E_F die Fermi-Energie, E_C und E_V die Unterkante des Leitungs- bzw. die Oberkante des Valenzbandes, E_g die Bandlücke und n_i die intrinsische Ladungsträgerkonzentration. [Sze81]

2.1.6 Dotierung

Bevor die Temperatur einen bestimmten Wert übersteigt, spielt die intrinsische Leitung jedoch nur eine sehr kleine Rolle (siehe Abbildung 9). In diesem unteren Temperaturbereich wird die Leitfähigkeit durch Störstellen im Kristallgitter erzeugt. Falls z.B. an der Position eines Siliziumatoms stattdessen ein fünfwertiges Boratom sitzt, können vier Elektronen zur Bindung verwendet werden und ein Elektron wird leicht zu einem freien Ladungsträger (siehe Abbildung 10). Das fünfwertige Fremdatom wird Donator genannt, da es ein Elektron abgibt (donare = geben).

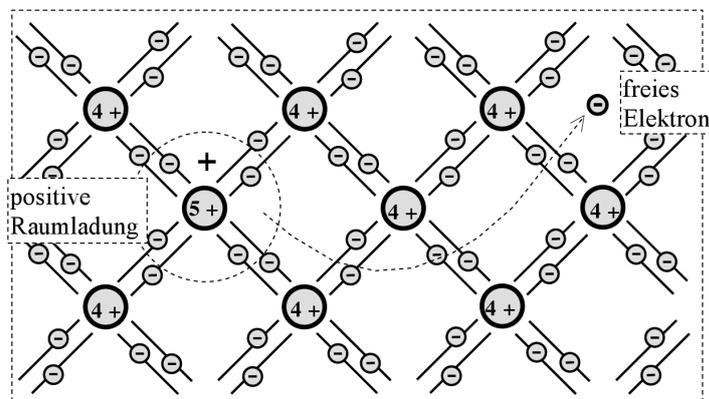


Abbildung 10: Fünfwertiges Fremdatom (z.B. Bor)

Ein Atom mit fünf Elektronen kann im Gitter trotzdem lediglich vier Bindungen eingehen. Dies führt dazu, dass das überzählige Elektron nur sehr schwach gebunden ist und dadurch leicht ins Leitungsband angeregt werden kann. [Goso8]

Sitzt stattdessen ein dreiwertiges Fremdatom (z.B. Phosphor) auf dem Platz eines Siliziumatoms, kann das Atom nur drei Bindungen eingehen. In der vierten Bindung bleibt ein Platz frei. Dieser Platz kann nun von einem Elektron aus einer benachbarten Bindung eingenommen werden. Es entsteht Löcherleitung. (siehe Abbildung 11). Das dreiwertige Fremdatom wird Akzeptor genannt, da es ein Elektron aufnimmt (accipere = an sich nehmen). [Goso8]

Wenn man nun gezielt Fremdatome ins Kristallgitter einbringt, können damit die elektrischen Eigenschaften des Materials gezielt beeinflusst werden. Dieser Vorgang wird als Dotierung bezeichnet.

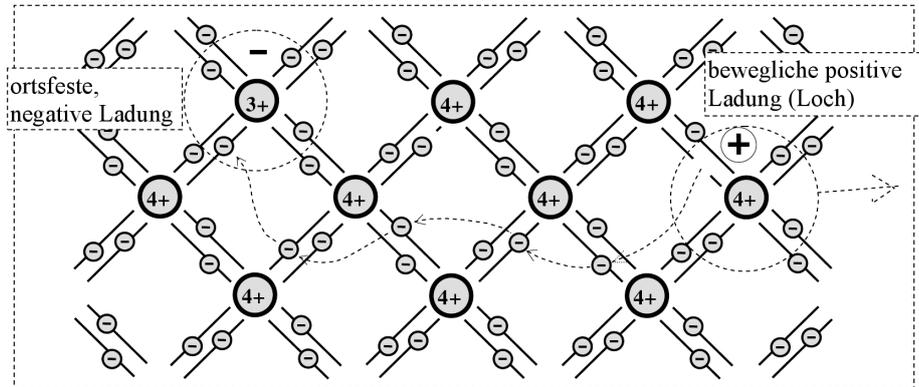


Abbildung 11: Dreiwertiges Fremdatom (z.B. Phosphor)

Wird ein Atom mit drei Elektronen ins Gitter eingebracht, so könnte es vier Bindungen eingehen, hat aber nur drei Elektronen zur Verfügung. Allerdings kann ein benachbartes Elektron diesen Platz füllen. Dadurch ist aber die ursprüngliche Position des Elektrons frei, welche wieder von einem Nachbar besetzt werden kann. Damit wandert ein positiver Ladungsträger, ein Loch, durchs Gitter. [Goso8]

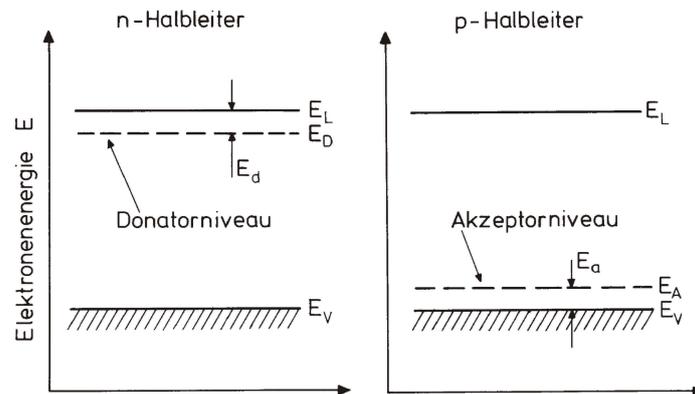


Abbildung 12: Donator- und Akzeptorniveaus im dotierten Halbleiter [IL99]

Durch die Dotierung werden neue Niveaus in die Bandlücke eingefügt (siehe Abbildung 12). Dabei werden Elektronen aus dem Donatorniveau ins Leitungsband bzw. Elektronen aus dem Valenzband auf das Akzeptorniveau angehoben. Dies führt dazu, dass die Fermi-Energie E_F , die bei $T = 0\text{K}$ in der Mitte der Bandlücke liegt, angehoben bzw. abgesenkt wird. [Goso8]

2.1.7 pn-Übergang

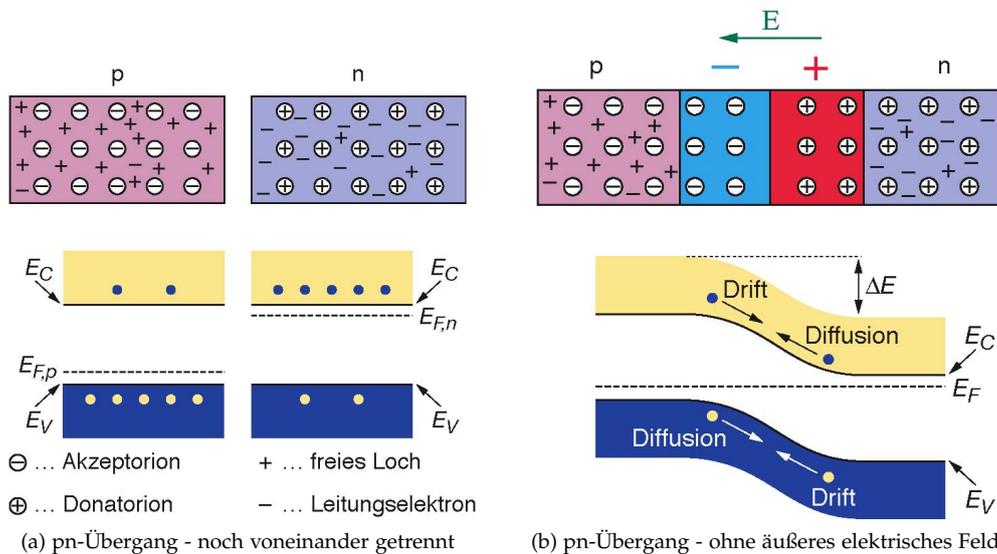


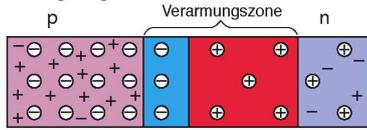
Abbildung 13: Ausbildung eines pn-Übergangs

Auf der linken Seite sind zwei unterschiedlich dotierte Halbleiter zu sehen, die voneinander getrennt sind. Dabei ist das Fermi-Niveau des p-dotierten Halbleiters am unteren Rand der Bandlücke, beim n-dotierten dagegen am Oberen. Auf der rechten Seite wurden diese beiden Halbleiter nun zusammengebracht. In der Berührungsgegend bildet sich eine Raumladungszone aus, in der alle freien Ladungsträger miteinander rekombinieren haben. Die resultierenden ortsfesten Ladungsträger bilden dabei ein Feld aus, welches dem Ladungsträger Drift entgegenwirkt und eine weitere Rekombination unterbindet. Die Bänder der beiden Halbleiter haben sich verbogen, da die Fermienergie immer auf dem gleichen Niveau liegt. Da sie jedoch nicht in der Mitte der Bandlücke der n- bzw. p-dotierten Bereiche liegt, müssen sich die Bänder verbiegen. [Krao9]

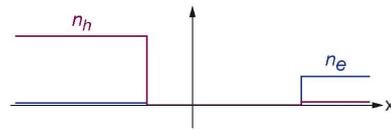
Wenn zwei Halbleiter, der eine n- und der andere p-dotiert, wobei ein mit Donatoren dotierter Halbleiter n-dotiert und ein mit Akzeptoren dotierter Halbleiter p-dotiert genannt wird, zusammengeführt werden, bildet sich eine sogenannte Raumladungszone oder auch Depletionszone aus. Die ursprünglich in getrennten Halbleitern vorhandenen freien Elektronen im n-dotierten und freien Löcher im p-dotierten Halbleiter (siehe Abbildung 13a), rekombinieren sobald beide Halbleiter zusammengebracht werden (siehe Abbildung 13b). Diese Rekombination geschieht durch Diffusion der freien Ladungsträger in den Bereich der anderen Dotierung. Dort rekombinieren diese und lassen die ortsfesten Ladungsträger (die Atomkerne) zurück. Dadurch bildet sich eine Raumladungsspannung aus (siehe Abbildung 14). Diese Spannung wirkt einem weiteren Rekombinationsstrom der freien Ladungsträger entgegen und es wird ein stationärer Zustand erreicht. Im stationären Zustand ist die Fermi-Energie (die durch die Dotierung nach oben bzw. nach unten verschoben wurde) in beiden Bereichen gleich hoch. Um

dies zu ermöglichen müssen sich das Valenz- und das Leitungsband verbiegen (siehe Abbildung 13b).[Kra09]

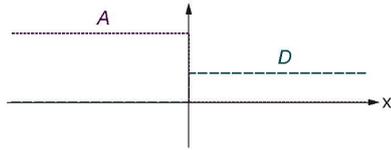
pn-Übergang Schema



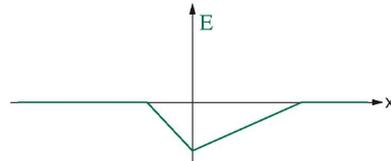
Konzentration der freien Ladungsträger



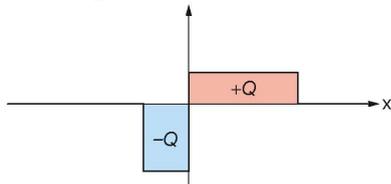
Akzeptor- und Donatorkonzentration



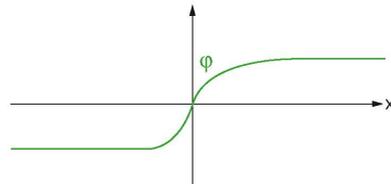
elektrisches Feld



Raumladungsdichte



elektrisches Potential



⊖ ... Akzeptorion

⊕ ... Donatorion

+ ... freies Loch

- ... Leitungselektron

Abbildung 14: Die Charakteristika eines pn-Übergangs

Oben links ist eine schematische Ansicht der Übergangszone, mit der Verarmung an freien Ladungsträgern. Darunter auf der linken Seite ist die unterschiedlich starke Konzentration von Donator- und Akzeptoratomen gezeigt. Unten auf der linken Seite ist die Raumladungsdichte, die Ladung pro Volumen, aufgetragen. Auf der rechten Seite ist oben die Konzentration der freien Ladungsträger gezeigt, die im Übergangsbereich gegen Null geht. In der Mitte auf der rechten Seite ist der Verlauf des elektrischen Feldes gezeigt, das durch die zurückbleibenden ortsfesten Ladungsträger erzeugt wird. Unten auf der rechten Seite ist noch das zum Feld gehörende Potential gezeigt.[Kra09]

Die Depletionszone dehnt sich dabei um die Sperrschichtweite W_{S0} aus:

$$W_{S0} = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r}{e} \cdot \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right) \cdot U_D}$$

mit der Vakuum-Dielektrizitätskonstante ϵ_0 , der relativen Dielektrizität ϵ_r , der eff. Donator bzw. Akzeptorkonzentration N_D bzw. N_A sowie der Diffusionsspannung U_D . Daraus lässt sich dann auch einfach die Kapazität der Depletionszone angeben. Diese ist analog zum Plattenkondensator gegeben durch[Goso8]:

$$C_S = \epsilon_0\epsilon_r \frac{A}{W_S}$$

Wird eine externe Spannung angelegt, hat dies zwei mögliche Auswirkungen, je nach Polung. Im einen Fall, wenn die Anode an die p- und die Kathode an die n-Seite angeschlossen wird, spricht man von Polung in Durchlassrichtung. Hierbei wird dem Feld, das sich in der Depletionszone ausgebildet, hat entgegengewirkt. Dadurch wird die Depletionszone kleiner und es fließt ein Strom (siehe Abbildung 15a).

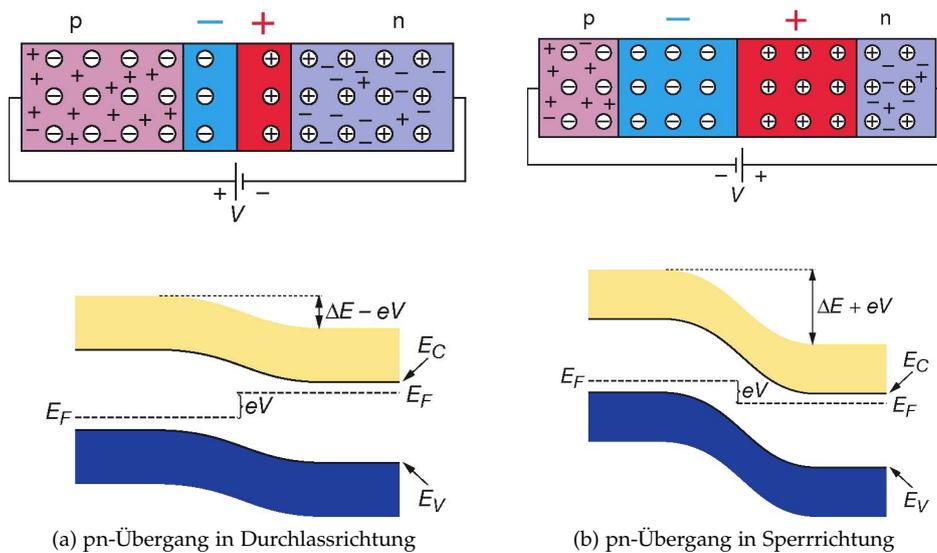


Abbildung 15: Anlegen einer äußeren Spannung an einen pn-Übergang

Auf der linken Seite in Abbildung 15a ist der pn-Übergang in Durchlassrichtung zu sehen. Hier wird durch Anlegen der Äußeren Spannung dem Feld der ortsfesten Ladungsträger in der Depletionszone entgegengewirkt und diese damit verkleinert. Dadurch wird die Verbiegung der Bänder abgeschwächt und ein Strom kann fließen.

Im Gegensatz dazu wird auf der rechten Seite in Abbildung 15b eine Spannung in Sperrrichtung, also in der gleichen Richtung wie das Feld der ortsfesten Ladungsträger, angelegt. Dadurch wird die Depletionszone vergrößert und die Bandverbiegung verstärkt. Dadurch wird der Stromfluß unterbunden. [Kra09]

Wird dagegen die Anode an die n- und die Kathode an die p-Seite angeschlossen, ist die Polung in Sperrrichtung. Dadurch werden die außerhalb der Depletionszone vorhandenen freien Ladungsträger *abgesaugt* und die Depletionszone damit vergrößert (siehe Abbildung 15b). Die Weite der Depletionszone ist nun gegeben durch:

$$W_{S_R} = W_{S_0} \cdot \sqrt{\frac{U_D + U_R}{U_D}}$$

Wird die äußere Spannung so groß gewählt, dass die Depletionszone den gesamten Halbleiter ausfüllt, das also keine freien Ladungsträger mehr verfügbar sind, spricht man von der Depletionsspannung. Diese hängt von den Materialeigenschaften, vor allem der effektiven Dotierkonzentration N_{eff} sowie der Länge l des pn-Übergangs ab:

$$V_{dep} = \frac{q_0}{2\epsilon\epsilon_0} |N_{eff}| l^2$$

Im Prinzip existieren in der Depletionszone keine freien Ladungsträger mehr. Allerdings gibt es weiterhin Paarbildung, dominiert durch Fremdatome und Fehlstellen, so dass ein Leckstrom fließt. [Goso8] [Harogb]

2.2 SILIZIUM ALS DETEKTOR

2.2.1 Aufbau eines Streifensensors

Ein Siliziumstreifensensor ist aus vielen Implantat-Streifen (z.B. p-dotiert) im Substrat (z.B. n-dotiert) aufgebaut. Diese Streifen bilden zum Substrat hin einen pn-Übergang. An diesen wird eine Spannung so angelegt, dass der pn-Übergang in Sperrrichtung betrieben wird. Dadurch wird, wie in 2.1.7 erklärt, die Anzahl freier Ladungsträger verringert. Die angelegte Spannung wird, wenn möglich, so groß gewählt, dass alle freien Ladungsträger aus dem Sensor abgesaugt werden.

Wenn ein geladenes Teilchen den Sensor durchquert, werden Elektron-Loch-Paare erzeugt. Diese Ladungen werden von der angelegten Spannung getrennt und zur Rückseite bzw. zum Implantatstreifen abgesaugt (siehe Abbildung 16).

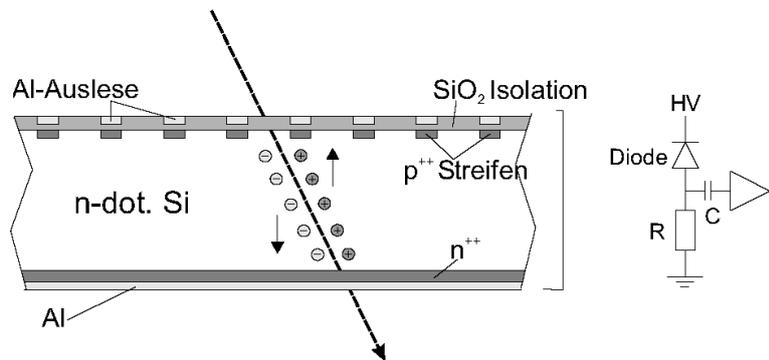


Abbildung 16: Detektionsprinzip eines Siliziumstreifensensors

Ein geladenes Teilchen erzeugt beim Durchflug durch den Sensor Paare von Elektronen und Löchern. Von der angelegten Spannung werden dann die Elektronen zur Rückseite und die Löcher zu den Auslestreifen hin abgesaugt. Die Löcher, die sich im p⁺-dotierten Implantat des Auslestreifens sammeln erzeugen dann ein Signal, das vom Auslesechip gemessen wird. [Furo2]

Über dem Implantatstreifen befindet sich, oberhalb einer isolierenden Siliziumoxid-Schicht, ein Aluminiumstreifen, auf den das Signal kapazitiv eingekoppelt wird. Die Ladung selbst wird über einen Widerstand auf den Biasring abgeführt, der sich wiederum auf Massepotential befindet (siehe Abbildung 17). Für die Ortsbestimmung wird das Maximum der Signalhöhe nebeneinanderliegender Streifen ermittelt und über die Streifennummern einem Ort zugeordnet.

In Abbildung 17 ist ein Schnitt durch einen Siliziumstreifensensor gezeigt:

- Auf der linken Seite ist der Guardring zu sehen, der zur Feldformung dient.
- Als nächstes kommt der Biasring, über den alle Streifen mit Masse verbunden werden.
- Die Verbindung zwischen den Streifen und dem Biasring erfolgt durch den Biaswiderstand.
- Der Kontakt zwischen dem Biaswiderstand und dem Implantat ist mittels eines Vias realisiert. Dieses Via ist zu Diagnosezwecken so ausgeführt, dass es mit Nadeln

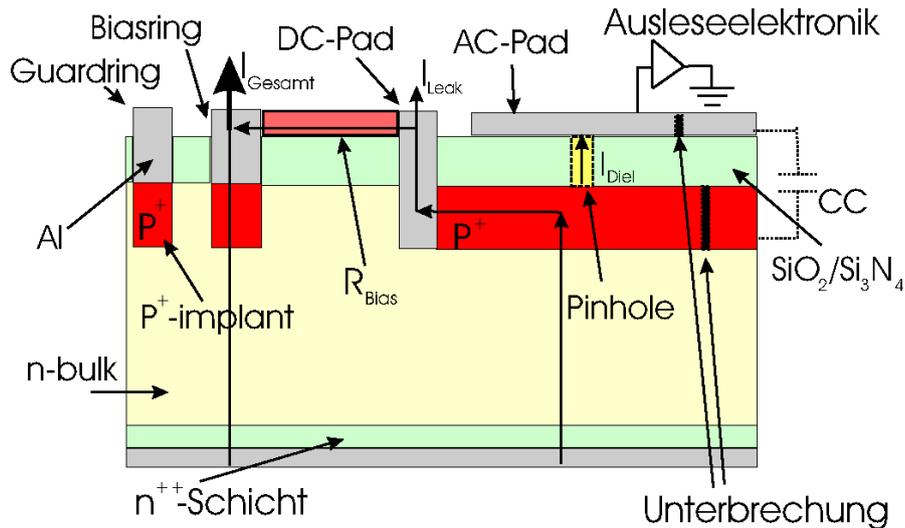


Abbildung 17: Aufbau eines Siliziumstreifensensors [Furo2]

kontaktiert werden kann und heißt DC-Pad, da ein direkter Kontakt zum Implantat besteht.

- Das DC-Pad ist mit dem Implantat (in diesem Fall stark p-dotiert) verbunden. Die Löcher, die bei einem Signal erzeugt werden, werden über das Implantat abgeführt und detektiert.
- Über dem Implantat befindet sich eine Schicht isolierenden Siliziumdioxids, das gleichzeitig ein Dielektrikum für die Kapazität zwischen Implantat und Auslestreifen darstellt.
- Darüber befindet sich der Aluminium-Auslestreifen. Er wird an die Ausleseelektronik angeschlossen.

[Furo2]

2.2.2 Elektrische Kenngrößen

Zwei wichtige Kenngrößen des gesamten Sensors sind die Depletionsspannung und der Leckstrom:

1. Die Depletionsspannung, ab der alle freien Ladungsträger aus dem Material abgesaugt sind, legt die Mindestspannung fest, mit der der Sensor betrieben werden sollte. Wie in 2.1.7 gezeigt, hängt die Kapazität der Depletionszone von der Depletionsspannung ab. Daher kann die Depletionsspannung bestimmt werden, indem die Kapazität über der Spannung gemessen wird. Diese Messung wird CV-Messung genannt.
2. Der Leckstrom, der mit einer Strom über Spannungs-Messung, der sogenannten IV-Messung bestimmt wird, legt die Untergrenze des Stromverbrauchs eines Sensors fest. Dieser sollte so gering wie möglich sein, denn zum einen wird das Rauschen negativ beeinflusst, zum anderen muss die als Leckstrom verbrauchte Energie als Wärme wieder abgeführt werden. Der Leckstrom hängt auch von

Temperatur ab. Um den Leckstrom zu reduzieren sollte der Sensor daher gekühlt werden.

Zusätzlich zu diesen globalen Eigenschaften hat jeder einzelne Streifen noch eine Reihe von Parametern, die stimmen müssen:

1. **Kopplungskapazität:**
Die Kapazität zwischen dem Implantat und dem Aluminiumstreifen wird Kopplungskapazität genannt. Da die Auslese AC-gekoppelt ist und das Signal direkt proportional zur Kopplungskapazität ist, sollte diese möglichst groß sein. Dies kann durch eine dünne Siliziumoxidschicht erreicht werden, was aber schwierig zu prozessieren ist und zu Kurzschlüssen führen kann. Zudem sorgt eine größere Kopplungskapazität für ein erhöhtes Rauschen, was die Entscheidung, ob ein Messwert durch ein Signal oder durch Rauschen zustande kam erschwert.
2. **Zwischenstreifenkapazität:**
Die Kapazität zwischen zwei Aluminiumstreifen wird Zwischenstreifenkapazität genannt. Sie sollte zum einen relativ groß sein, da sie für eine Signalkopplung zum Nachbarstreifen sorgt, über die die Ortsauflösung verbessert werden kann. Dadurch wird aber gleichzeitig die Kanalbelegung erhöht. Zum anderen liefert sie auch einen großen Beitrag zum Rauschen. Für CMS wurde die Zwischenstreifenkapazität so gewählt, dass sie zwischen $\frac{1}{30}$ und $\frac{1}{60}$ der Kopplungskapazität liegt.
3. **Backplane-Kapazität:**
Die Kapazität zwischen einem Streifen und der Rückseite des Sensors wird Backplane-Kapazität genannt. Diese Kapazität kann vor allem dafür genutzt werden defekte Streifen zu finden. Sie zählt außerdem zu den unerwünschten Last-Kapazitäten des Streifens.
4. **Biaswiderstand:**
Der Widerstand, über den das Implantat mit dem Biasring verbunden ist wird Biaswiderstand genannt. Über diesen Widerstand wird die gesammelte Ladung wieder abgegeben. Über diesen Wert kann also eingestellt werden, wie lange das Signal zur Auslese zur Verfügung steht, bzw. wie lange der Kanal für neue Signale tot ist. Wichtig ist auch, dass der Widerstand für den ganzen Sensor konstant ist, da es sonst Probleme mit der Feldform geben kann.
5. **Zwischenstreifenwiderstand:**
Der Widerstand zwischen zwei Streifen wird Zwischenstreifenwiderstand genannt. Er sollte so groß wie möglich sein, damit alle Streifen elektrisch voneinander getrennt sind. Da aber alle Streifen über den Biaswiderstand miteinander verbunden sind, ist die Messung sehr schwierig. Es kann im allgemeinen lediglich eine Untergrenze im Bereich von einigen G Ω bestimmt werden.
6. **Widerstand des Dielektrikums:**
Der Strom übers Dielektrikum, also zwischen Implantat und Aluminiumstreifen, sollte möglichst Null sein. Wenn er das nicht ist, ist das ein Indiz für einen fehlerhaften Kanal. Ein hoher Strom würde die AC-Kopplung aufheben, was im günstigsten Fall einen Ausfall des Kanals zur Folge hätte, im schlechtesten einen Ausfall des ganzen Auslesechips. Wenn hier ein sehr kleiner Widerstand vorliegt, spricht man von einem Pinhole.
7. **Streifenleckstrom:**
Der Leckstrom eines einzelnen Streifens heißt Streifenleckstrom. Dieser geht sehr stark ins Rauschen eines einzelnen Kanals ein und sollte daher möglichst klein sein. [Harob]

2.3 STRAHLENSCHÄDEN

2.3.1 Die Entstehung

Ein Teilchen, das einen Sensor durchquert gibt einen Teil seiner Energie an das Silizium ab. Meistens kommt es dabei nur zu Stößen mit Elektronen, wodurch die Detektion des Durchfluges möglich wird. Allerdings kann es stattdessen auch zu einem Stoß mit einem Atomkern kommen. Werden bei dem Stoß mindestens 25eV übertragen, kann das Atom im Siliziumgitter von seinem Platz gestoßen werden. Dies hat eine Gitterfehlstelle sowie ein Zwischengitteratom zur Folge. Wenn das erste gestoßene Siliziumatom eine Energie von über 5keV hat, bleibt es nicht bei einer einzelnen Fehlstelle, sondern es gibt eine Anhäufung von Fehlstellen, die auch Cluster genannt wird. Dies wird dadurch verursacht, dass dieses Atom weitere Atome von ihren Gitterplätzen stößt (siehe Abbildung 18).

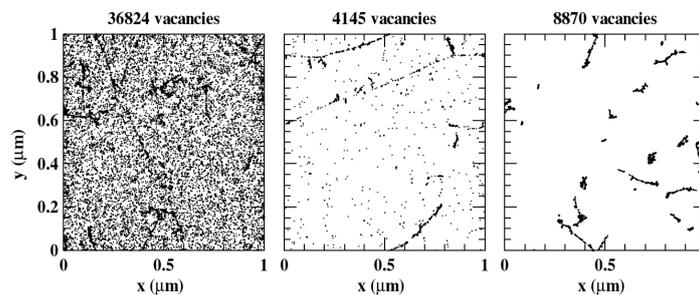


Abbildung 18: Lücken im Gitter, direkt nach Bestrahlung, die von 10MeV Protonen (Links), 24GeV Protonen (Mitte) sowie 1MeV Neutronen (Rechts) verursacht wurden. Die Graphen sind Projektionen über $1\mu\text{m}$ Dicke und entsprechen einer Fluenz von 10^{14}cm^{-2} [Huh02]

Die einzelnen Defekte, oder auch Punktdefekte, sind im Kristall beweglich und können ausheilen (das Atom wandert auf seinen alten Platz), können an die Oberfläche wandern oder auch sich zu Clustern zusammenfinden.

Cluster oder auch andere Kombinationen von Einzeldefekten und ursprünglichen Kristallfehlern oder Dotieratomen, sind dagegen meist unbeweglich und verändern die Kristalleigenschaften dauerhaft. Diese Fehlstellen erzeugen neue Energie-Niveaus, ähnlich der Dotierung. Diese Fehlstellen können dabei auch das Verhalten beider Dotiervarianten aufweisen. Man spricht deshalb von Akzeptor- bzw. Donator-Defekten.

2.3.2 Die Auswirkungen

- **Leckstrom:**
Liegen die erzeugten Energie-Niveaus in der Mitte der Bandlücke, so können mit ihrer Hilfe leichter Elektron-Loch Paare erzeugt werden, da die Energie, die notwendig ist um vom Valenz- ins Leitungsband zu kommen geringer ist. Dadurch erhöht sich der Leckstrom des Sensors, was zum einen ein erhöhtes Rauschen und zum anderen einen größeren Energieverbrauch zur Folge hat. Dabei hängt der Leckstrom linear von der Fluenz ab.
- **Depletionsspannung:**
Wie in 2.1.7 gezeigt, hängt die Depletionsspannung von der effektiven Dotierkonzentration ab. Da sich diese durch die Strahlenschäden ändert, verändert sich auch

die Depletionsspannung. Dies kann sogar soweit gehen, dass ein ursprünglich n-dotiertes Material effektiv p-dotiert wird. Wie in [Abbildung 19](#) zu sehen, wird die Depletionsspannung nach einer anfänglichen Abnahme mit zunehmenden Strahlenschäden sehr groß.

- Ladungssammlungseffizienz:
Die Ladungsträger des Signals können von Defekten, eingefangen werden. Wenn die Zeit, die die Ladung gefangen ist länger ist, als der Auslesechip Signal akzeptiert, stehen diese Ladungsträger nicht mehr für das Signal zur Verfügung.

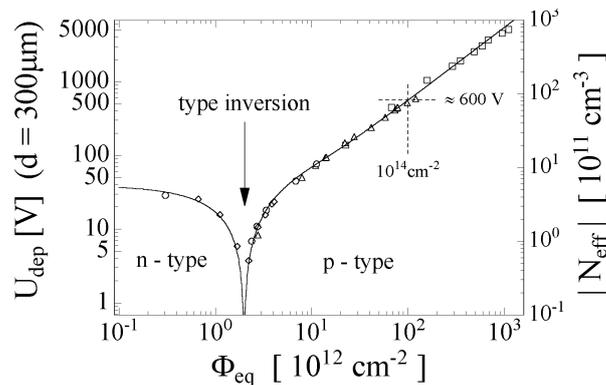


Abbildung 19: Depletionsspannung in Abhängigkeit der Fluenz direkt nach Bestrahlung.
Die Depletionsspannung nimmt Anfangs mit der Bestrahlung, bis zu einer Singularität, ab. An dieser Stelle erfolgt die Typumkehr, das n-dotierte Grundmaterial wird also p-dotiert. Danach steigt die Depletionsspannung immer weiter an. [Mol99]

2.3.3 Das Annealing

Bei einer ausreichend hohen Temperatur ($T > 150\text{K}$) können sich die einzelnen Defekte im Material bewegen. Dies kann, wie in [2.3.1](#) beschrieben, unter anderem, zu Rekombination von Zwischengitteratom und Fehlstelle oder zu Clusterbildung führen. Die verschiedenen Varianten von Defekten und ihrer Verhaltensmöglichkeiten benötigen unterschiedliche Zeitspannen um ihre Endzustände zu erreichen. Da zuerst die Effekte dominieren, bei denen sich die effektive Dotierkonzentration positiv verändert kann dies dazu benutzt werden, um den Leckstrom zu verringern und die Lebensdauer des Sensors zu verlängern (siehe [Abbildung 20](#)).

Dabei ist der Ausheilungsprozess sehr stark von der Temperatur abhängig. Somit ist es sinnvoll, nach einiger Zeit des Betriebs, den Detektor aufzuheizen um den nützlichen Heilungseffekt auszunutzen. Gleichzeitig ist es wichtig dabei sehr vorsichtig zu sein, um die negativen Effekte zu vermeiden. [Lino3][Harogb]

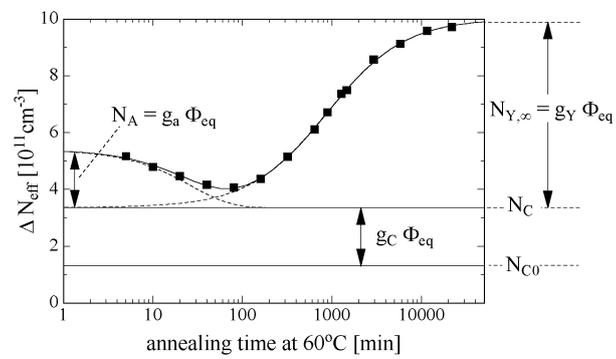


Abbildung 20: Effektive Dotierkonzentration über der Zeit bei 60°C

Dabei bezeichnet N_C den Anteil der stabilen Defekte, N_A den Anteil des sogenannten *beneficial annealing*, also die nützliche Ausheilung und N_Y den Anteil des sogenannten *reverse annealing* [Mol99]

Teil II

ENTWURF VON SENSOREN UND TESTSTRUKTUREN

3.1 HERSTELLUNG VON SILIZIUMSTREIFENSSENSOREN

Siliziumsensoren werden mit der aus der IT-Industrie gebräuchlichen Fotolithografie-Methode hergestellt. Bei dieser Methode werden auf einem Siliziumwafer verschiedene Prozessschritte durchgeführt. Alle benötigten Strukturen und Formen werden mit der Fotolithografie-Technik auf den Wafer übertragen. Hierzu werden Masken gefertigt, die in stark vergrößertem Massstab die späteren Strukturen beinhalten. Für die einzelnen Prozessschritte werden dann über ein Projektionssystem die Masken auf das Silizium abgebildet. Auf dem Wafer wird vorher Fotolack aufgebracht. Der belichtete Fotolack wird bei der Entwicklung entfernt. Es bleibt eine strukturierte Schicht Fotolack übrig, die beim folgenden Ätzen die darunterliegende Schicht schützt. Dadurch werden nur die Bereiche entfernt, die zuvor belichtet, also durch die Masken definiert wurden. Entweder ist diese Schicht eine Dotiermaske (z.B. aus SiO_2), in die Löcher geätzt werden, durch welche die Dotieratome ins Silizium eindringen können. Oder es wird, wenn eine strukturierte neue Schicht aufgebracht werden soll (z.B. polykristallines Silizium), diese zunächst großflächig aufgebracht und dann durch Belichten und Ätzen strukturiert. Hier soll die Herstellung von Halbleiterelementen am Beispiel eines Siliziumstreifenssensor aus dem *Institute of Electron Technology* in Warschau veranschaulicht werden[Maro5]:

1. Oxidation als Schutz- und Maskenschicht für die Bor-Dotierung.
2. Entfernen des Siliziumdioxids von der Rückseite, um diese für einen niederohmigen Kontakt dotieren zu können.
3. Dotierung mit Phosphor (n) auf der Rückseite (siehe Abbildung 21).

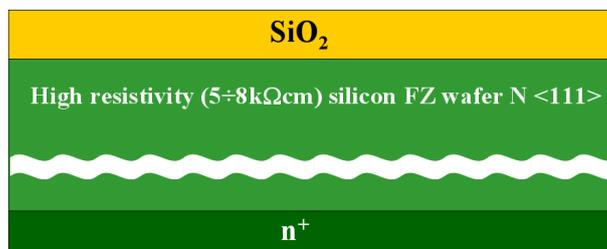


Abbildung 21: Querschnitt eines Wafers mit n^+ -Dotierung auf der Rückseite, um den Kontakt zu verbessern.

Falls Metall auf einen niedrig dotierten Halbleiter aufgebracht wird, bildet sich ein sogenannter Schottky-Kontakt aus. Dieser hat einen relativ hohen Widerstand und ist daher hier nicht erwünscht.[Maro5]

4. Oxidation der Rückseite, als Schutz vor den folgenden Schritten.
5. Öffnen von *Dotierungsfenstern* um mittels Fotolithografie die p^+ -Implantate erzeugen zu können (siehe Abbildung 22).
6. Dotierung der Oberseite mit Bor. Dabei wird eine Schicht Bor aufgetragen, die dann eindiffundiert. Dies geschieht an den Stellen, die frei von SiO_2 sind.

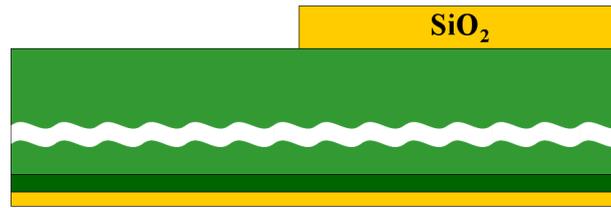


Abbildung 22: Querschnitt eines Wafers mit Öffnung im SiO_2 für die p-Dotierung.[Mar05]

7. Entfernen der Bor-Glas-Schicht, die im vorigen Schritt entstanden ist.
8. Erzeugen der Isolationsschicht zwischen dem Auslestreifen und dem Implantat durch Oxidation(siehe Abbildung 23).

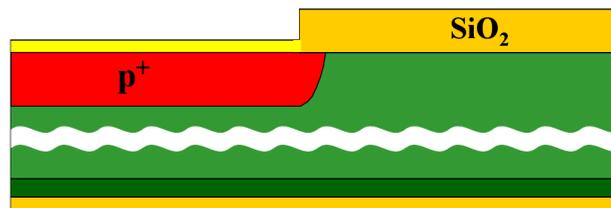


Abbildung 23: Querschnitt eines Wafers mit implantiertem p^+ -Streifen.[Mar05]

9. Auftragen von Polysilizium für den Biaswiderstand.
10. Dotierung des Polysiliziums mit Bor, um den Widerstand zu definieren (siehe Abbildung 24a).
11. Oxidation für den nächsten Fotolithografie-Schritt.
12. Erzeugen der Form des Biaswiderstandes mittels Fotolithografie.
13. Entfernen des Polysiliziums von der Rückseite (siehe Abbildung 24b).

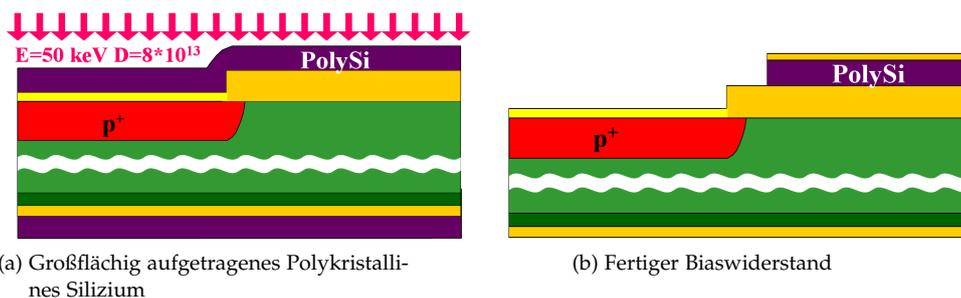


Abbildung 24: Erzeugen der Schicht von Polykristallinem Silizium für den Biaswiderstand.
[Mar05]

14. Öffnen von Dotierungsfenstern, mittels Fotolithografie, um die Kontakte im Polysilizium zu erzeugen.
15. Bordotierung der Biaswiderstandskontakte.

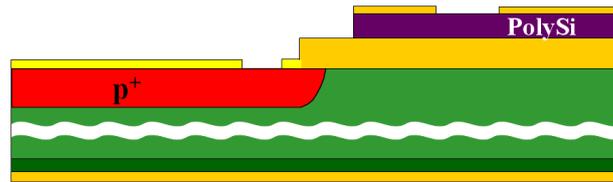


Abbildung 25: Querschnitt eines Wafers, fertig zur Metallisierung.[Mar05]

16. Öffnen der Kontakte zum p^+ mittels Fotolithografie (siehe Abbildung 25).
17. Auftragen einer Aluminium-Silizium-Kupfer-Legierung auf beiden Seiten des Wafers.
18. Erzeugen der Form der Metallisierung auf der Vorderseite mittels Fotolithografie (siehe Abbildung 26).
19. Sintern¹ des Metalls, um einen guten Kontakt zum Silizium zu erhalten.

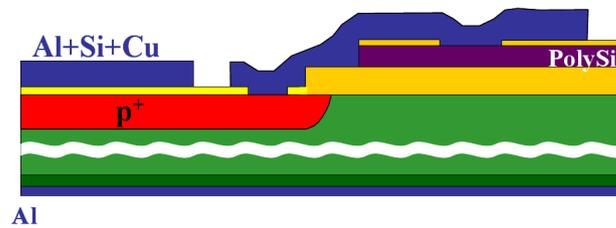


Abbildung 26: Ein (bis auf die Schutzschicht) fertiger Sensor.[Mar05]

20. Auftragen der SiO_2 -Passivierung auf der Vorderseite.
21. Öffnen von Fenstern in der Passivierung mittels Fotolithografie.

¹ Sintern: thermisches Umformen des Materials unterhalb des Schmelzpunktes

WEITERENTWICKLUNG EINES WERKZEUGS ZUM ERSTELLEN VON MASKENDATEN

Um Wafer zu produzieren, werden wie in 3.1 beschrieben, Masken benötigt. Diese Masken werden mit dem Vektorgrafikformat GDS II¹ definiert. Diese Dateien werden im Allgemeinen mit kommerziellen Programmen, die sehr umfangreich und sehr teuer sind, erstellt. Im Zuge dieser Diplomarbeit habe ich das kommerzielle Werkzeug „Mentor Graphics IC-Station“ und das quelloffene Programm LayoutEditor [Thi] getestet. Der LayoutEditor ist einfacher zu bedienen, wenn auch mit geringerem Funktionsumfang. Allerdings lag der Funktionsumfang schon im Original relativ dicht an unseren Anforderungen für das Design von Sensoren und Teststrukturen. Eine wichtige Funktion ist dabei die Möglichkeit, über Makros gesteuert zu werden.

Diese Makrofunktionalität ist im Originalprogramm allerdings eingeschränkt. In der Originalversion konnten zum Beispiel keine Submakros mit Parameterübergabe gestartet werden und einige mathematische Operationen waren fehlerhaft oder nicht vorhanden. Mittlerweile wurde die Möglichkeit der Ausführung von Makros aus dem quelloffenen Original entfernt. Dank der quelloffenheit war es mir aber möglich diese Funktionen einzubauen, sodass eine mit allen zur Sensorentwicklung benötigten Funktionen ausgestattete und kostenlose Layout-Umgebung zum Maskendesign zur Verfügung steht.

Zu den großen Vorteilen der Makro-Funktion des LayoutEditors zählt, dass sich einfache Strukturen definieren lassen, die bei Bedarf nur noch platziert werden müssen. Diese Strukturen sind dabei über einen Parametersatz jederzeit an geänderte Bedürfnisse anzupassen. Damit ist es zum Beispiel sehr einfach, große Strukturen zu zeichnen, die viele sich wiederholende Teile haben, wie z.B. Streifensensoren. Es muss lediglich einmal der Außenbereich sowie ein Streifen definiert werden. Um einen Sensor beliebiger Streifenanzahl zu zeichnen, müssen nun lediglich einmal der Außenbereich sowie die gewünschte Anzahl von Streifen gezeichnet werden.

4.1 ZEICHNEN EINER DIODE MIT LAYOUTEDITOR

Anhand einer Diode soll nun gezeigt werden, wie die Entwicklung von Halbleiterstrukturen mit diesem Programm funktioniert. Die vollständige Diode ist in Abbildung 27 zu sehen. Danach werden an einzelne Substrukturen die zum Teil aufeinander aufbauen die wichtigsten Vorgehensweisen erklärt.

¹ GDS: Graphic Data System, dt. graphisches Datensystem

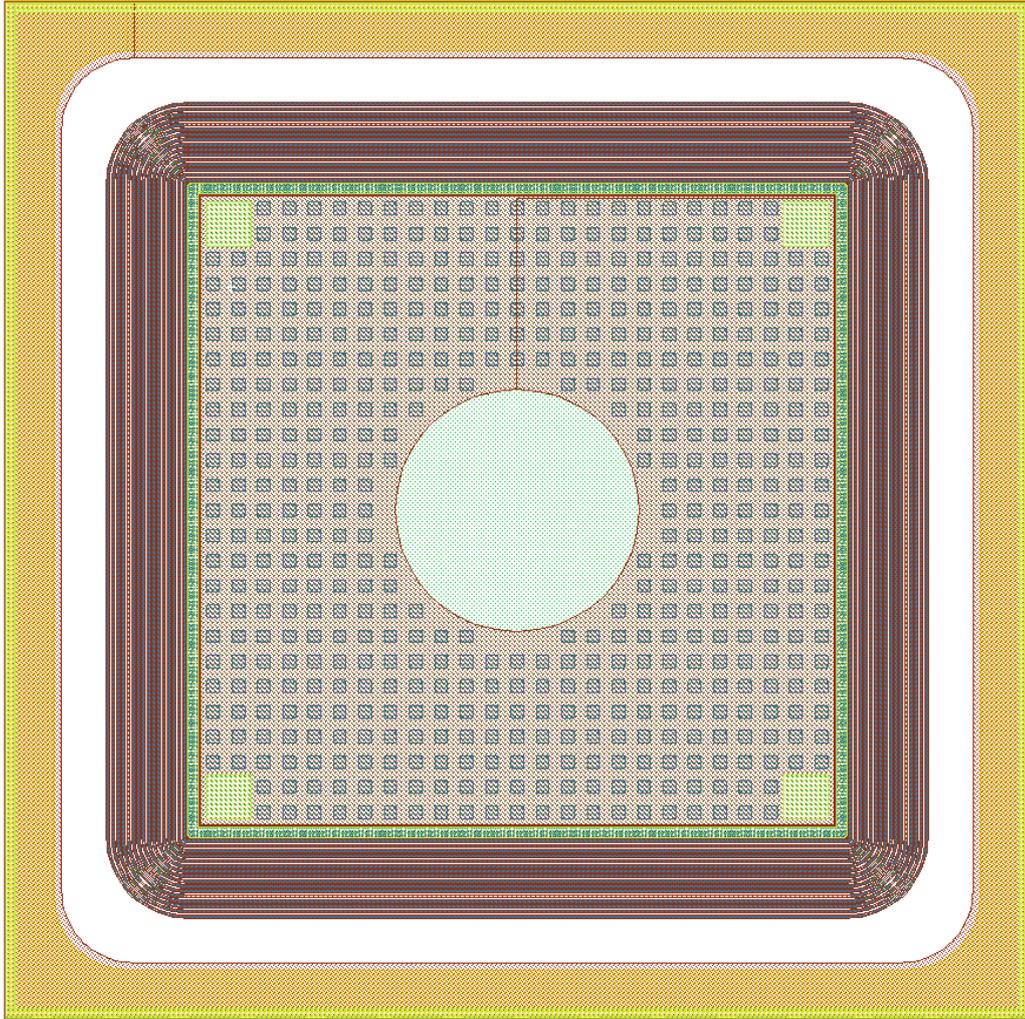


Abbildung 27: Zeichnung einer Diode

4.1.1 Das Via

Zunächst wurde mit einer beliebigen Substruktur angefangen, in diesem Fall dem Via. Ein Via ist eine kleine (in diesem Fall $6 \times 10 \mu\text{m}^2$) Aluminiumverbindung zwischen der p-Schicht und der Aluminiumschicht. Da bei den Siliziumstrukturen möglichst keine Feldspitzen auftreten sollen, diese aber an scharfe Kanten entstehen, werden überall wo es möglich und sinnvoll ist die Ecken abgerundet. Deshalb reicht es nicht aus, für die benötigte Verbindung einfach ein rechteckiges Aluminiumstück einzusetzen.

Um Formen mit LayoutEditor zu zeichnen, werden bestimmte Punkte gesetzt (bei einem Rechteck zwei gegenüberliegende Eckpunkte) und dann wird der Befehl zum Zeichnen der Form gegeben. Die mit dem folgenden Code erzeugte Form ist in [Abbildung 28](#) zu sehen:

```

1 //Identifikation als LayoutEditor Makro
#!/usr/bin/layout

int main()
{
    //Angabe der Parameter

```



Abbildung 28: Zeichnung eines Vias

```

6      int XCenter=0;
      int YCenter=0;
      int Length=10000;
      int Height=6000;
      int Radius=500;
11      //Zeichnen von drei Rechtecken:
      //erst ein Großes, das die eigentliche Fläche einnimmt
      //dann zwei Kleine, als Zwischenstücke für die abgerundeten Ecken.
      layout->drawing->point(XCenter+Length/2-Radius,YCenter+Height/2);
      layout->drawing->point(XCenter-Length/2+Radius,YCenter-Height/2);
16      layout->drawing->box();
      layout->drawing->point(XCenter+Length/2-Radius,YCenter+Height/2-Radius);
      layout->drawing->point(XCenter+Length/2,YCenter-Height/2+Radius);
      layout->drawing->box();
      layout->drawing->point(XCenter-Length/2+Radius,YCenter+Height/2-Radius);
21      layout->drawing->point(XCenter-Length/2,YCenter-Height/2+Radius);
      layout->drawing->box();
      //Zeichnen von vier Kreissegmenten, für die abgerundeten Ecken.
      layout->drawing->point(XCenter+Length/2-Radius,YCenter+Height/2-Radius);
      layout->drawing->point(XCenter+Length/2,YCenter+Height/2-Radius);
26      layout->drawing->point(XCenter+Length/2-Radius,YCenter+Height/2);
      layout->drawing->sector();
      layout->drawing->point(XCenter+Length/2-Radius,YCenter-Height/2+Radius);
      layout->drawing->point(XCenter+Length/2-Radius,YCenter-Height/2);
      layout->drawing->point(XCenter+Length/2,YCenter-Height/2+Radius);
31      layout->drawing->sector();
      layout->drawing->point(XCenter-Length/2+Radius,YCenter-Height/2+Radius);
      layout->drawing->point(XCenter-Length/2,YCenter-Height/2+Radius);
      layout->drawing->point(XCenter-Length/2+Radius,YCenter-Height/2);
      layout->drawing->sector();
36      layout->drawing->point(XCenter-Length/2+Radius,YCenter+Height/2-Radius);
      layout->drawing->point(XCenter-Length/2+Radius,YCenter+Height/2);
      layout->drawing->point(XCenter-Length/2,YCenter+Height/2-Radius);
      layout->drawing->sector();
41      //Zusammensetzen der einzelnen Strukturen zu einer Einzigen.
      layout->drawing->currentCell->selectAll();
      layout->drawing->mergeSelect();
      layout->drawing->deselectAll();
}

```



Abbildung 29: Zeichnung einer Ecke mit einem inneren runden Ausschnitt

4.1.2 Eine spezielle Ecke

Im folgenden wird der Makro-Kopf, für eine bessere Lesbarkeit, nicht mehr aufgelistet. Um eine nicht-standardmäßig vorhandene Struktur zu zeichnen, ist es möglich mit Hilfe Bool'scher Operationen zwei Standardformen zu kombinieren. Dazu wird erst die eine Form (hier ein Quadrat) gezeichnet und als Teil für eine Bool'sche Operation deklariert. Als nächstes wird dieser Vorgang mit einer zweiten Form (hier einem Kreissegment) wiederholt. Aus beiden Formen wird dann mit der Operation eine neue Form gezeichnet. Um die einzelnen Formen auszuwählen, muss entweder ein Punkt innerhalb der Form verwendet werden, was aber nur sinnvoll funktioniert, wenn sich keine andere Form an der Stelle des Punktes befindet. Oder jede Form wird in eine eigene Zelle gezeichnet, um diese dann komplett auszuwählen.

Eine Maske wird üblicherweise aus Zellen aufgebaut, um die Definition sich wiederholender Teile nur einmal zu benötigen. Dies hat auch den Vorteil, dass der Sensorhersteller bestimmte Teile, wie zum Beispiel den Biaswiderstand mit eigenen Strukturen tauschen kann, da er am besten weiß, wie er den geforderten Widerstandswert erreicht. Allerdings können Zellen auch einfach, wie in diesem Fall, als Zeichenhilfe verwendet werden. Es wird erst eine Zelle definiert und darin die erste Form gezeichnet (Hier ein Quadrat). Um dieses Quadrat zu markieren, kann nun einfach der komplette Inhalt dieser Zelle markiert werden. Das Gleiche geschieht für die zweite Form (Hier ein Kreissegment). Die eigentlich gewünschte Form (Quadrat mit ausgeschnittenem Kreissegment) wird in einer dritten Zelle gezeichnet.

Die Form, die sich aus dem folgenden Code ergibt ist in [Abbildung 29](#) zu sehen.

```

1 //Erzeugen einer Zelle
  cellList *cl=layout->drawing->addCell();
  cl->thisCell->cellName = "box";
  layout->drawing->setCell("box");
  //Zeichnen eines Quadrats
6 layout->drawing->point(XPos,YPos);
  layout->drawing->point(XPos+Radius+Width,YPos+Radius+Width);
  layout->drawing->box();
  //Festlegen als ein Partner der Boolschen Operation
  layout->drawing->currentCell->selectAll();
11 layout->booleanTool->setA();
  layout->drawing->currentCell->deselectAll();

```

```

        //Erzeugen einer neuen Zelle
cellList *cl=layout->drawing->addCell();
cl->thisCell->cellName = "quarter";
16 layout->drawing->setCell("quarter");
        //Zeichnen eines Kreissegmentes
layout->drawing->point(XPos,YPos);
layout->drawing->point(XPos+Radius,YPos);
layout->drawing->point(XPos,YPos+Radius);
21 layout->drawing->sector();
        //Festlegen als zweiten Partner der Boolschen Operation
layout->drawing->currentCell->selectAll();
layout->booleanTool->setB();
layout->drawing->currentCell->deselectAll();
26 //Erzeugen einer neuen Zelle
cellList *cl=layout->drawing->addCell();
cl->thisCell->cellName = "quarterbox";
layout->drawing->setCell("quarterbox");
        //Durchführung der Boolschen Operation
31 layout->booleanTool->aExorB();
}

```

4.1.3 Ein Rechteck mit speziellen Ecken

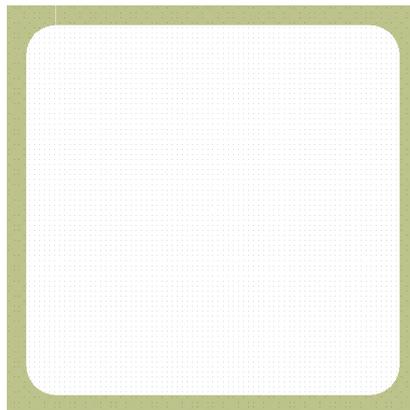


Abbildung 30: Zeichnung eines Rechtecks mit innen abgerundeten Ecken

Das Zeichnen von Strukturen basiert darauf, dass einzelne Grundstrukturen oft eingesetzt werden können, da Strukturen wie ein Auslesefeld oder ein Via, aber auch, das Rechteck in diesem Beispiel in vielen verschiedenen Strukturen vorkommen. Daher ist es wichtig einen Grundstock von Formen zu haben, auf den zurückgegriffen werden kann, um kompliziertere Strukturen zu zeichnen. Die Ecken aus 4.1.2 können nun mit einfachen Rechtecken zu einem Ring zusammengesetzt werden, dessen Ecken innen abgerundet sind.

Die Form, die sich aus dem folgenden Code ergibt ist in Abbildung 30 zu sehen.

```

        //Zeichnen der rechteckigen Teilstücke des Rings
layout->drawing->point(XCenter+Length/2-Width,YCenter+Height/2-Radius-Width);
3 layout->drawing->point(XCenter+Length/2,YCenter-Height/2+Radius+Width);
layout->drawing->box();

```

```

layout->drawing->point(XCenter+Length/2-Radius-Width,YCenter-Height/2+Width);
layout->drawing->point(XCenter-Length/2+Radius+Width,YCenter-Height/2);
layout->drawing->box();
8 layout->drawing->point(XCenter-Length/2+Width,YCenter-Height/2+Radius+Width);
layout->drawing->point(XCenter-Length/2,YCenter+Height/2-Radius-Width);
layout->drawing->box();
layout->drawing->point(XCenter-Length/2+Radius+Width,YCenter+Height/2-Width);
layout->drawing->point(XCenter+Length/2-Radius-Width,YCenter+Height/2);
13 layout->drawing->box();
    //Zeichnen der Ecken des Rings
layout->executeMacro(rootpath+"parts/RoundedCorner.layout",XCenter+Length/2-Radius-
    Width,YCenter+Height/2-Radius-Width,Radius,Width,0);
layout->executeMacro(rootpath+"parts/RoundedCorner.layout",XCenter+Length/2-Radius-
    Width,YCenter-Height/2+Radius+Width,Radius,Width,1);
layout->executeMacro(rootpath+"parts/RoundedCorner.layout",XCenter-Length/2+Radius+
    Width,YCenter-Height/2+Radius+Width,Radius,Width,2);
18 layout->executeMacro(rootpath+"parts/RoundedCorner.layout",XCenter-Length/2+Radius+
    Width,YCenter+Height/2-Radius-Width,Radius,Width,3);
}

```

4.1.4 Eine Anordnung von Außenringen

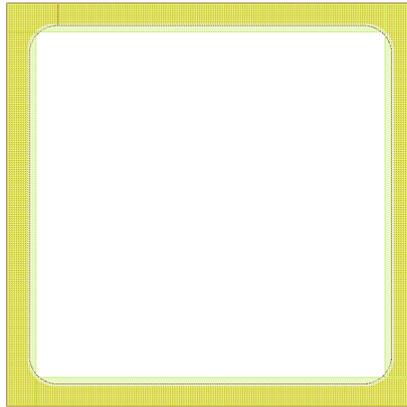


Abbildung 31: Zeichnung eines äußeren Schutzrings

Beim Herstellungsprozess der Sensoren werden, wie in 3.1 erläutert, mehrere Masken gebraucht. Dementsprechend müssen auch die Strukturen für die verschiedenen Masken definiert werden. Dies geschieht durch sogenannte Layer, denen bestimmte Prozessschritte, bzw. bestimmte Masken zugeordnet sind.

Wenn eine Schutzstruktur um die Diode gezeichnet werden soll, muss diese sich auf mehreren Schichten befinden. Und zwar in der n-Schicht, der Aluminiumschicht und der Schicht aus polykristallinem Silizium. Um das zu erreichen, werden der Ring aus 4.1.3, sowie eine Version mit nicht abgerundeten Ecken in den verschiedenen Layern platziert.

Die Form, die sich aus dem folgenden Code ergibt ist in Abbildung 31 zu sehen.

```

    //Setzen eines Rings in Layer 1 (n-Schicht)
layout->drawing->activeLayer=1;

```

```

layout->executeMacro(rootpath+"parts/InnerRoundRing.layout", rootpath, XCenter, YCenter
, Length, Height, Radius, Width1, 1);
//Setzen eines Rings in Layer 4 (Aluminium-Schicht)
5 layout->drawing->activeLayer=4;
layout->executeMacro(rootpath+"parts/InnerRoundRing.layout", rootpath, XCenter, YCenter
, Length-10000, Height-10000, Radius, Width2, 4);
//Setzen eines Rings in Layer 5 (Polysilizium-Schicht)
layout->drawing->activeLayer=5;
layout->executeMacro(rootpath+"parts/RectangularRing.layout", XCenter, YCenter, Length
-20000, Height-20000, Width3);

```

4.1.5 Die Diode

Zuletzt müssen lediglich vier Substrukturen gezeichnet werden, die eine vollständige Diode mit allen benötigten Masken beschreiben. Dieses sehr modulare und leicht anzupassende System kann so für alle Strukturen benutzt werden, um schnell komplett neue Strukturen (mit Hilfe bestehender Grundformen), neue Abwandlungen bestehender Strukturen oder bestehende Strukturen in beliebiger Größe und Zahl zu zeichnen und herstellen zu lassen.

Die Form, die sich aus dem folgenden Code ergibt ist in [Abbildung 27](#) zu sehen.

```

1 //Zeichnen des Außenbereichs
double Length=8100000;
double Height=8100000;
layout->executeMacro(workpath+"OuterRing.layout", rootpath, XCenter, YCenter, Length,
Height, 570000, 400000, 450000, 75000);
//Zeichnen des Zwischenbereichs
6 int Length=5216000;
int Height=5216000;
layout->executeMacro(workpath+"InterRing.layout", rootpath, XCenter, YCenter, Length
, Height, 10000, 25000, 96000);
//Zeichnen des Innenbereichs
int Length=5004000;
11 int Height=5004000;
layout->executeMacro(workpath+"Centerfield.layout", rootpath, XCenter, YCenter,
Length, Height, 20000, 962500, 1541500);
//Zeichnen des Multi-Guardrings
double Length=8100000;
double Height=8100000;
16 layout->executeMacro(workpath+"MultiGuardRing.layout", rootpath, XCenter, YCenter,
5210000, 5210000);

```

4.1.6 Weitere Entwicklungen

Mit der fertigen Diode stehen damit schon alle Grundlagen zur Verfügung, die zum Zeichnen von Strukturen für das Maskendesign benötigt werden. Aus diesen konnte relativ schnell ein Minisensor (siehe [Abbildung 32](#)) erstellt werden. Dieser ist im Außenbereich recht ähnlich zur Diode, für den Innenbereich musste der Streifen einmal entworfen und dann 128 mal platziert werden. Ein Thema, an dem aktuell Entwicklung betrieben wird, ist ein im Sensor integrierter Pitchadapter. Mehr dazu in [Abschnitt 5.1](#).

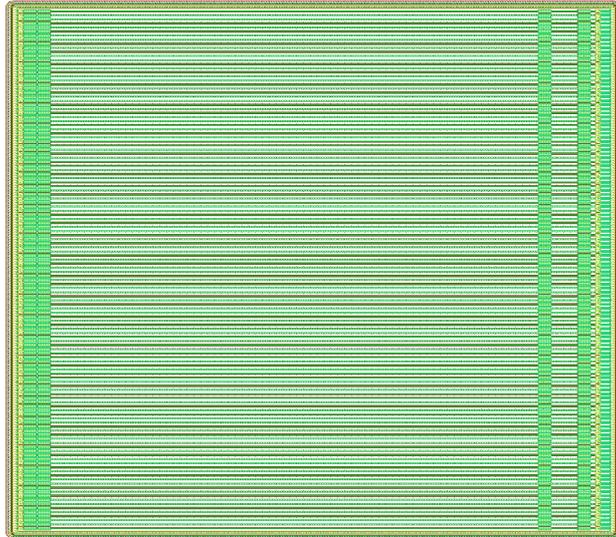


Abbildung 32: Zeichnung eines Minisensors

```

//Zeichnen eines Streifens
layout->executeMacro(rootpath+"minisensor/Strip.layout", rootpath,0,0,Height-2*
    OuterRingHeight-2*InterRingHeight+2*YStripOverhang,StripPitch,0);
//Zeiger auf die Zelle des Streifens setzen
4 layout->drawing->setCell("Strip_o");
cell *local=layout->drawing->currentCell;
//In die Hauptzelle wechseln
layout->drawing->setCell("MiniSensor");
//Mit einer Schleife die Sensorzelle an den gewünschten Positionen
    setzen
9 for(i=0;i<NumberOfStrips;i++){
    p.setX(XCenter+StripPitch/2+((2*i-NumberOfStrips)*StripPitch)/2);
    p.setY(YCenter);
    element *e=layout->drawing->currentCell->addCellref(local,p);
}
14 //Die äußere Struktur zeichnen
p.setX(XCenter);
p.setY(YCenter);
layout->executeMacro(rootpath+"minisensor/Ring.layout", rootpath,XCenter,YCenter,
    NumberOfStrips*StripPitch+2*InterRingLength+2*XStripSpace,Height-2*
    OuterRingHeight);

```

5.1 IM SENSOR INTEGRIERTER PITCHADAPTER

Beim CMS-Tracker dürfen maximal 1 – 2% der Kanäle von den Teilchen eines Ereignisses getroffen werden, da die Zeit, die ein Kanal benötigt, um wieder für neue Ereignisse bereit zu sein, größer ist, als der Abstand zwischen den Ereignissen. Darum ist es notwendig die Granularität des Trackers zu erhöhen. Um dies zu erreichen, könnten die Sensoren gekürzt werden. Ein anderer Ansatz unterteilt die langen Streifen eines Sensors in einzelne Abschnitte, die sogenannten Strixel¹, die jeweils an die Ausleseelektronik angeschlossen werden. Wenn ein Streifen lediglich in zwei Strixel unterteilt wird, könnten die Auslesechips einfach am Rand des Sensors angebracht werden, wie es bei CMS der Fall ist. Wird der Streifen allerdings in mehr Strixel unterteilt, müssen neue Wege zum Anschluss an die Elektronik gefunden werden. Dazu werden derzeit Sensoren mit vier Strixeln untersucht, zwischen deren äußeren Streifen Anschlussleitungen aus Aluminium geführt werden. Eine andere Möglichkeit ist es, die Auslesechips vom Rand weg direkt auf den Sensor zu verschieben. Dabei wird im Bereich, in dem sich zwei Strixel treffen, eine Brücke aufgebracht, auf der die Auslesechips platziert sind.

Unabhängig davon, welche Methode verwendet wird, werden sogenannte Pitchadapter benötigt, die zwischen Streifen oder Strixel und den Auslesechips platziert werden. Da die Streifen einen anderen Abstand voneinander haben, als die Anschlußfelder der Auslesechips, werden Pitchadapter eingesetzt, um die weiten Abstände der Streifen und die kurzen Abstände der Auslesechips zusammenzuführen. Bei Montage der Ausleseelektronik am Rand steht erst einmal genügend Platz zur Verfügung, um diesen Pitchadapter als gesondertes Bauteil auszuführen, obwohl auch hier versucht wird, so wenig Material wie möglich im Spurdetektor einzusetzen.

Wird die Elektronik direkt auf dem Sensor platziert, ist der Platz, den der Pitchadapter einnehmen kann, stark begrenzt. Um gleichzeitig Platz und Material zu sparen, wird derzeit untersucht, ob der Pitchadapter nicht direkt in dem Sensor untergebracht werden kann. Dabei gibt es zwei Ansätze, der eine geht dahin, auf der Aluminiumschicht nochmals eine Isolationsschicht und darauf noch eine Routingschicht unterzubringen. Der andere Ansatz bringt den Pitchadapter direkt auf der ersten Aluminiumschicht ein. Bei der Integration des Pitchadapters in den Sensor wird nun der Aluminiumstreifen verkürzt. Dadurch reduziert sich die für die Auslese wichtige Kopplungskapazität. Im Fall der über dem Sensor angebrachten Brücke, wird hier nicht nur der Teil verloren, der vom Pitchadapter selbst benötigt wird, sondern auch der Bereich zwischen dem Pitchadapter und dem Ende des Strixels, da der Pitchadapter nicht am Rand untergebracht wird. Wie groß der Einfluss des fehlenden Aluminiumstreifens ist, muss noch untersucht werden. Falls es sich als notwendig erweist, diesen Bereich zur Signalauslese mitzuverwenden, könnten die Pitchadapter erst zu- und dann wieder auffächern. Es wird also ein Pitchadapter benutzt, der von den Streifen auf die Ausleseabstände zufächert, um dann nach den Anschlussfeldern wieder auf den Streifenabstand aufzufächern. Darum habe ich mit Hilfe des LayoutEditors verschiedene Pitchadapter gezeichnet, die versuchen, folgende Anforderungen zu erfüllen:

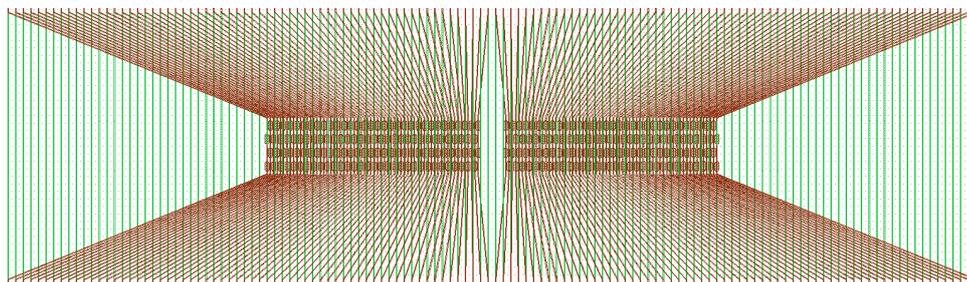
- Möglichst kleine Länge, um möglichst wenig Kopplungskapazität zu verlieren.
- Möglichst große Abstände zwischen den Verbindungslinien und

¹ Strixel: Zusammengesetzt aus Strip und Pixel

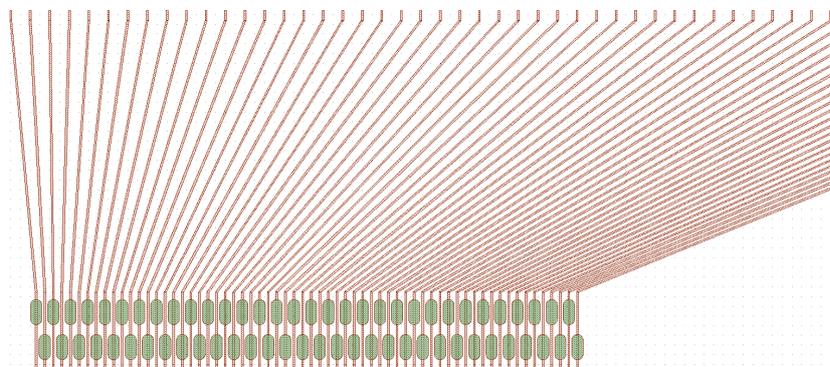
- möglichst kleiner Überlapp mit dem Implantat von anderen Streifen, um möglichst wenig parasitäre Kopplung zu erzeugen, die die Signalladung reduziert und das Rauschen erhöht.

Die Pitchadapter beinhalten alle das zu- und auffächern, wobei primär die verschiedenen Varianten verglichen werden sollen. Um die verschiedenen Varianten vergleichen zu können, wurde für alle der gleiche Parametersatz für Streifenzahl, Streifenabstand, Linienbreite und bis auf eine Ausnahme, für den Abstand der Auslesefelder verwendet. Dabei betragen, soweit nicht anders angegeben, die Linienbreite $10\mu\text{m}$, der Streifenpitch $100\mu\text{m}$ sowie der Pitch der Auslesefelder $44\mu\text{m}$. Der Pitchadapter ist damit $12,7\text{mm}$ breit und der Bereich der Auslesefelder ist $0,72\text{mm}$ lang und $5,96\text{mm}$ breit.

5.1.1 Nicht-abgewinkelter Pitchadapter



(a) Übersicht



(b) Ausschnitt

Abbildung 33: Ein nicht-abgewinkelter Pitchadapter, nach Vorbild des klassischen Pitchadapters, mit darunterliegendem p^+ -Implantat.

Vorteil: sehr einfach zu zeichnen, Nachteil: teilweise sehr geringer Abstand zwischen den Streifen und Überlapp von Aluminium mit fremdem Implantat.

Dieser Pitchadapter ist $3,65\text{mm}$ lang und $12,71\text{mm}$ breit.

In [Abbildung 33a](#) ist ein Pitchadapter zu sehen, der einfach die Streifen direkt mit den Auslesefeldern verbindet. Dieser Pitchadapter hat folgende Vor- und Nachteile:

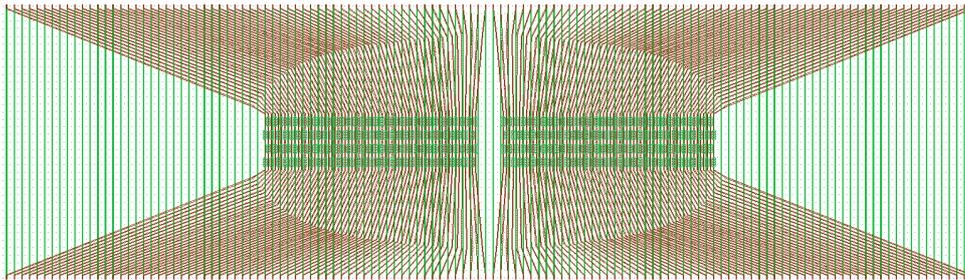
Vorteile:

- Sehr einfach zu zeichnen.
- Hat keine scharfen Knicke. Dadurch werden Feldspitzen vermieden.

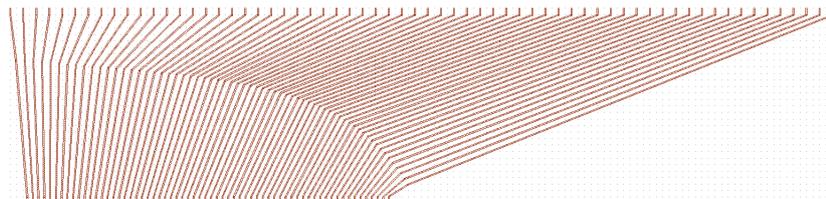
Nachteile:

- Der minimale Abstand zwischen zwei Streifen beträgt lediglich $7\mu\text{m}$.
- Der Überlapp zwischen dem Verbindungsstreifen und dem Implantat eines fremden Streifens ist sehr groß.
- Der Bereich links und rechts der Auslesefelder wird nicht genutzt.

5.1.2 Einfach abgewinkelter Pitchadapter, Variante 1



(a) Übersicht



(b) Ausschnitt

Abbildung 34: Ein einfach abgewinkelter Pitchadapter Variante 1 mit p^+ -Implantat.
Vorteil: Verbesserung des minimalen Abstandes zwischen den Streifen, Nachteil: weiter großer Überlapp von Aluminium und fremdem Implantat
Dieser Pitchadapter ist 3,65mm lang und 12,71mm breit.

In Abbildung 34a ist ein einfach abgewinkelter Pitchadapter zu sehen. Bei diesem wurde die direkte Verbindung von Auslesefeldern und Streifen durch eine abgewinkelte Verbindung ersetzt. Der Punkt des Abwinkeln verschiebt sich dabei von Streifen zu Streifen. Dadurch wird bei beiden Teilen des Verbindungsstücks ein relativ paralleler Verlauf erreicht. Dadurch wird der Abstand zwischen den Linien konstanter und der minimale Abstand ist größer als beim nicht-abgewinkelten Pitchadapter 5.1.1.

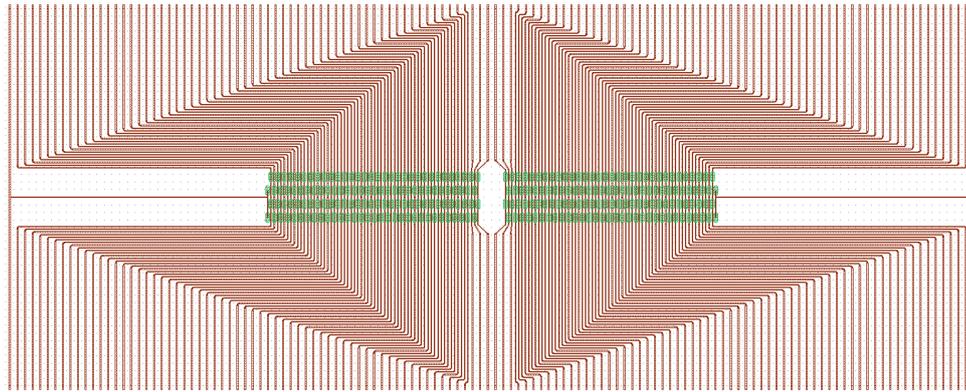
Vorteil:

- Dieser Pitchadapter weist im Vergleich zum klassischen Pitchadapter 5.1.1 einen größeren minimalen Abstand zwischen zwei Streifen von $18\mu\text{m}$ auf.

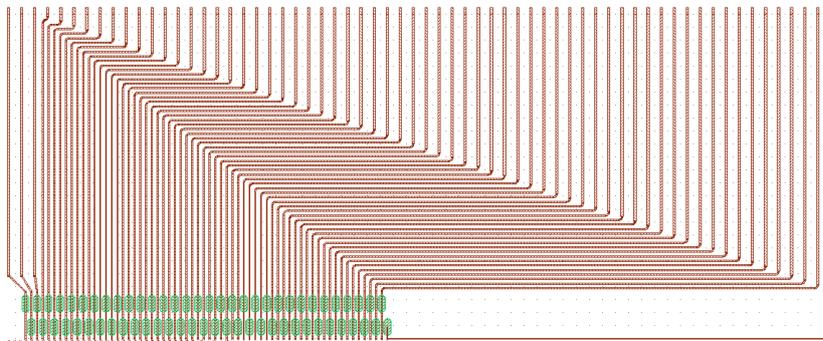
Nachteile:

- Hat weiterhin einen großen Überlapp von Aluminium und fremdem Implantat, vor allem im inneren Bereich.
- Der Bereich links und rechts der Auslesefelder wird nicht genutzt.

5.1.3 Einfach abgewinkelter Pitchadapter, Variante 2



(a) Übersicht



(b) Ausschnitt

Abbildung 35: Die zweite Variante eines einfach abgewinkelten Pitchadapters.

Vorteil: teilweise sehr kurze Unterbrechung, Nachteil: Überlapp von Aluminium und fremdem Implantat bei einem Streifen unter Umständen sehr groß.

Dieser Pitchadapter ist maximal 5mm lang und 12,71mm breit.

In dem in [Abbildung 35a](#) gezeigten Pitchadapter werden die Verbindungsstreifen nur in 90° -Winkeln gebogen. Dadurch sind die Abstände zwischen den Streifen in jedem Bereich konstant. Zudem sind die Aluminiumstreifen des eigentlichen Sensors nicht mehr von gleicher Länge.

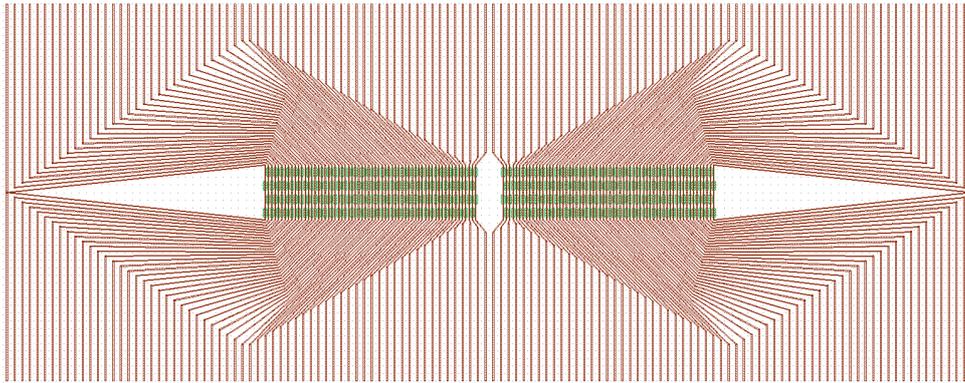
Vorteile:

- Der minimalen Abstand zwischen zwei Streifen beträgt $25\mu\text{m}$.
- Die Unterbrechung im Außenbereich ist sehr kurz (unter 1mm).
- Der Platz wird vollständig ausgenutzt.

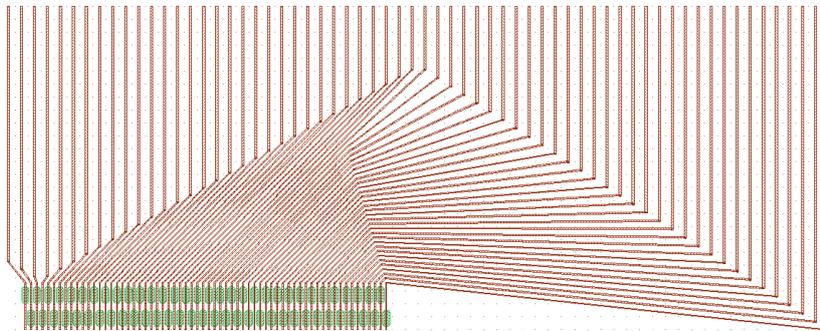
Nachteile:

- Die Unterbrechung im Innenbereich ist sehr lang (5mm).
- Großer Überlapp zwischen einem fremden Implantat und einem Verbindungsstreifen möglich.

5.1.4 Einfach abgewinkelter Pitchadapter, Variante 3



(a) Übersicht



(b) Ausschnitt

Abbildung 36: Die dritte Variante eines einfach abgewinkelten Pitchadapters.
 Vorteil: teilweise sehr kurze Unterbrechung und kleiner Überlapp.
 Dieser Pitchadapter ist maximal 4mm lang und 12,71mm breit.

Dieser Pitchadapter (Abbildung 36a) ist im Innenbereich noch nicht abgewinkelt. Erst im Außenbereich wird die Verbindungslinie abgewinkelt. Dabei werden die Streifen zunächst wie beim klassischen Pitchadapter 5.1.1 direkt mit den Auslesefeldern verbunden, mit dem Unterschied, dass die Streifen so nah wie möglich an den Auslesebereich gezogen werden. Dies hat zur Folge, dass die Verbindungsstreifen nahezu parallel verlaufen. Wird aber ab einem bestimmten Punkt begonnen abzuwinkeln, anstatt die Anordnung bis nach außen zu ziehen, kann der Streifen wieder weiter nach innen gezogen werden. Dadurch ist es möglich die Unterbrechung der Streifen wieder zu reduzieren. Gleichzeitig wird durch diese durchweg schräg zum Implantat laufende Führung der Verbindungsstreifen die Überlappfläche möglichst klein gehalten.

Vorteile:

- Der minimale Abstand zwischen zwei Streifen beträgt $21\mu\text{m}$.
- Der Platz wird vollständig ausgenutzt.

Nachteil:

- Die maximale Länge beträgt 4mm.

5.1.5 Einfach abgewinkelter Pitchadapter, Variante 3, mit auseinandergezogenem Auslesefeld

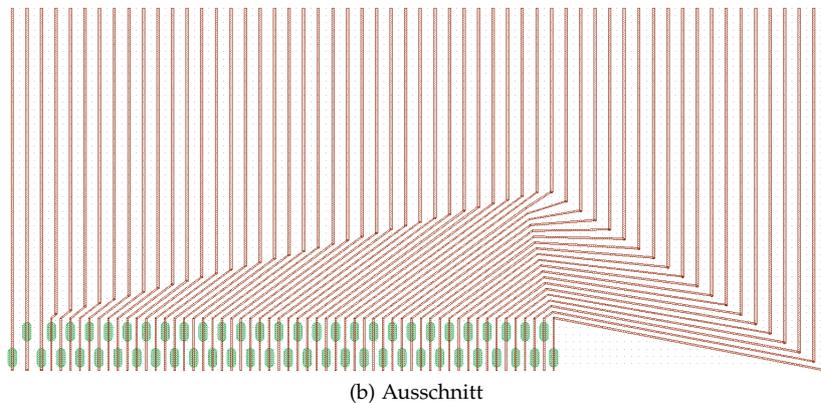
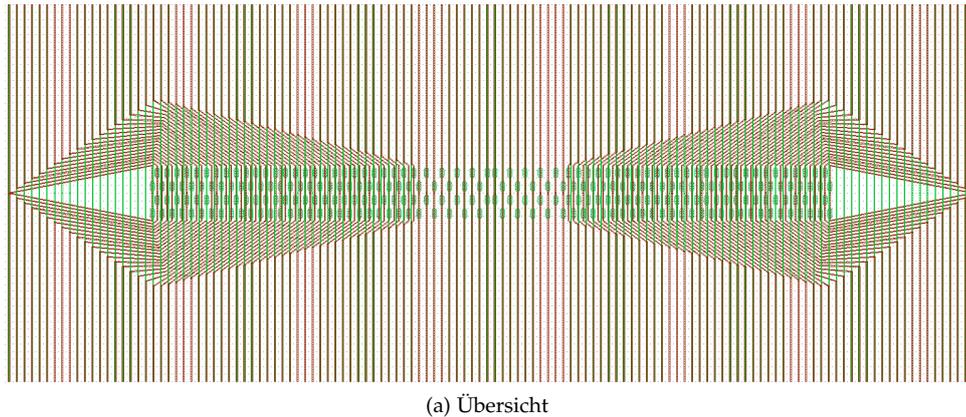


Abbildung 37: Die dritte Variante eines einfach abgewinkelten Pitchadapters mit auseinandergezogenem Auslesefeld.

Vorteil: teilweise sehr kurze Unterbrechung und kleiner Überlapp.

Dieser Pitchadapter ist maximal 2,5mm lang und 12,71mm breit.

In dieser Abwandlung des Pitchadapters 5.1.4 (Abbildung 37a) ist das Auslesefeld auseinandergezogen auf einen Pitch von $100\mu\text{m}$ im Innenbereich, um an der Stelle ganz ohne Pitchadapter auszukommen und $65\mu\text{m}$ im Außenbereich. Dabei wurde versucht diese Parameter so nah wie möglich am Streifenpitch zu wählen, dabei aber Rücksicht auf die maximale Distanz zu nehmen, die noch mit den Verbindungsdrähten zu überbrücken ist. Allerdings ist es dann schwierig die Verbindungsdrähte (sog. Bonds) zu setzen. Möglicherweise eignet sich diese Variante daher nicht für eine Massenproduktion.

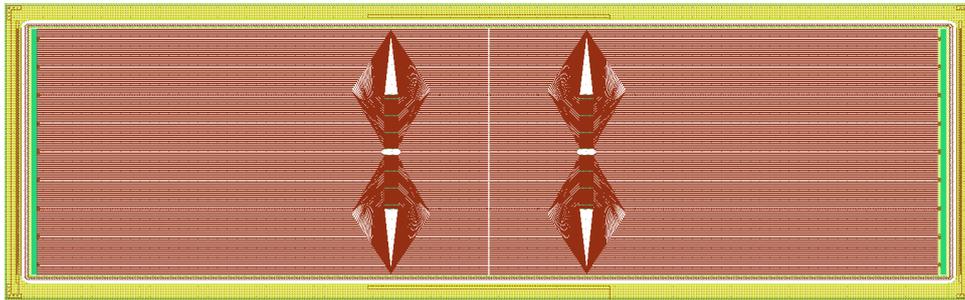
Vorteile:

- Der minimale Abstand zwischen zwei Streifen beträgt $29\mu\text{m}$.
- Die maximale Länge beträgt 2,5mm.
- Der Platz wird vollständig ausgenutzt.

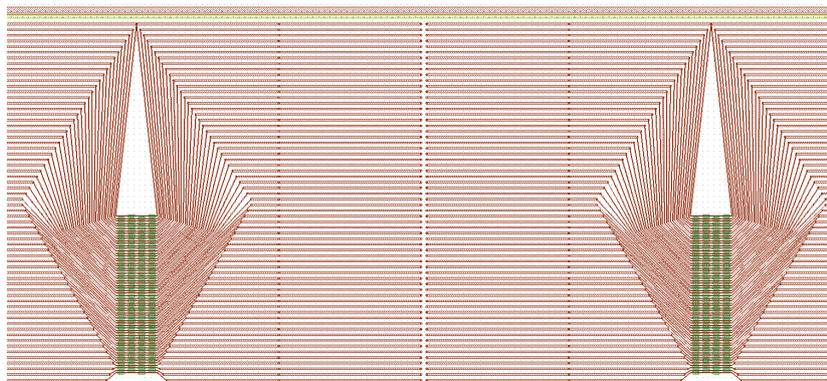
Nachteil:

- Es ist schwierig die Verbindungsdrähte zu setzen.

5.1.6 Minisensoren mit integrierten Pitchadaptern



(a) Übersicht



(b) Ausschnitt

Abbildung 38: Minisensoren mit zwei mal 128 Streifen und zwei Pitchadaptern. Die Streifenlänge beträgt 2,5cm.

Abbildung 38a zeigt einen Minisensor, dessen Streifen in der Mitte unterbrochen sind (sowohl Implantat als auch Aluminium). Im inneren Bereich sind zwei Pitchadapter aus 5.1.4 angebracht. Die Auslesefelder des linken Pitchadapters haben einen Abstand von 9,5mm von den Auslesefeldern des rechten Pitchadapters. Es ist wahrscheinlich, dass sogar ein noch größerer Abstand nötig ist. Der Minisensor hat eine Länge von 5,4cm und eine Streifenlänge von 2,5cm. Dies sind also realistische Werte, wenn von einem Sensor im bisherigen Format von 10cm Streifenlänge ausgeht, der in vier Strixel unterteilt ist.

Variante	min. Länge	max. Länge	min. Abstand der Verbindungslinien
nicht abgewinkelt	3,65mm	3,65mm	7 μ m
einfach abgewinkelt, V 1	3,65mm	3,65mm	18 μ m
einfach abgewinkelt, V 2	0,72mm	5mm	25 μ m
einfach abgewinkelt, V 3	0mm	4mm	21 μ m
einfach abgewinkelt, V 3, auseinandergezogen	0mm	2,5mm	29 μ m

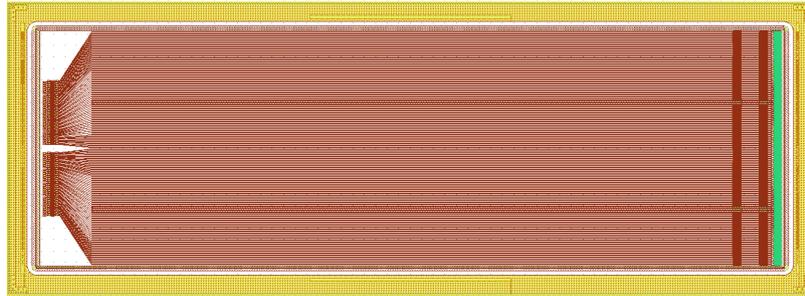
5.1.7 Schlussfolgerung

Im folgenden sind noch einmal die wichtigsten Werte zusammengefasst: Von den verschiedenen vorgestellten Varianten sieht der Pitchadapter 5.1.4 am vielversprechendsten aus. Er hat einen relativ großen Abstand zwischen den Linien, bei möglichst großen Aluminiumstreifen und möglichst kleinem Überlapp der Verbindungslinien mit dem Implantat anderer Streifen.

5.2 WEITERE STRUKTUREN

Außer den oben gezeigten Pitchadaptern wurden auch noch andere Strukturen gezeichnet. Zwei dieser Strukturen, ein Ministrixelsensor (siehe Abbildung 40a) und ein Minisensor mit integriertem nicht-abgewinkeltem Pitchadapter (siehe Abbildung 39a) werden von HPK produziert.

Der Ministrixelsensor, der in Abbildung 40a gezeigt ist, benötigt keine Ausleseelektronik direkt auf dem Sensor. Der Sensor besteht aus 4×128 Strixel. Dabei sind die beiden inneren Strixel in der Mitte mit der Biasleitung verbunden, während die Auslestreifen über Verbindungstreifen zwischen den äußeren Strixel mit der Elektronik verbunden werden. Dies hat allerdings den Nachteil, dass der Abstand der Streifen relativ groß sein muss.

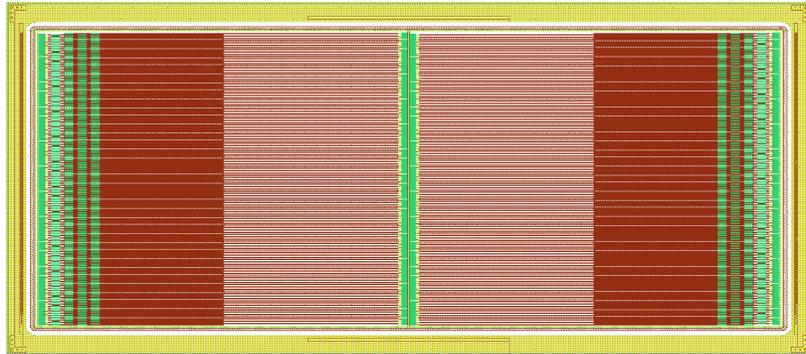


(a) Übersicht

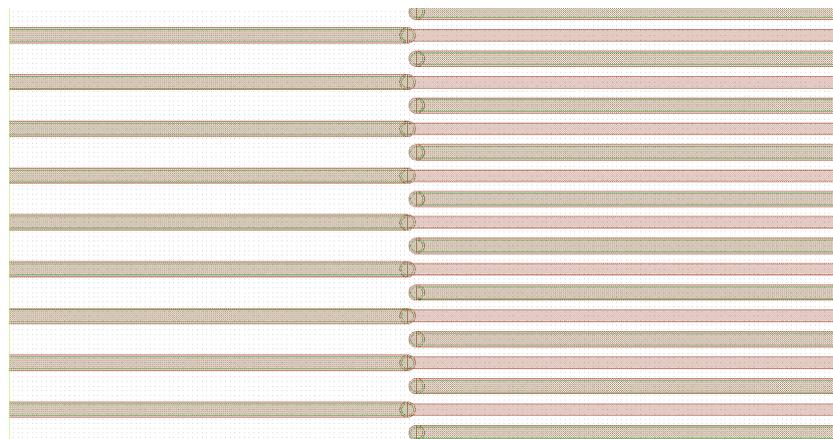


(b) Ausschnitt

Abbildung 39: Minisensor integriertem Pitchadapter



(a) Übersicht



(b) Ausschnitt

Abbildung 40: Ministrixelsensor mit vier Strixel

Die Auslese pads sind jeweils am Rand untergebracht. Um die inneren Strixel zu erreichen laufen deshalb zwischen den äußeren Streifen die Verbindungslinien. Die Bias-Anschlüsse der inneren Strixel sind mit einer Biasleitung, die in der Mitte des Sensors quer zur Strixelrichtung verläuft verbunden.

Teil III

ENTWICKLUNG UND REALISIERUNG EINER VOLLAUTOMATISCHEN PROBESTATION

6.1 DIE ANFORDERUNGEN AN EINE TESTSTATION ZUR ENTWICKLUNG UND QUALITÄTSPRÜFUNG VON SILIZIUMSENSOREN

Für die Entwicklung von Sensoren ist es notwendig, Testsensoren herzustellen und ihre Eigenschaften zu überprüfen. Auch die Qualität der für den tatsächlichen Einsatz vorgesehenen Sensoren muss überwacht werden. Dabei werden die physikalischen Eigenschaften der Sensoren gemessen. Zusätzlich sollte die Temperatur, bei der die Messung durchgeführt wird, einstellbar sein, da die elektrischen Eigenschaften des Halbleiters, insbesondere bei hoher Bestrahlung, stark von der Temperatur abhängen. Die elektrischen Eigenschaften sind dabei unterteilt in:

- die Eigenschaften des gesamten Sensors:
 - Kapazität über Spannung
 - Leckstrom über Spannung
- die Eigenschaften der einzelnen Funktionselemente eines Sensors:
 - Kopplungskapazität: Die Kapazität zwischen Implantat und Auslestreifen.
 - Biaswiderstand
 - Zwischenstreifenwiderstand und -kapazität: Der Widerstand und die Kapazität zwischen den Implantaten, bzw. Aluminiumstreifen, benachbarter Streifen.
 - Streifenleckstrom
 - Pinhole: Kurzschlüsse zwischen Implantat und Auslestreifen.
- die Eigenschaften spezieller Teststrukturen. Jede dieser Teststrukturen ist dabei zusätzlich für die Messung einer der oben aufgeführten Eigenschaften vorgesehen.

Um diese Funktionen bereitzustellen, müssen folgende Anforderungen erfüllt werden:

- Um die einzelnen Streifen messen zu können, ohne für jeden Streifen die Nadeln neu setzen zu müssen, muss der Tisch, auf dem die zu messende Struktur liegt, der sogenannte Jig, mikrometergenau verfahrbar sein.
- Um die Nadeln auf den kleinen Strukturen, in der Größenordnung von einigen Mikrometern, positionieren zu können wird ein Mikroskop benötigt.
- Um die Temperatur des Jigs schnell und stabil einstellen zu können wird ein leistungsfähiges Kühlsystem benötigt.
- Um bei tiefen Temperaturen Messungen durchführen zu können, muss die Luftfeuchtigkeit in der Station niedrig gehalten werden. Allerdings verändert sich die Größe der zu messenden Objekte bei Temperaturänderung. Dadurch wird es nötig, die Nadelposition bei tiefen Temperaturen zu verändern, bevor die Messung durchgeführt werden kann. Da bei tiefen Temperaturen die Luftfeuchtigkeit niedrig gehalten werden muss, um Kondensation auf dem Jig zu verhindern, wird ein Luftfeuchte-Schott benötigt, um die Nadeln positionieren zu können. Wenn das Schott eingesetzt ist, kann nicht mehr durch die Okulare des Mikroskops geschaut werden, deshalb benötigt es eine hochauflösende und schnelle Kamera.

- Die Messgeräte, die für die Messungen benötigt werden, müssen mit den benötigten Nadeln für die jeweilige Messung automatisch verbunden werden, um die Messungen automatisch durchführen zu können.
- Die einzelnen Messungen sollen sich zusammenfassen lassen, um verschiedene Messungen automatisch durchführen zu können, ohne dass der Benutzer sich zwischendurch darum kümmern muss.

6.2 ÜBERSICHT ÜBER DEN AUFBAU DER GESAMTEN TESTSTATION

Um die in 6.1 genannten Anforderungen zu erfüllen, wurde eine Probestation entwickelt und gebaut, deren Aufbau im folgenden erläutert werden soll.

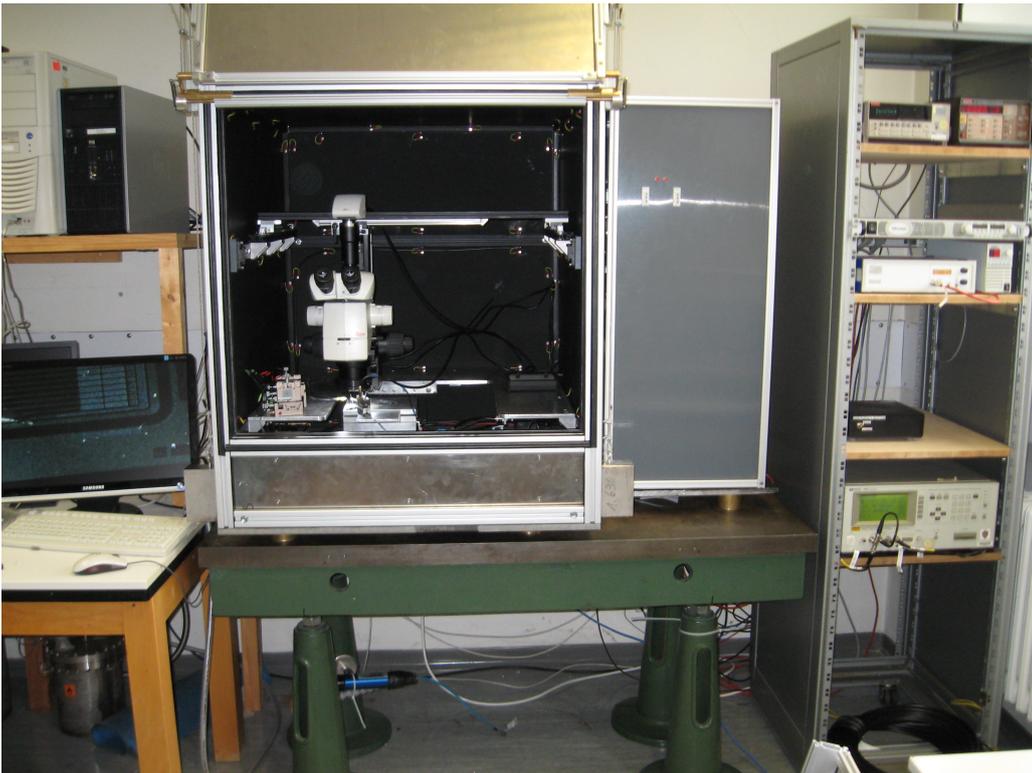


Abbildung 41: Gesamtaufbau der Probestation:

Der Gesamtaufbau besteht aus einem schweren Tisch, Schwingungsdämpfern, der Probestation der Service-Box sowie dem Gerätereal und dem Kontrollrechner.

Der Gesamtaufbau besteht, wie in Abbildung 41 zu sehen aus folgenden Teilen:

- Aus einem großen und schweren Tisch, auf dem die Probestation steht.
- Zwischen dem Tisch und der Bodenplatte der Probestation befinden sich sieben Schwingungsdämpfer.
- Aus einem Gerätereal sowie einem Kontrollrechner, die sich daneben befinden.
- Auf der Bodenplatte steht die Probestation.
- Neben der Probestation befindet sich eine Service-Box, die die Relais und die Ansteuer- und Ausleseplatinen beinhaltet.

6.3 DÄMPFUNGSSYSTEM

Da Schwingungen zwischen den Nadeln und dem Jig dazu führen können, dass der zu untersuchende Sensor zerkratzt und damit unbrauchbar wird, muss eine Schwingung dieser beiden zueinander vermieden werden. Die Verfahrtsche und der Seitentisch, auf dem die Nadeln stehen, sind sehr fest miteinander verbunden, allerdings kann es trotzdem zu Schwingungen zueinander kommen. Daher sollte der Übertrag von Schwingungen von außen auf die Station so gering wie möglich sein. Um dies zu erreichen, wurde ein Schwingungsdämpfungssystem gebaut, dessen einzelne Schwingungsdämpfer zwischen der Bodenplatte und einem sehr schweren Tisch platziert wurden. Jeder Dämpfer besteht dabei aus einem Messingrohr, in dem von unten nach oben jeweils eine Schicht Schaumstoff, Sand, Schaumstoff, Sand, Schaumstoff und Styropor eingebracht wurden. Darauf sitzt noch ein Abstandhalter aus Messing, der verhindert, dass die Bodenplatte auf dem Rand des Rohrs aufsitzen kann.

6.4 ÜBERSICHT ÜBER DEN AUFBAU DER PROBESTATION

Die Probestation besteht aus folgenden Teilen:

- Drei Linearverfahrtschen, je einer in X-, Y-, und Z-Richtung.
- Einem kühlbaren Jig mit Vakuumansaugsystem.
- Einem Seitentisch für die stationären Nadeln.
- Sechs Mikromanipulatoren mit Nadelhalterung.
- Einem Satz von 27 Relais.
- Einem Mikroskop mit hoher Vergrößerung (max. 256 fach) und hochauflösender Kamera (3 Megapixel).
- Einem manuellen Linearverfahrtsystem für das Mikroskop.
- Einer nahezu luft- und lichtdichten Trägerstruktur und Hülle.
- Einer Tür, die luft- und lichtdicht schließt.
- Einem Plexiglasschott, das bis auf Durchgriffe luftdicht schließt.
- Einem Vakuumverteilsystem.
- Die Messgeräte.

6.5 DIE VERFAHRTISCHE

Alle Verfahrtsche sind mit codierten 2-Phasen-Schrittmotoren ausgestattet und verfügen über hochpräzise Endschalter, die auf dem Hall-Effekt basieren. In den X- und Y-Tischen drehen die Schrittmotoren dabei eine Spindel, die den Wagen mikrometergenau verfährt. Beim Z-Tisch wird eine Hubkonstruktion angetrieben. Durch die Codierung des Schrittmotors kann dabei zunächst die Stellung des Motors genau bestimmt werden. Da die Spindel (bzw. die Hubkonstruktion) spielfrei ist, kann von der Motorposition auf die Position des Wagens geschlossen werden. Allerdings ist es notwendig in regelmäßigen Abständen mit Hilfe des Endschalters die Absolutposition zu überprüfen. Dazu wird der Wagen gefahren, bis der Endschalter auslöst und die Position auf Null gesetzt. Die Fahrwege sind dabei in X-Richtung: 260mm, in Y-Richtung 210mm und in Z-Richtung 30mm.

6.6 DIE MIKROMANIPULATOREN

Die Mikromanipulatoren bieten die Möglichkeit die Nadeln mikrometergenau in alle drei Raumrichtungen zu bewegen. Der Manipulator wird für einen festen Stand mit Hilfe von Vakuumfüßen auf dem Tisch befestigt. An drei Mikrometerschrauben kann die Position des Auslegers, an dem die Messnadel befestigt ist, bewegt werden. Damit wird es möglich die Nadeln genau zu positionieren.

6.7 KÜHLBARER JIG

Der kühlbare Jig dient dazu, den Sensor kontrolliert auf eine gewünschte Temperatur zu kühlen, einen Kontakt für das Anlegen der Biasspannung herzustellen und den Sensor mittels eines Vakuumsaugsystems auf seiner Position zu halten. Die Entwicklung des Jigs ist in der Diplomarbeit von Karl-Heinz Hoffmann beschrieben [Hof08].

6.7.1 Das Peltier-Element

Der Aufbau der Kühlung des Jigs basiert auf Peltier-Elementen, die Wärme von einer Seite auf die andere transportieren. Der Peltier-Effekt tritt auf, wenn zwei Halbleiter mit unterschiedlichen hohen Leitungsbandkanten abwechselnd hintereinander geschaltet werden. Wird eine Spannung an diese Kette gelegt, fließt nur ein Strom, wenn dessen Elektronen beim Übergang vom Halbleiter mit der niedrigeren Kante zu dem mit der höheren Kante Wärmeenergie aufnehmen. Beim Übergang vom Halbleiter mit der höheren Kante zu dem mit der niedrigeren Kante wird diese Energie wieder abgegeben. Werden nun die wärmeaufnehmenden Übergänge immer auf der einen Seite und die wärmeabgebenden Übergänge immer auf der anderen Seite angebracht, wird mittels eines elektrischen Stroms Wärme von einer Seite auf die andere transportiert. Damit kann, je nach Stromrichtung, die eine Seite entweder geheizt oder gekühlt werden.

6.7.2 Aufbau

Der Jig besteht aus mehreren Teilen. Unten befindet sich eine Adapterplatte, die auf den Verfahrtschisch geschraubt wird und in der die Kabel für die Temperatursensoren und die Peltier-Elemente gebündelt werden. Darüber befindet sich eine mit Kühlflüssigkeit durchflossene Platte, die auf relativ konstanter Temperatur (4°C bis 6°C) gehalten wird. Zwischen dieser und der obersten Platte befinden sich die Peltierelemente und eine elektrische Isolierung. Die oberste Platte ist mit einem Vakuumsaugsystem versehen, um die Sensoren fixieren zu können.

6.7.3 Kühlgerät

Es hat sich gezeigt, dass dieser Aufbau eines Kühljigs sehr viel Wärme transportieren kann, aber auch sehr viel Wärme produziert. Die Peltier-Elemente haben eine maximale Verlustleistung von ca. 300W , zusätzlich zur transportierten Wärme. Das Vorkühlgerät muss also viel Wärme aus der Station abführen können, braucht aber die Vorkühltemperatur nicht konstant zu halten, es muss also über keine aufwändige Regelung verfügen. Der eingesetzte Durchlaufkühler muss die Jigs von zwei Stationen kühlen. Darum wurde er so gewählt, dass er bei einer Temperatur der Kühlflüssigkeit von 10°C eine Kühlleistung von 780W hat. Diese Leistung nimmt zwar zu tieferen Temperaturen hin ab, die Leistung ist aber bei 4°C immer noch ausreichend.

6.7.4 Sicherungssysteme

Durch diese große Leistung ergibt sich aber auch die Gefahr einer Überhitzung. Falls das Kühlgerät abgeschaltet wird oder ausfällt, während die Peltier-Elemente weiter arbeiten, kann die Wärme nicht mehr abgeführt werden und der ganze Jig heizt sich auf. Um einen Anwendungsfehler zu vermeiden, wurde ein zentraler Schalter angebracht, der das Kühlgerät und die Peltier-Versorgung gemeinsam schaltet.

Um bei einem Ausfall eines Gerätes die Gefahr einer Überhitzung zu minimieren, wurden Relais eingesetzt, die über eigene Sensoren am Jig die Temperatur der oberen und der Vorkühlplatte kontrollieren. Wird einstellbare Schwelle an der Vorkühlplatte oder an der oberen Platte überschritten, wird die Stromversorgung der Peltier-Elemente ausgeschaltet. Um sie wieder einzuschalten, muss sich die Temperatur wieder im erlaubten Bereich befinden und ein Reset-Taster muss manuell betätigt werden.

6.8 DAS MIKROSKOP

Als Mikroskop kommt ein Stereomikroskop zum Einsatz, das eine optische Vergrößerung im Bereich zwischen Faktor 12,5 und 256 bietet. Der sichtbare Bereich hat einen Durchmesser zwischen 19,2mm und 0,94mm. Ein Mikroskop mit hoher Vergrößerung ist notwendig, um die kleinen Strukturen sowie die Nadeln beim positionieren gut erkennen zu können. Zusätzlich besitzt das Mikroskop eine Kamera, die hochauflösende Bilder mit einer Bildrate von min 15 Bilder/s ausgeben kann. Dadurch wird es möglich, die Nadeln mit Hilfe eines Bildschirms zu positionieren. Da um eine Messung bei einem gekühlten Jig durchzuführen die Luftfeuchtigkeit niedrig gehalten werden muss, muss hier ein Luftfeuchteschott eingesetzt werden. Die Nadelposition muss aber bei großen Temperaturunterschieden nach Erreichen der Solltemperatur noch einmal korrigiert werden, da sich die Größe des Sensors mit der Temperatur ändert. Um dies zu tun, muss es möglich sein die Nadelposition zu ändern, während ein Austausch der Luft zwischen der Station und dem Raum verhindert wird. Dies wird durch das Luftfeuchteschott erreicht. Allerdings kann das Mikroskop bei eingesetztem Schott nur noch über den Bildschirm verwendet werden, da sich eine Scheibe zwischen den Okularen und dem Benutzer befindet.

6.9 LUFTFEUCHTESCHOTT

Das Luftfeuchteschott dient dazu, bei gekühltem Jig, die Nadeln positionieren zu können. Wie in 6.8 beschrieben, muss die Luftfeuchtigkeit in der Station niedrig gehalten werden. Um dies zu erreichen, muss ein Austausch von Raumluft und der Luft innerhalb der Station vermieden werden. Dazu muss das Luftfeuchteschott folgende Anforderungen erfüllen:

- Das Schott muss an den Rändern dicht schließen, um den Luftaustausch zu minimieren,
- durchsichtig sein, um ein Hantieren im inneren zu ermöglichen,
- leicht zu entfernen sein, um zum Beispiel neue Sensoren einzulegen.
- Es muss möglich sein, durch das Schott hindurch die Nadeln zu positionieren.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, besteht das Schott aus einem Rahmen aus dünnen Aluminiumprofilen, einer Scheibe aus Acrylglas mit Druchgriffen und einer Messingleiste. Im Bereich der Station, die für das Schott vorgesehen ist, sind auf der linken und rechten sowie der oberen Seite Gummidichtungen angebracht. Auf der

Unterseite ist die Nut des Aluminiumprofils offen, um mit Hilfe der Messingleiste ein einfaches Einsetzen sowie einen stabilen Stand zu ermöglichen. Um zu verhindern, dass das Schott zu weit nach innen gedrückt wird und ins Innere der Station fällt, sind auf der linken und rechten Seite Schnäpper angebracht, die an der richtigen Position einrasten.

6.10 RELAIS

Die Relais werden verwendet, um die für eine Messung benötigten Geräte mit den jeweils benötigten Nadeln zu verbinden. Die Relais wurden außerhalb der eigentlichen Station an der Seitenwand, innerhalb der Service-Box, angebracht. Es wurden für alle Bereiche, in denen die Spannung unterhalb 600V bleibt, BNC¹-Relais verbaut. Für die Bereiche, in denen die Spannung bis zu 2kV betragen kann, wurden spezielle Relais verwendet, die mit SHV-Verbindern versehen wurden. Die Ansteuerung der Relais erfolgt über eine Platine, die USB-Signale des PCs auf einzelne binäre Kanäle umsetzt. Diese Kanäle werden über eine Verstärkerplatine mit den Relais verbunden.

6.11 MANUELLES VERFAHRSSYSTEM FÜR'S MIKROSKOP

Das Verfahrenssystem des Mikroskops muss eine Positionierung des Mikroskops ermöglichen und feststellbar sein. Dazu wurden vier Führungsschienen mit kugelgelagerten Wagen verwendet. Dabei wurden auf der linken und rechten Seite der Station jeweils eine Schiene befestigt. Auf den auf dieser Schiene laufenden Wagen wurden zwei Schienen quer dazu befestigt. An den unter diesen Schienen laufenden Wagen wird das Mikroskop befestigt. Am linken Wagen und dem vorderen Querwagen wurden Handklemmelemente befestigt, mit denen sich die Position festklemmen lässt.

6.12 TRÄGERSTRUKTUR UND HÜLLE

Die Trägerstruktur dient dazu, alle einzelnen Teile, wie die Hüllenbleche, die Seitentische, die Mikroskophalterung und die Bodenplatte, zu verbinden (siehe Abbildung 42). Dazu soll sie möglichst tragfähig sein und eine hohe Steifigkeit besitzen. Deshalb wurde sie aus Aluminiumprofilen gebaut. Wie in Abbildung 42 zu sehen, wurde die Trägerstruktur dabei so aufgebaut, dass es an den vier Ecken jeweils einen Längsträger gibt. Dazwischen gibt es auf vier verschiedenen Höhen Ringe von Querträgern.

Durch die zwei mittleren Ebenen von Querträgern wird zudem die Steifigkeit der gesamten Station erhöht. Dadurch wird das Risiko von Schwingungen zwischen den Nadeln und dem zu messenden Objekt weiter verringert.

Die Hülle besteht aus Aluminiumblechen, die auf der Innenseite geschwärzt sind, um möglicherweise einfallendes Licht zu absorbieren. Die Bleche werden jeweils zwischen den Trägern angebracht, so dass an den Seiten und auf der Rückseite jeweils drei Bleche übereinander angebracht sind. Auf der Vorderseite ist nur zwischen dem untersten und dem zweituntersten Querträger ein Blech angebracht. Die untersten Seitenbleche beinhalten dabei alle benötigten Durchführungen. Auf der linken Seite sind das der Kühlwasser-, der Trockenluft- und der Vakuumananschluss. Auf der rechten Seite werden die Anschlusskabel für die Nadeln sowie die Anschlüsse des Mikroskops durchgeführt. Das unterste Blech auf der Vorderseite dient als Träger für die Ventile des Vakuumsystems.

¹ BNC: Bayonet Neill Concelman, Koaxialsteckverbinder, Spannungsfest bis 600V

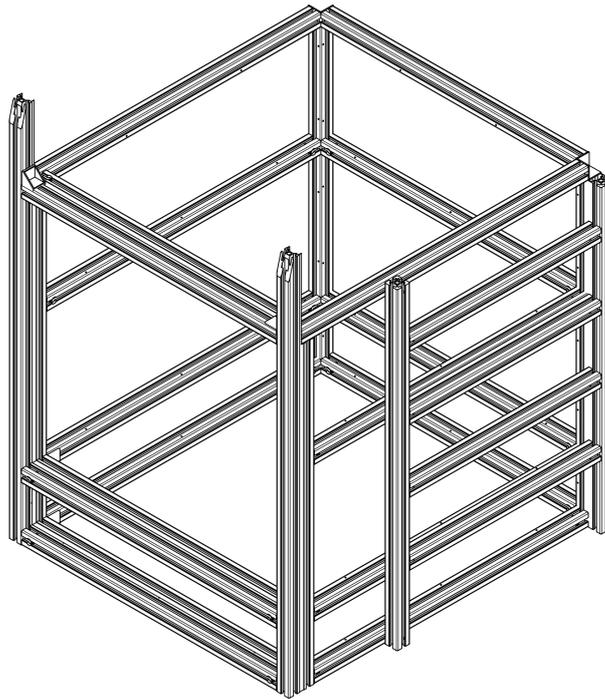


Abbildung 42: Zeichnung der Trägerstruktur.

Zu sehen sind die vier Längsträger und die vier Ringe von Querträgern. An der rechten Seite befindet sich die Halterung für die Relais.

6.13 SEITENTISCH

Der Seitentisch ist, um eine hohe Stabilität zu gewährleisten, in U-Form ausgeführt und an der Innenseite des ersten Querträgerrings befestigt. Die Ecken sind ausgeschnitten, um den Trockenluftverteilschlauch hindurchführen zu können, sowie die Möglichkeit zu haben, in Zukunft Kabel durchzuführen zu können. Im inneren Bereich des Tisches ist Platz für die Bewegung des Jigs. Dieser Bereich ist dabei so groß gewählt, dass der Jig rein mechanisch nicht mit dem Seitentisch kollidieren kann.

Die Nadeln, die auf diesem Tisch platziert werden, haben ihre benötigten Anschlüsse direkt in der Nähe ihrer bevorzugten Position, sodass hier kurze Kabel verwendet werden können und die Kabelführung übersichtlich bleibt. Zudem sind die Anschlüsse des Jigs unter dem hinteren Bereich des Seitentisches angebracht. Dies dient, wie bei den Nadelhaltern, dazu die Anschlusskabel und -Schläuche des Jigs übersichtlich führen zu können.

6.14 TÜR

Die Tür muss mehrere Anforderungen erfüllen:

- Sie muss erschütterungsfrei zu öffnen und zu schließen sein.
- Sie muss lichtdicht schließen.
- Sie darf im geöffneten Zustand weder den Blick nach links auf den Kontrollmonitor noch nach rechts auf den Mikroskopmonitor und die Geräte versperren.

Die Tür besteht dazu aus einem Rahmen aus dünnen Aluminiumprofilen und einem Aluminiumblech als Füllung. Damit sie dicht schließt, ist in den Nuten der Aluminiumprofile der Station um die Türöffnung herum Dichtungsmaterial angebracht. Um zu erreichen, dass sie in geöffnetem Zustand nicht im Weg ist, wird sie nach oben geöffnet. Wegen des Dichtungsmaterials, das die Bewegung der Tür stark bremst, ist die Aufhängung so ausgeführt, dass die Tür vor dem Aufschieben ein Stück nach vorne geklappt wird. Die Aufhängung der Tür selbst läuft mit Hilfe eines Kunststoffgleiters in der seitlichen Nut der vorderen Längsträger. Die vorderen Längsträger besitzen zwei seitliche Nuten, wodurch es möglich wird, dass ein Gegengewicht zur Tür in der zweiten Nut läuft.

6.15 LED-RINGLICHT MIT INFRAROTEN UND WEISSEN LEDs

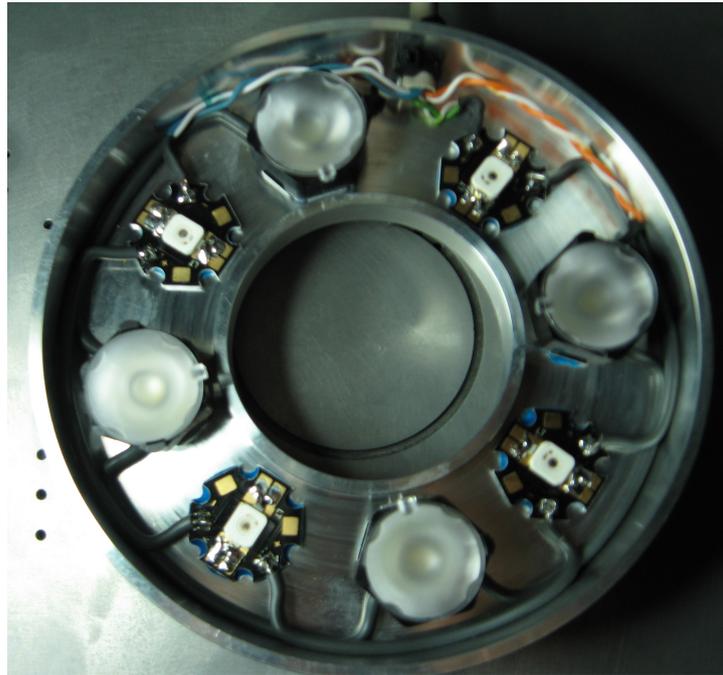


Abbildung 43: LED-Ringlicht

LED-Ringlicht, bestehend aus infraroten und weißen LEDs, wobei vor den weißen LEDs Diffusorlinsen angebracht sind.

Als Alternative zum mitgelieferten Ringlicht wurde ein LED-Ringlicht² mit weißen und infraroten LEDs gebaut (siehe Abbildung 43). Dieses besteht aus fünf weißen- und vier infraroten HochleistungsLEDs. Die infraroten LEDs dienen dazu, einen Leckstrom mittels durch Licht erzeugten Ladungsträgerpaaren zu simulieren und das Verhalten eines Sensors bei erhöhtem Leckstrom zu untersuchen. Infrarotes Licht hat gegenüber weißem Licht den Vorteil, dass es das Silizium voll durchdringt. Die weißen LEDs dienen als Beleuchtung für das Mikroskop. Diese erzeugen einen maximalen Lichtstrom von ca. 750Lumen. Dies entspricht ca. einer 60W-Glühlampe.

Um die LEDs anzusteuern wurde eine einstellbare Stromquelle gebaut, die einen Ausgangsstrom von maximal 400mA für jede der beide LED-Sorten liefern kann. Dabei ist der Strom, der direkt proportional zum Lichtstrom ist, für beide LED-Sorten stufenlos

² LED: Light Emitting Diode, dt.: Licht emittierende Diode

einstellbar. Bei den weißen dient dies zur Kontrasteinstellung, bei den infraroten LEDs zum Einstellen des induzierten Stroms.

6.16 DIE GERÄTE

Die Messgeräte für die Probestation bestehen aus:

- Strommessgerät: Picoamperemeter, zur Messung kleinster Leckströme und großer Widerstände.
- Kapazitätsmessgerät: Präzisions LCR-Meter mit einem Messsignal bis zu 1MHz, zur Messung sehr kleiner Kapazitäten.

Zusätzlich werden noch diverse Spannungs- und Stromquellen benötigt:

- Hochspannungsquelle: Eine Spannungsquelle bis 2kV, um die Biasspannung anzulegen.
- Spannungsquelle: Eine präzise Spannungsquelle, um Messspannungen im Nieder-voltbereich anzulegen.
- Zwei Stromquellen: Eine Stromquelle mit einer Ausgangsleistung von maximal 36A und 20V um die Peltier-Elemente zu betreiben und eine Stromquelle mit einer Ausgangsleistung von maximal 12A und 20V, um verschiedene Bauteile zu versorgen.
- Isobox: Ein Bauteil um auf das Messsignal des Kapazitätsmessgeräts eine hohe Gleichspannung aufzukoppeln.

7.1 ANFORDERUNGEN AN DAS STEUERUNGSPROGRAMM

Um mit der Probestation automatisiert Messungen durchführen zu können, müssen die einzelnen Messgeräte, die Verfahrtische sowie die Temperatur des Jigs gesteuert werden. Zudem müssen die gemessenen Daten aufgezeichnet werden. Im einzelnen gibt es folgende Anforderungen an das Steuerungsprogramm:

- Die Temperatur soll automatisch auf einen Wert eingestellt werden, der in einem vorgegebenen, sicheren Bereich frei wählbar ist. Zusätzlich sollten unabhängige Sicherungssysteme die Temperatur überwachen. Wird der sichere Temperaturbereich verlassen, soll die Versorgung der Peltierelemente abgeschaltet werden.
- Die Streifenmessungen muss automatisch durchgeführt werden.
- Die IV- und die CV-Messung muss automatisch durchgeführt werden.
- Alle Messungen, Temperatureinstellungen und Positionsänderungen sollen per Makro steuerbar sein.
- Die Verfahrtische müssen zuverlässig gesteuert werden können. Die Absolutpositionen sollen sich wiederholbar und exakt anfahren lassen. Fehler in der Positionierung sollen erkannt werden.
- Alle kritischen Teile wie etwa die Spannungs- und Stromversorgung oder die Verfahrtische müssen per Knopfdruck aus jedem Teilprogramm heraus sofort abschaltbar sein.
- Es muss übersichtlich, schlank sowie leicht erweiterbar sein, um neue Messungen oder Änderungen an Geräten oder Programmschnittstellen in Zukunft leicht implementieren zu können.

Die Temperatur des Jigs wird, wie in [6.7.1](#) gezeigt, durch Peltierelemente eingestellt. Diese transportieren die Wärme von einer Seite des Peltierelements auf die andere. Die Peltierelemente werden zwischen einer oberen und einer unteren Platte eingebaut. Auf die obere Platte wird die Probe gelegt, die untere ist mit Kühlmittel durchflossen. Die Aufgabe des Kühlmittels ist es dabei lediglich, diese Seite der Peltier-Elemente auf konstanter Temperatur zu halten. Falls die Kühlung ausfällt, die Peltierelemente aber weiterarbeiten, würde sich die untere Platte durch die Wärmearbeit der Peltierelemente erhitzen. Nach einiger Zeit würde aber auch die obere Platte geheizt, da die Peltierelemente nur für einen Temperaturunterschied sorgen können, aber auch selbst Wärme erzeugen. Dies kann zu unerwünscht hohen Temperaturen führen, was zu vermeiden ist. Daher muss das Programm ständig die Temperaturen kontrollieren und bei Temperaturen außerhalb eines definierten Bereiches die Peltierelemente abschalten.

Bei den Messungen sollen alle nötigen Parameter: die Position der Verfahrtische, die Temperatur der Messung, die angelegten Spannungen, die Messgeräte von dem Steuerungsprogramm kontrolliert werden. Dazu muss das Hauptprogramm alle Funktionen der Unterprogramme steuern können. Außerdem soll für das Hauptprogramm kontrollierbar sein, ob die kritischen Systeme innerhalb definierter Parameter arbeiten, ohne dass Benutzereingaben erforderlich sind.

Um so viele Messungen wie möglich am Stück durchzuführen, soll das Programm mit Makros steuerbar sein. Dazu sollen Startpositionen, Messungen und Temperaturen in einer Datei gespeichert werden und das Programm arbeitet diese Aufgaben ab. Dabei soll es selbstständig die Messtemperatur einstellen sowie die verschiedenen Strukturen automatisch anfahren können, um dort die gewünschte Messung zu starten.

7.2 UML-DIAGRAMME

Im Folgenden werden UML¹-Aktivitätsdiagramme verwendet, um die Abläufe des Programmes darzustellen. An dieser Stelle sollen an einem kurzen Beispiel (Abbildung 44) die Symbole erklärt werden.

- Schwarzer Punkt: Beginn der Ausführung. Hier wird ein sogenanntes Token erzeugt, das den aktuelle Stand im Programmablauf symbolisiert. Dieses Token wandert entlang den Pfeilen.
- Schwarzer Balken: Der schwarze Balken hat zwei Funktionen. Bei mehreren abgehenden Pfeilen, wird das ankommende Token vervielfacht und auf jeden der abgehenden Pfeile geschickt. Bei mehreren ankommenden Pfeilen, wird gewartet, bis die Token von jedem Pfeil angekommen sind, bevor sie zu einem einzigen (oder mehr, entsprechend der Zahl abgehender Pfeile) Token zusammengefasst werden. Dieses Token wird dann weitergeschickt.
- Raute: Die Raute hat, wie der schwarze Balken, zwei Funktionen. Wenn es nur einen abgehenden Pfeil gibt, werden ankommende Token auf den abgehenden Pfeil weitergeleitet. Wenn es mehrere abgehende Pfeile gibt, wird per Bedingung entschieden, auf welchen Pfeil das Token weitergeleitet wird.
- Rechteck mit abgerundeten Ecken: Ein ankommendes Token löst eine Aktion aus. Wenn die Aktion beendet ist, wird das Token weitergeleitet.
- Schwarzer Punkt mit Umrandung: Das Ende der Ausführung. Kommt ein Token hier an, werden alle im Umlauf befindlichen Token gelöscht und die Ausführung wird beendet.

7.3 ÜBERSICHT ÜBER DEN AUFBAU

Im Folgenden soll das Programm zur Steuerung der Probestation vorgestellt werden. Dazu wurden einzelne Aufgaben strikt getrennt. Die Software besteht grundsätzlich aus drei Bereichen:

- Der Gerätekommunikation.
- Der Datenverwaltung.
- Der Benutzeroberfläche.

Für die Gerätekommunikation wurden, für alle benötigten Funktionen, VI's² geschrieben. Für die Datenverwaltung gibt es zwei VI's, das Erste schreibt während der Messung ständig alle anfallenden Rohdaten auf Festplatte, damit bei einem Rechner-Ausfall keine Daten verloren gehen. Das zweite VI stellt die eigentliche Speicherroutine dar und ist dafür zuständig nach Beenden der Messung die Daten zu bearbeiten, sowie in eine

¹ Unified Modelling Language, eine standardisierte Software-Beschreibungssprache

² VI: virtual instrument, dt.: virtuelles Gerät, das ein Programm in Labview darstellt, das direkt mit einer Benutzeroberfläche verknüpft ist und eine gewisse Ähnlichkeit zu einem Messgerät besitzt.

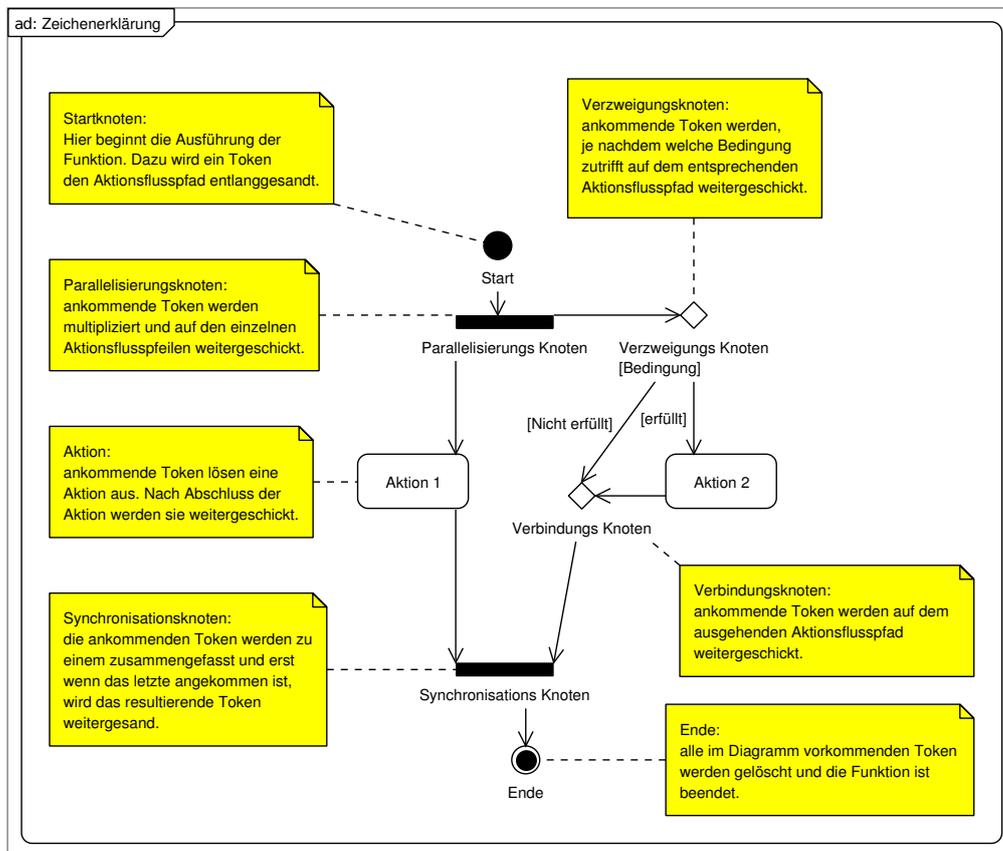


Abbildung 44: Zeichenerklärung der verwendeten Symbole eines UML-Aktivitätsdiagrammes.
 Beim Start wird am Startknoten (oben in der Mitte ein sogenanntes Token erzeugt. Dieses Token zeigt die Position des Programmablaufs an. Ein Token kann dabei nur entlang der Pfeile laufen. Unter dem Startknoten befindet sich ein Parallelisierungsknoten. Er vervielfacht das ankommende Token und sendet es auf alle abgehenden Pfeile. Rechts davon befindet sich ein Verzweigungsknoten. Ein ankommendes Token kann nur auf einem der abgehenden Pfeile weiterlaufen, welcher das ist, wird mit einer Bedingung entschieden. Unter dem Parallelisierungsknoten befindet sich eine Aktion. Diese kann beliebig groß sein und beliebig lange dauern. Ein ankommendes Token startet die Aktion und läuft erst weiter, wenn die Aktion beendet ist. Zwischen der ersten und zweiten Aktion befindet sich ein Verbindungsknoten. Er leitet ankommende Token von den verschiedenen Pfeilen auf den ausgehenden Pfeil weiter. Darunter befindet sich ein Synchronisationsknoten. Er wartet bis die Token aller ankommenden Pfade da sind und leitet dann ein einziges Token weiter. Unterhalb des Synchronisationsknotens befindet sich der Endknoten. Kommt ein Token zum Endknoten, werden alle noch im Diagramm laufenden Token zerstört und die Ausführung beendet.

Datenbank und auf Festplatte zu schreiben.

Die Benutzeroberfläche teilt sich in drei Bereiche:

- Die Hauptoberfläche mit allen Messungen.
- Die Temperaturkontrolle.
- Die Verfahrtischsteuerung.

Für die Temperaturkontrolle ist im Allgemeinen die Fernsteuerungsmöglichkeit aus der Hauptoberfläche ausreichend. Erst wenn Sonderfunktionen oder eine genauere Überwachung der Temperatur notwendig werden, wird die Temperaturkontrolle angezeigt. Die Verfahrtischsteuerung braucht auch nicht angezeigt zu werden, sie ist aber notwendig um die Ausrichtung und die genaue Bauform des Sensors zu erfassen. Hauptsächlich wird die Verfahrtischsteuerung aber vom Hauptprogramm verwendet um für die Messungen die benötigten Positionen anzufahren.

Alle sonstigen Funktionen lassen sich direkt von der Hauptoberfläche aus bedienen, die in verschiedene Bereiche aufgeteilt ist:

- Allgemeines.
- Streifenmessung.
- IV/CV-Messung.
- Sonstiges.

7.4 ÜBERSICHT ÜBER DEN ABLAUF DES HAUPTPROGRAMMS

In Abbildung 45 ist eine Übersicht über den Programmablauf zu sehen.

Nach dem Start werden parallel die Temperaturkontrolle sowie der Startbildschirm gestartet. Die Temperaturkontrolle läuft dann unabhängig bis das Hauptprogramm beendet wird. Dies ist notwendig, um eine schnell reagierende Temperaturregelung zu ermöglichen, sowie um eine lückenlose Temperaturkurve aufzeichnen zu können. Im Startbildschirm kann der Benutzer, sowie ein Satz von Wartezeit- und Spannungsparametern ausgewählt werden.

Nachdem die Anfangskonfiguration abgeschlossen ist, werden zwei parallel laufende Schleifen gestartet. Die kleinere Schleife (in Abbildung 45 auf der rechten Seite) ist für zeitkritische Aufgaben zuständig. In ihr sind die Abbruch-, Notaus- sowie Beenden Funktionen untergebracht. Während Abbruch und Beenden die große Schleife am nächsten Unterbrechungspunkt anhalten, schaltet Notaus sofort alle sicherheitskritischen Systeme aus (Spannungs- und Stromversorgung sowie die Verfahrtische). Wenn die Nebenschleife den Befehl zum Beenden des Programmes erhält, sendet sie ein Signal zum Beenden an alle parallel laufenden VI's sowie an die Hauptschleife. Zusätzlich ist die Steuerung der Anzeigeelemente der Streifenmessung in der kleineren Schleife untergebracht, damit diese zeitnah reagiert.

Die Hauptschleife (in Abbildung 45 auf der linken Seite) beinhaltet alle sonstigen Funktionen des Programms. Hieraus können die Verfahrtischsteuerung und die Temperaturkontrolle aufgerufen werden, die Messungen gestartet sowie die Sequenzen bearbeitet und gestartet werden. Dabei können die Aktionen dieser Schleife von der Nebenschleife jederzeit abgebrochen werden.

7.5 TEMPERATURKONTROLLE

In Abbildung 46 ist der Ablauf der Temperaturkontrolle schematisch dargestellt. Nach dem Einschalten wird zuerst die Initialisierung durchgeführt. Danach werden zwei

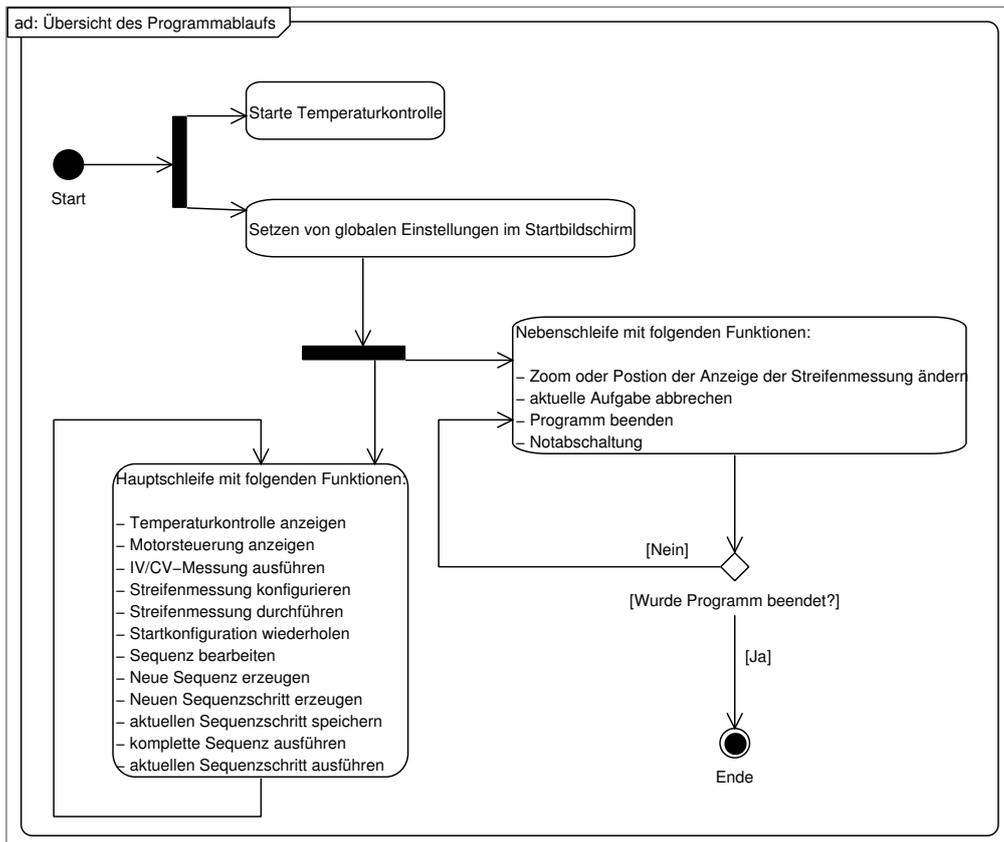


Abbildung 45: Übersicht über die Probestation-Software.

Nach dem Start des Programms werden zuerst die Temperaturkontrolle gestartet, sowie der Startbildschirm mit grundlegenden Einstellungen und der Auswahl des Benutzers gezeigt. Danach werden zwei Schleifen gestartet, wobei die eine nur wichtige, zeitkritische Aktionen, etwa Notaus, beinhaltet, während die andere Schleife die eigentlichen Aufgaben und Messungen ausführt.

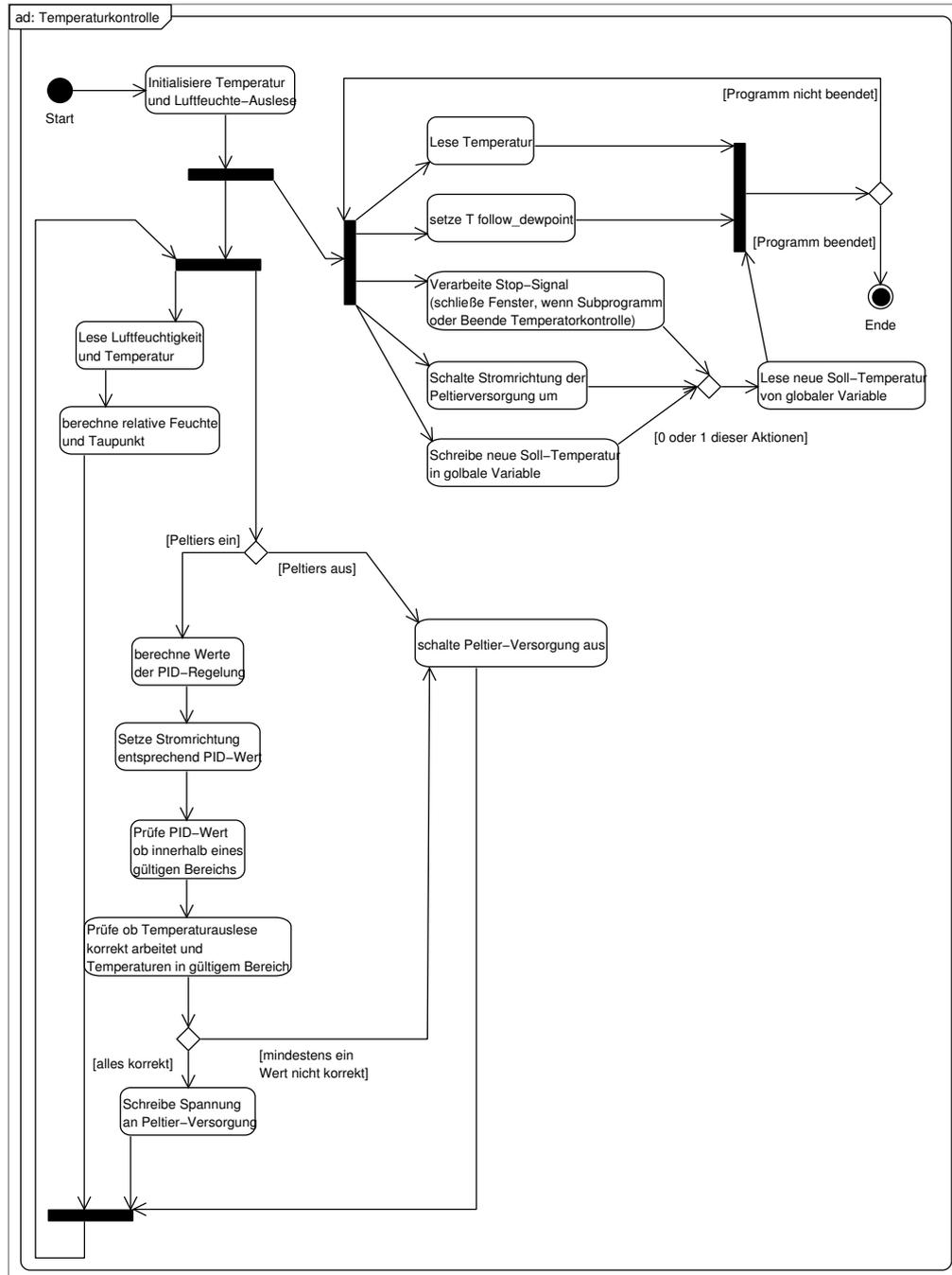


Abbildung 46: Die Temperaturkontrolle

Nach dem Initialisieren der Temperatur sowie der Luftfeuchte-Auslese, werden zwei parallele Schleifen gestartet. Die Temperaturschleife sorgt für ein kontinuierliches Auslesen der Temperatur, passt die angestrebte Temperatur dem Taupunkt an, schaltet die Richtung des Stroms für die Peltiers und reagiert auf das Stopp-Signal. Sie beherbergt damit die Aktionen, die im Vergleich zur anderen Schleife schnell ablaufen. Die andere Schleife liest die Luftfeuchtigkeit und berechnet den Taupunkt während parallel die PID-Regelung den Strom für die Peltiers anpasst.

parallele Schleifen gestartet, die mit unterschiedlicher Geschwindigkeit laufen. Die Temperaturschleife (in Abbildung 46 auf der rechten Seite) führt mehrere Aktionen parallel aus:

- Die Temperatur wird gelesen.
- Die Temperatur, die die Regelung tatsächlich anfährt, wird entsprechend des aktuellen Taupunkts angepasst. Fällt der Taupunkt unter die gewünschte Temperatur, wird diese angefahren. Ansonsten wird nur die aktuelle Taupunktstemperatur angefahren, wobei sich dies manuell Übergehen lässt.
- Ein mögliches Stopp-Signal wird verarbeitet.
- Die Stromrichtung der Peltierversorgung wird bei Bedarf umgeschaltet.

Die Temperaturwerte werden über drei Messwerte gemittelt und es werden die Durchschnittswerte von zwei Sensoren für jede Temperatur gebildet. Dies ermöglicht eine möglichst fehlerfreie und lückenlose Temperaturkurve, die für die Regelung wichtig ist. Eine weitere Aktion in dieser Schleife ist die Funktion der Taupunktverfolgung. Wenn eine Temperatur unterhalb des Taupunktes eingestellt wird, kondensiert Wasser aus der Umgebungsluft und kann zu Kurzschlüssen führen. Wenn nun eine Solltemperatur unterhalb des Taupunktes angegeben wird, wird deshalb nur die Taupunkttemperatur selbst eingestellt, bis der Taupunkt unter die Solltemperatur fällt. Dadurch ist es möglich, beliebige Temperaturen als Sollwert anzugeben, ohne dass es zu Kondensation kommt. Die Regelung der Temperatur wird als PID-Regelung ausgeführt. Diese besteht aus drei Werten, die addiert werden. Diese Werte sind:

- P (proportional): Die Differenz zwischen dem Ist- und dem Sollwert (in diesem Fall der Temperatur des Jigs).
- I (integral): Das Integral von P über der Zeit, seit Beginn der Regelung.
- D (derivative): Die Änderung von P über der Zeit seit dem letzten Durchgang.

Dabei werden die PID-Werte jeweils mit einem Gewicht versehen. Grundsätzlich sind diese Gewichte nicht notwendig, da eine PID-Regelung mit allen Gewichten an ihr Ziel, einen gleichen Soll- und Ist-Wert zu erreichen, gelangt. Die Zeit in der dieses Ziel erreicht wird, hängt allerdings stark von der Gewichtung ab. Für den Integralanteil sollte ein kleines Gewicht benutzt werden, da er mit jedem Durchlauf, in dem der Sollwert oberhalb oder unterhalb des Istwerts liegt, I anwächst. Da das zu regelnde System aber eine gewisse Trägheit aufweist, muss dieses Gewicht mit großer Sorgfalt gewählt werden. Die Methoden zur Wahl dieser Gewichte lassen sich in der Diplomarbeit von Karl-Heinz Hoffmann [[Hof08](#)] nachlesen.

Die zweite Schleife, die Regelungsschleife, besteht aus vier Bereichen:

- Luftfeuchtigkeit und Raumtemperatur lesen, sowie Taupunkt berechnen.
- Die PID-Regelung für die Peltieransteuerung durchführen.
- Die PID- und Temperaturwerte auf Korrektheit prüfen und bei Fehlern Korrekturen vornehmen bzw. die Peltierversorgung ausschalten.
- Den PID-Wert als Spannungswert der Peltierversorgung übergeben.

Um den Taupunkt berechnen zu können, sind die Werte der relativen Luftfeuchte sowie der Raumtemperatur notwendig. Diese beiden Werte werden gelesen und daraus der Taupunkt berechnet. Im parallel ablaufenden PID- und Versorgungsteil wird zunächst abgefragt, ob überhaupt ein Peltierbetrieb gewünscht ist. Wenn dies der Fall ist, wird ein

PID-Schritt ausgeführt.

Steht ein neuer PID-Wert zur Verfügung, der als Spannung interpretiert wird und an die Peltiersteuerung gesendet werden soll, wird geprüft ob sich die Spannung im zulässigen Bereich befindet und bei Bedarf angepasst. Dies ist notwendig, da die PID-Werte einen möglichen Wertebereich von $-\infty \rightarrow \infty$ haben, der Peltiersteuerung aber nur ein eingeschränkter Bereich sinnvoller Spannungen zur Verfügung steht. Als nächstes wird die Temperatúrauslese auf korrekte Funktion geprüft und die Temperaturwerte werden daraufhin überprüft, ob sie sich in einem zulässigen Bereich befinden. Tritt hier ein Fehler auf, wird die Peltierversorgung sicherheitshalber abgeschaltet. Ist alles korrekt, wird der neue Wert an die Peltierversorgung geschickt.

7.6 VERFAHRTISCHSTEUERUNG

In Abbildung 47 ist der Ablauf der Verfahrtschsteuerung schematisch abgebildet. Auf der rechten Seite ist eine Nebenschleife zu sehen, die ständig die aktuelle Position liest sowie die Signale für Notaus und „Steuerung beenden“ verarbeitet. Wenn Notaus betätigt wird, werden sofort die Motoren angehalten, sowie das Notausignal an das Hauptprogramm gesendet.

Auf der linken Seite in Abbildung 47 werden die Verfahrtschleife zunächst initialisiert und dann bei Bedarf kalibriert. Dazu wird eine Referenzposition angefahren und die aktuelle Position auf Null gesetzt. Als nächstes wird die Hauptschleife gestartet. Diese beinhaltet die Funktionen:

- Eine Absolut-Position anfahren.
- Die Heimposition anfahren.
- Die aktuelle Position als Heimposition definieren.
- Eine angegebene Strecke in eine beliebige Richtung fahren.
- Den Vektor von einem Pad aufs nächste berechnen.
- Zu einem angegebenen Pad fahren.
- Den ermittelten Streifenabstand testen.

Vor jeder Bewegung wird der Tisch um einen Millimeter abgesenkt und nach Beendigung dieser Bewegung wieder angehoben. Dies ist notwendig, damit die Messnadeln nicht bei der Bewegung über den Sensor kratzen. Zusätzlich wird nach jeder Bewegung getestet, ob sich der Tisch an der Sollposition befindet. Ist das nicht der Fall, wird der Verfahrtsch angehalten und kann erst wieder nach einer manuellen Betätigung eines Freigabeknopfes bewegt werden. Dies verhindert eine Beschädigung des Verfahrtsches, zum Beispiel durch Teile, die den Weg des Verfahrtsches blockieren, sowie eine Beschädigung des Siliziums durch ein nicht erfolgtes Absenken des Tisches.

7.7 SEQUENZEN

7.7.1 Überblick über die Sequenzen

Das Ziel der Sequenzen ist es, alle Messungen sowie alle Positionen und Temperaturen des Jigs per Datei steuern zu können. Dazu müssen alle benötigten Einstellungen aus der Datei gelesen und die Aktionen gestartet werden. Das Grundlegende Prinzip ist, dass eine Datei erstellt wird, die alle Parameter beinhaltet, die auch bei einer direkten Ausführung der gewünschten Aktion eingestellt werden müssten. Als Aktionen stehen hier die

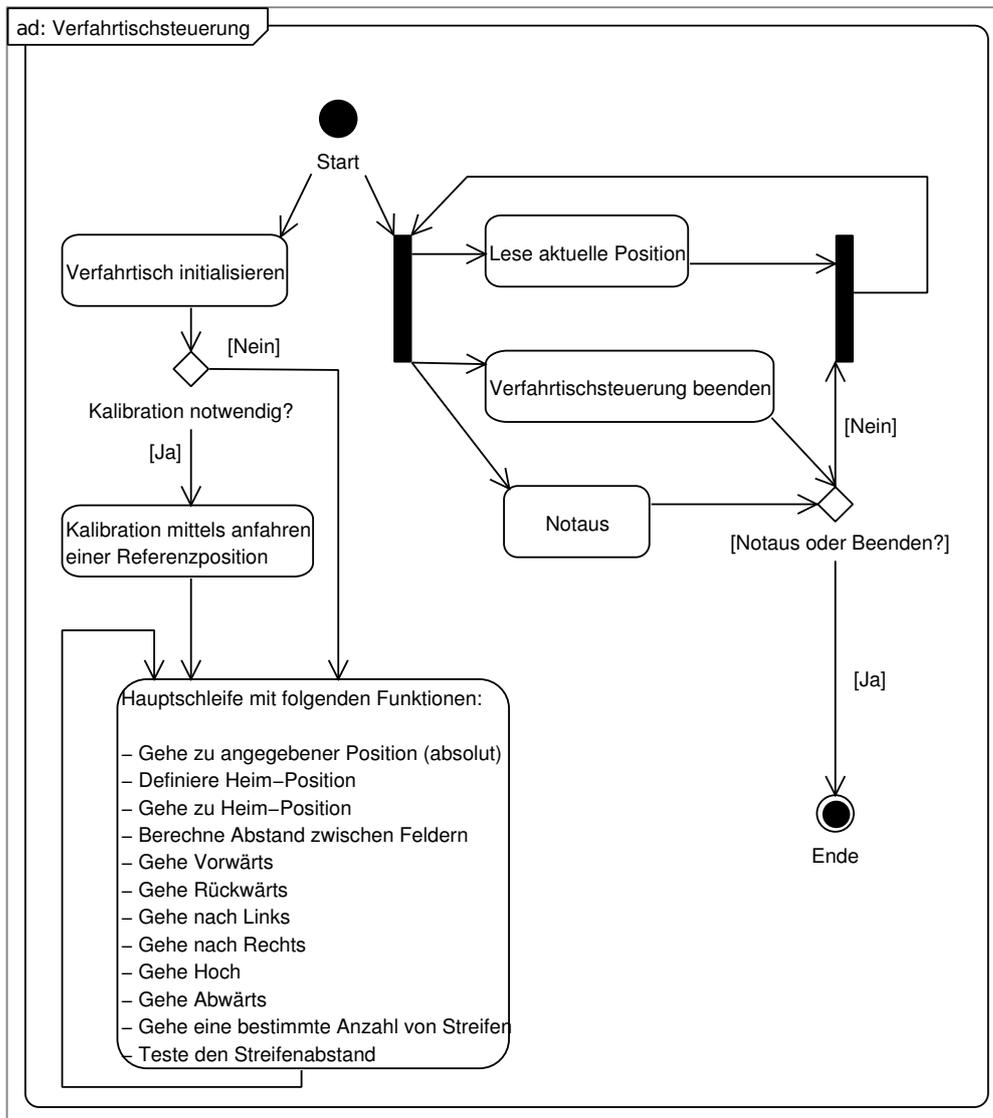


Abbildung 47: Die Verfahrtschsteuerung

Nach dem Start werden zum einen eine Nebenschleife gestartet, die ständig die aktuelle Position liest sowie die Signale zum Beenden und für Notaus verarbeitet. Parallel dazu werden erst die Verfahrtsch initialisiert und bei Bedarf kalibriert. Anschließend wird die Hauptschleife gestartet. Diese führt die Aktionen des Verfahrtsches aus. Diese sind: eine angegebene Position anfahren, eine bestimmte Strecke in eine bestimmte Richtung fahren, Abstände zwischen Messpunkten berechnen und testen.

Streifenmessungen, die IV/CV-Messung, die Positionierung der Verfahrtscheibe und das Einstellen der Temperatur zur Verfügung. So muss bei beiden Messungen die gewünschte Temperatur, die gewünschte Aktion, sowie zum Beispiel für die IV/CV-Messung gespeichert werden, welcher Spannungsbereich mit welchen Spannungsschritten verwendet werden soll. Bei der Ausführung eines Sequenzschritts werden dann die Parameter gelesen und die Aktion gestartet. Im Grunde tritt eine Sequenz bei der Ausführung wie ein Benutzer auf. Während beim Erstellen eines Sequenzschrittes, in der bevorzugten Variante, der Benutzer alle Einstellungen tätigt, als würde er jetzt eine Messung starten wollen. Nur anstatt die Messung tatsächlich zu starten, wird ein Sequenzschritt erstellt.

7.7.2 Verwaltung der Sequenzen

Um die Steuerungsdatei zu erstellen und zu bearbeiten gibt es verschiedene Möglichkeiten.

- Als erste Methode kann die Datei in einem Texteditor geschrieben werden. Bei dieser Methode muss besonders darauf geachtet werden, die Daten korrekt einzutragen oder die Rangfolgennummer der einzelnen Schritte nicht doppelt zu vergeben.
- Eine zweite Methode besteht aus einem VI, das Aktionen wie das Umsortieren der Reihenfolge vereinfacht, das auch in der Lage ist neue Sequenzen zu registrieren, gleichzeitig aber alle Freiheiten lässt, die Sequenz zu editieren. Dadurch muss auch hier genau darauf geachtet werden die Daten korrekt einzutragen.
- Eine dritte Methode besteht aus einer Sammlung spezialisierter VI's, um die Funktionen, die am meisten benötigt werden bereitzustellen.

Die bevorzugte Methode ist die dritte. Sie bietet alle wichtigen Funktionen und eine einfache Möglichkeit alle Einstellungen vorzunehmen. Die Einstellungen werden genauso eingegeben, wie für eine normale Messung. Aber anstatt die Messung auszuführen, wird ein Sequenzschritt daraus erzeugt.

Eine Sequenzdatei besteht aus einer Aneinanderreihung von einzelnen Sequenzschritten. Im Folgenden ist ein Sequenzschritt gezeigt, der eine Streifenmessung beschreibt:

```
[step_73]
step_number=73
3 home_x=80000
home_y=20000
home_z=-15000
v_max=10
v_akt=9
8 pitch_x=120,15
pitch_y=1,25
pitch_z=0,33
number_strips=192
which_action?=4
13 bias_voltage=600
first_strip=1
Number_of_strips_to_measure=192
Strips_to_meas=Standardstep_73Strips_to_meas.txt
Measurements=Standardstep_73Measurements.txt
```

Die Sammlung von VI's zu besteht aus folgenden Funktionen:

- Sequenz erzeugen.
Hier wird eine neue, leere Sequenzdatei auf dem Datenträger erstellt und in der Übergeordneten Konfigurationsdatei registriert. In diese Sequenzdatei werden dann die einzelnen Sequenzschritte geschrieben.
- aktuellen Sequenzschritt speichern.
Hier werden je nach Auswahl der auszuführenden Aktion die dazu notwendigen Daten gespeichert. Hier kann optional ein Name angegeben werden, um den Sequenzschritt in Zukunft besser identifizieren zu können.
- aktuellen Sequenzschritt ausführen.
Um den aktuellen Sequenzschritt auszuführen, werden alle Daten dieses Schrittes geladen und die Aktion wird gestartet. Dazu wird vor Ausführung einer Messung darauf gewartet, dass die Temperaturkontrolle den angestrebten Temperaturwert erreicht.
- Sequenz ausführen.
Hier wird nacheinander für alle Sequenzschritte der gewählten Sequenz *„aktuellen Sequenzschritt ausführen“* aufgerufen und jeweils auf deren Abarbeitung gewartet.

Mit Hilfe dieser Funktionen können die Messungen weitgehend automatisiert werden und es wird auch möglich, aus den vorhandenen Messungsarten Messreihen zu erstellen, wie zum Beispiel die Messung von IV/CV-Kurven über der Temperatur. Im Folgenden sollen einige Sequenzfunktionen genauer erklärt werden.

7.7.3 Lese Sequenz

Das VI, dessen Ablauf schematisch in Abbildung 48 dargestellt ist, stellt den anderen VI's Funktionalität zur Verfügung und ist das grundlegende VI des Sequenzsystems. Es liest zunächst den Pfad des Verzeichnisses, in dem die Sequenzen gespeichert werden aus der globalen Konfigurationsdatei. Dort befindet sich die Konfigurationsdatei, in der die Sequenzen registriert sind. Aus dieser werden alle verfügbaren Sequenzen gelesen. Falls eine bestimmte Sequenz angegeben wurde und diese existiert, werden als nächstes die Sequenzschritte gelesen und nach ihrer Rangfolge sortiert. Falls ein Sequenzschritt angegeben wurde, wird zuletzt noch geprüft, ob dieser existiert.

Es stellt damit den anderen VI's Listen von Sequenzen und Sequenzschritten sowie die Prüfung der Existenz von zuvor angegebenen Sequenzen oder Schritten zur Verfügung. Zudem wird der Pfad der Sequenzdatei ausgegeben.

7.7.4 Sequenzschritt speichern

In Abbildung 49 ist schematisch der Ablauf des VI's zum Ändern oder Anlegen von Sequenzschritten gezeigt. Zunächst wird das VI *Lese_Sequenz* aus Abschnitt 7.7.3 ausgeführt. Zur Vorbereitung der Speicherung werden die Daten, die nur von einer Messung verwendet werden in ein Array geschrieben. Danach werden dieses Arrays, die Solltemperatur und die Verfahrtischdaten in den gewählten Sequenzschritt gespeichert. Falls der Sequenzschritt noch nicht existiert, wird dieser in der Rangfolge zunächst auf der letzten Position gespeichert. Wurde ein Name angegeben, wird dieser verwendet, ansonsten wird automatisch ein Name vergeben.

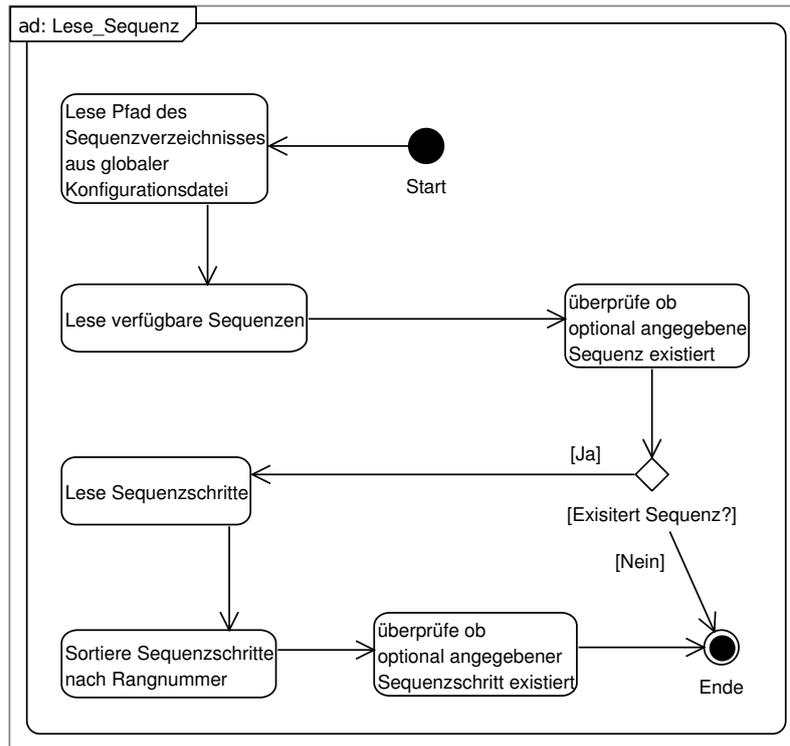


Abbildung 48: Lese Sequenz

Nach dem Start wird zunächst eine Liste der verfügbaren Sequenzen erstellt und bei angegebenem Sequenznamen wird dessen Existenz geprüft. Wenn diese Sequenz existiert, wird eine Liste der Sequenzschritte erstellt und, bei angegebenem Namen, die Existenz geprüft.

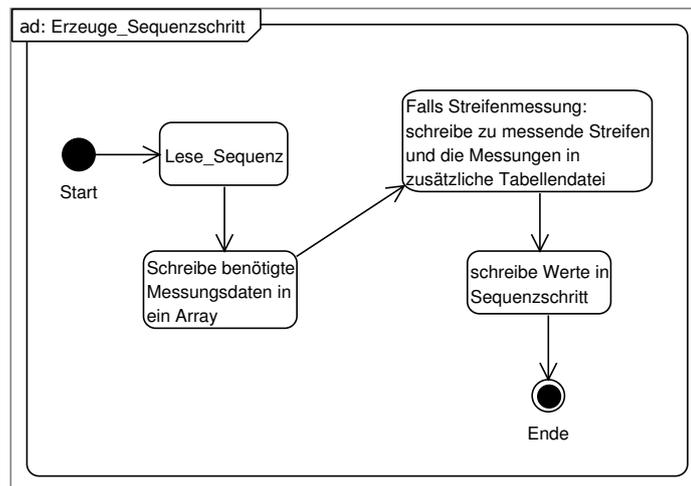


Abbildung 49: Erzeuge Sequenzschritt

Nach dem Start wird erst Lese_Sequenz ausgeführt. Dann werden entweder die Daten im aktuellen Sequenzschritts aktualisiert oder ein neuer Schritt angelegt, in dem die Daten gespeichert werden.

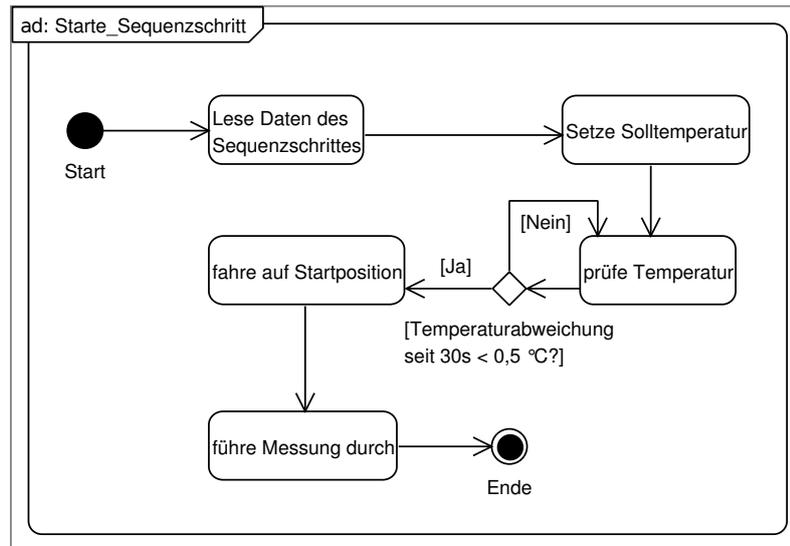


Abbildung 50: Starte Sequenzschritt

Um einen Sequenzschritt auszuführen, werden zunächst die Daten gelesen und die Solltemperatur gesetzt. Dann wird abgewartet, bis die Solltemperatur stabil eingestellt ist und es wird die Startposition angefahren. Schließlich wird die Messung gestartet.

7.7.5 Sequenzschritt starten

In Abbildung 50 ist der Ablauf eines Sequenzschrittes zu sehen. Nach dem Aufruf werden zunächst alle notwendigen Daten gelesen und die Solltemperatur gesetzt. Im nächsten Schritt wird abgewartet, bis diese Temperatur erreicht ist. Dies ist mit der Bedingung erfüllt, dass die Ist-Temperatur über eine Zeit von 30 Sekunden weniger als $0,5^{\circ}\text{C}$ von der Soll-Temperatur abweicht. Zudem wird in diesem Schritt die Startposition angefahren. Wenn alles fertig vorbereitet ist, wird die Messung gestartet.

7.8 MESSUNGEN

In Abbildung 51 ist das Eck eines Sensors abgebildet. Darin sind auch die Nadeln, die für eine vollständige Streifenmessung notwendig sind, auf dem Startstreifen gezeigt. Diese sind entsprechend dem Pad, auf dem sie platziert sind benannt.

Die Biasspannung, oder im Fall der IV/CV-Messung die Spannung über der gemessen wird, wird zwischen der Backplane, der Rückseite des Sensors und dem Biasring angelegt. Dabei befindet sich der Biasring auf Massepotential, während auf der Backplane bis zu 2kV angelegt werden. Da der Biasring über die Biaswiderstände mit dem Implantat der Streifen verbunden ist, liegt ein Teil Oberfläche des Sensors relativ dicht am Massepotential. Für einige Messungen ist es nötig, zusätzlich eine Messspannung anzulegen, wobei darauf geachtet werden muss diese nicht zu groß zu wählen, um den Feldverlauf nicht zu stören. Die Biasnadel wird dazu auf einem am Jig befestigten Tisch platziert, damit sie, wenn der Jig verfahren wird ihre Position auf dem Sensor behält. Die AC-, DC-, und DC2-Nadel (die Nadeln, die das AC-, das DC- und das DC-Pad des Nachbarstreifens kontaktieren) werden auf dem Seitentisch platziert. Dadurch kann Position des Sensors relativ zu den Nadeln mit Hilfe des Verfahrtes verändert werden, um die einzelnen Streifen anzufahren.

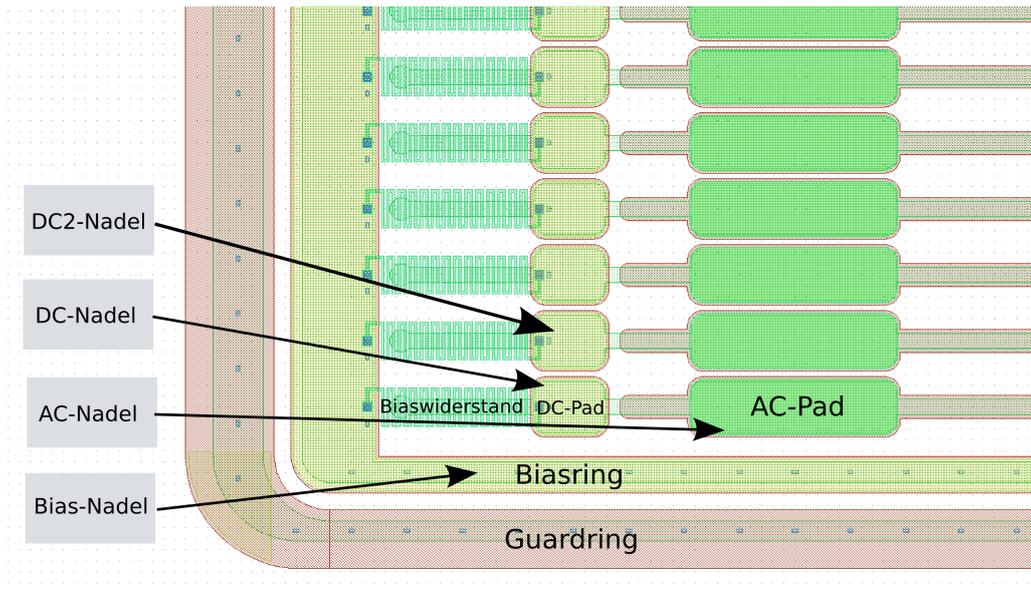


Abbildung 51: Zeichnung des Ecks eines Sensors mit der Startposition der Nadeln für die Messungen.

Die Biasspannung wird dabei zwischen Backplane und Biasring angelegt.

7.8.1 IV/CV-Messung

Die IV- und CV-Messung sind wichtig, um den Gesamtleckstrom und die Gesamtkapazität über der Spannung zu erhalten. Aus der Kapazität kann die Depletionsspannung bestimmt werden. Mit diesen Messung kann somit ein erster Eindruck vom Sensor und dem verwendeten Material gewonnen werden. Um die Messung durchzuführen, muss die Bias-Nadel auf dem Biasring platziert werden. Dann wird der gewünschte Spannungsbereich und die Schrittweite der Spannung eingestellt und die Messung gestartet. Auf zwei Grafen können dann die IV-Kurve und wahlweise die CV- oder die $1/C^2V$ -Kurve verfolgt werden. An der $1/C^2V$ -Kurve kann die Depletionsspannung gut abgelesen werden. Nach dem Ende der Messung wird noch die Depletionsspannung bestimmt, indem jeweils ein Fit an den aufsteigenden Teil am Anfang und den konstanten Teil am Ende angelegt und der Schnittpunkt bestimmt wird. Zusätzlich wird noch der Punkt bestimmt, ab dem die Daten vom hinteren Fit weniger als drei Sigma entfernt sind. Liegen beide Werte nahe beieinander, ist in aller Regel von einem guten Wert auszugehen.

Für die in Abbildung 52 gezeigten Messungen von IV (dem Strom in Abhängigkeit der, zwischen Backplane und Biasring angelegten Spannung) und CV (der Kapazität des gesamten Sensors in Abhängigkeit der Spannung), steht ein eigener Bereich im Hauptprogramm zur Verfügung, da sie zu den häufigsten Messungen gehören. Zu Beginn jedes Durchlaufes wird die Spannung zwischen der Biasnadel und der Backplane auf den Wert für den aktuellen Schritt gesetzt. Die anderen Nadeln werden nicht benötigt, da diese Messung über den gesamten Sensor durchgeführt wird. Falls die IV-Messung durchgeführt werden soll, werden als nächstes die Relais, welche die Messgeräte mit den Nadeln verbinden, in die IV-Stellung (Strommessung über den Sensor, also zwischen Biasnadel und Backplane) geschaltet und der Strom gemessen.

Wird CV gemessen, wird nun das Relais, das die Isobox entlädt, abgeschaltet. Dadurch wird die Isobox aufgeladen und kann das Messsignal auf die von der Spannungsquel-

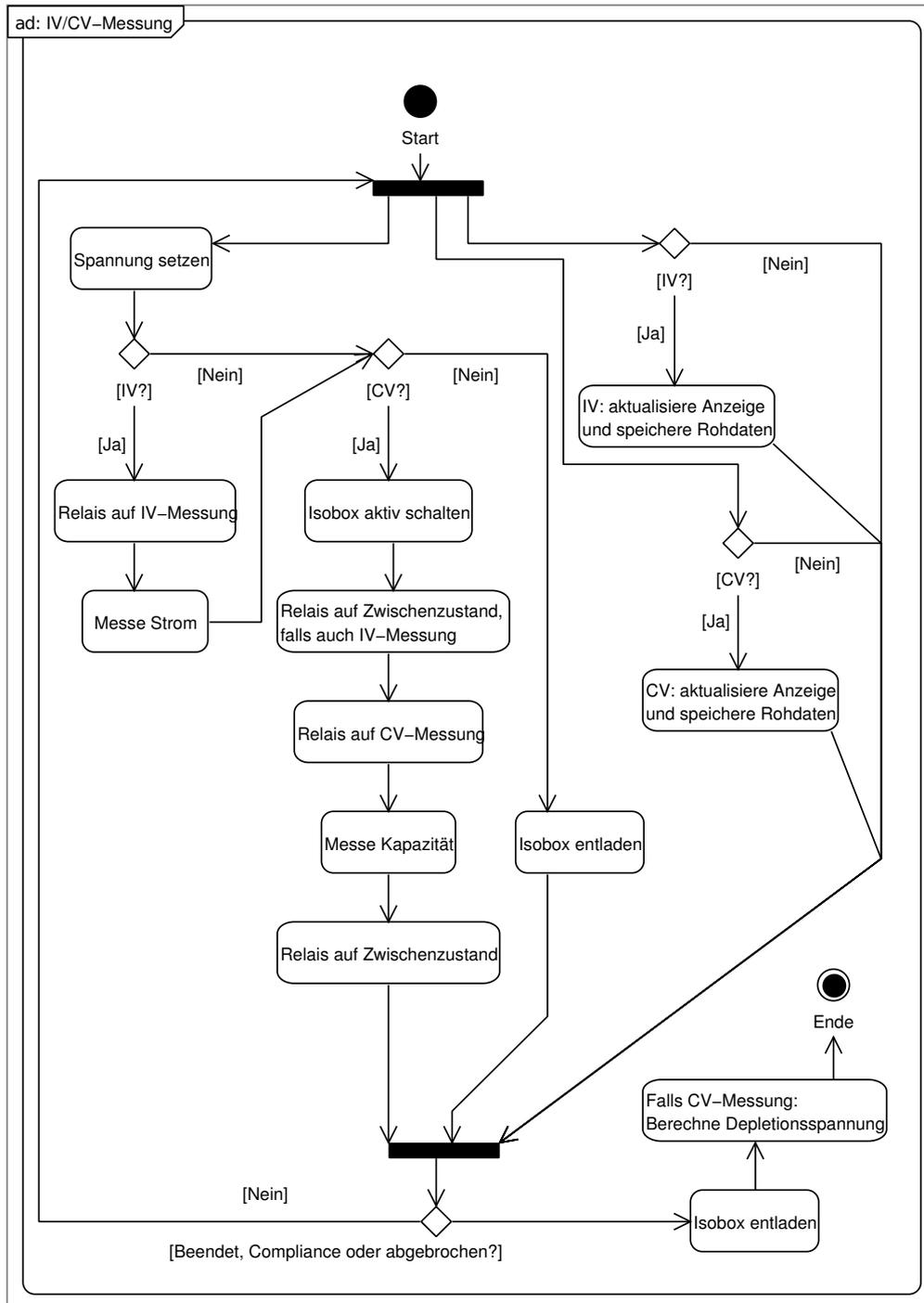


Abbildung 52: Messung von IV und CV

Nach dem Start wird eine Schleife gestartet, auf deren einen Seite zunächst die Spannung um einen Schritt verändert wird. Falls IV gemessen werden soll, werden die Relais nun auf IV-Stellung gebracht und der Strom zwischen der Backplane und der Biasnadel gemessen. Falls CV gemessen werden soll, wird zunächst die Isobox aktiv geschaltet, falls zuvor IV gemessen wurde die Relais über einen Zwischenzustand auf CV-Stellung geschaltet und die Kapazität gemessen. Danach werden die Relais wieder auf einen Zwischenzustand geschaltet und die Isobox wird entladen. Auf der anderen Seite wird die Anzeige aktualisiert und die Daten werden gespeichert.

le kommende Gleichspannung aufkoppeln. Danach werden die Relais, falls auch IV gemessen wird, über einen Zwischenzustand in die CV-Stellung geschaltet. Der Zwischenzustand ist notwendig, um die Biasspannung zu halten. Als nächstes wird die Kapazität gemessen. Dies geschieht mit einer frei wählbaren Frequenz bis 1Mhz. Schließlich werden die Relais wieder in den Zwischenzustand geschaltet und es wird die Biasspannung für den nächsten Messschritt eingestellt.

Parallel dazu werden die Anzeigen für IV, CV und $1/C^2V$, aktualisiert sowie die neuen Werte gespeichert. Beendet wird die Schleife entweder durch betätigen des Abbruch-Schalters, weil die Messung beendet ist, oder weil der Strom einen Grenzwert überschreitet.

7.8.2 Streifenmessung

Die Streifenmessung ermöglicht es die Werte und die Funktion der einzelnen Streifen zu messen.

Der Bereich für die Streifenmessung des Hauptprogramms besteht aus den Schaltern für die Konfiguration der Messung sowie zum Start der Messung. Daneben gibt es das Feld für die gewünschte Biasspannung. Darunter befindet sich die Anzeige für alle gemessenen Werte des aktuellen, sowie des vorangegangenen Streifens. Daneben befinden sich drei Grafen, in denen, frei wählbar, jeweils eine Messung dargestellt werden kann. Der Bereich der angezeigten Streifen wird dabei entweder automatisch weitergeführt, oder kann manuell in Größe und Position verändert werden.

In Abbildung 53 ist der Ablauf der Streifenmessung zu sehen. Nach dem Wechseln in den Bereich zur Streifenmessung, gibt es die Möglichkeit die Messung zu konfigurieren und zu starten. Die Konfiguration besteht im wesentlichen aus der Auswahl der durchzuführenden Messungen sowie der zu messenden Streifen und der Bias-Spannung. Nach dem betätigen des Startknopfes werden dann die Messungen für jeden gewählten Streifen ausgeführt. Nach jedem Streifen werden die Rohdaten auf Festplatte geschrieben, um bei einem möglichen PC-Ausfall möglichst wenig Daten zu verlieren. Nach dem Ende der Messungen, entweder weil alle Streifen gemessen wurden oder weil abgebrochen wurde, wird die Spannung heruntergefahren und die Daten werden endgültig gespeichert.

Für alle Messungen gilt, dass die Biasspannung, die dazu dient den Sensor zu depletieren, zwischen der Biasnadel und der Backplane angelegt ist. Das Kontaktierungsschema der Nadeln ist bei allen Streifenmessungen jenes, welches auf Abbildung 51 dargestellt ist. Es stehen die folgenden Messungen zur Verfügung:

Kopplungskapazität

Bei der Messung der Kopplungskapazität werden zunächst die Relais so eingestellt, dass das Kapazitätsmessgerät mit der DC- und der AC-Nadel verbunden ist, um dann die Messung durchzuführen. Dadurch wird die Kapazität zwischen dem Aluminiumstreifen und dem Implantat gemessen.

Zwischenstreifenkapazität

Die Relais werden bei der Messung der Zwischenstreifenkapazität so eingestellt, dass die DC- und die DC2-Nadel mit dem Kapazitätsmessgerät verbunden sind. Dieses misst dann mit einer bis 1Mhz frei wählbaren Frequenz die Kapazität zwischen zwei benachbarten Implantaten. Standardmäßig wird hier eine Frequenz von 1MHz verwendet. Vor der Messung wird noch die Kapazität der Nadeln zueinander bestimmt und von den Messwerten abgezogen.

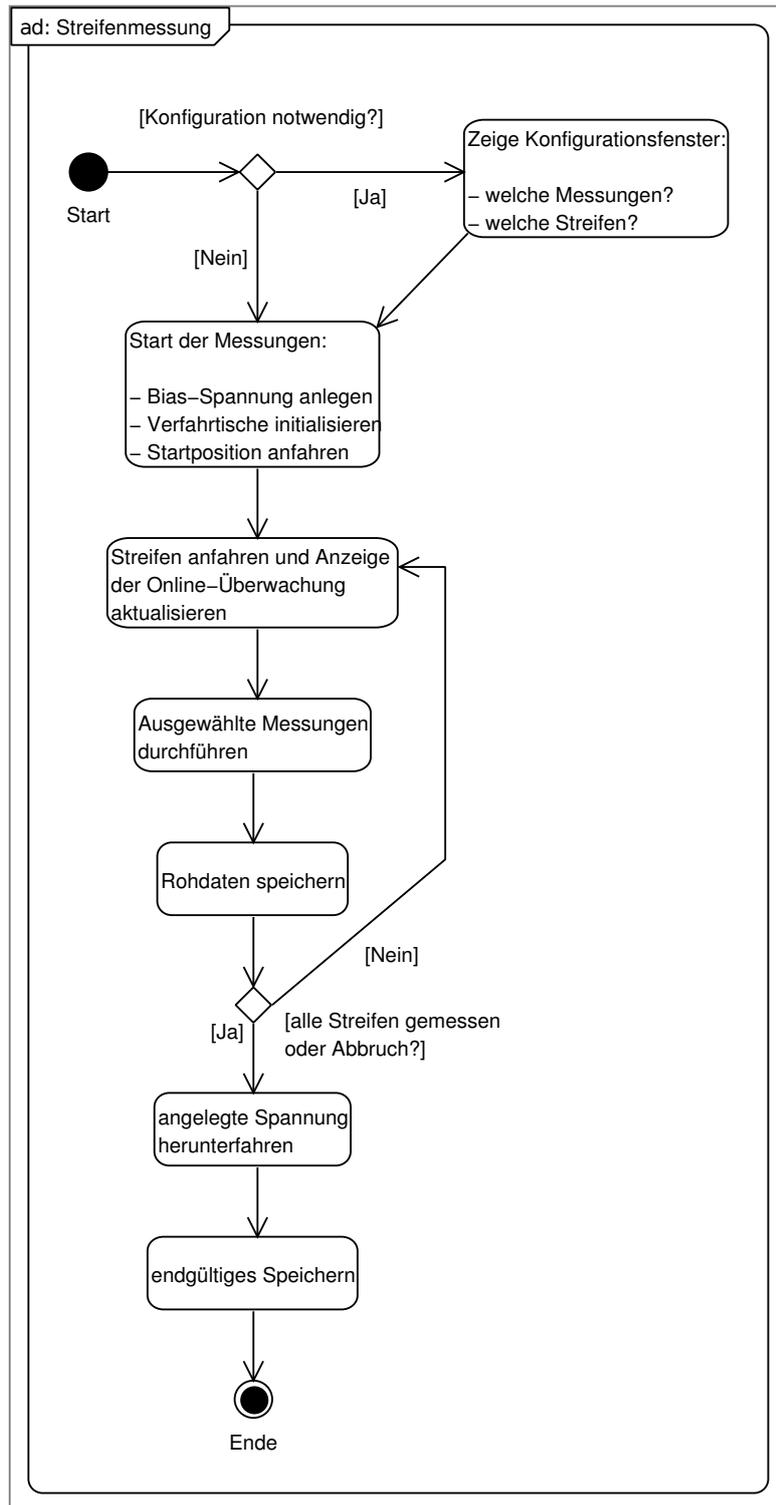


Abbildung 53: Die Streifenmessung

Nach dem Anzeigen der Seite für die Streifenmessung kann, bei Bedarf, die Konfiguration, wie der Bereich von zu messenden Streifen, die Messungen und die Biasspannung, durchgeführt werden. Nach Betätigen der Starttaste wird dann die Messung vorbereitet. Dazu werden die Bias-Spannung angelegt, die Verfahrtische initialisiert sowie die Startposition angefahren. Dann beginnt die eigentliche Messung, die daraus besteht den nächsten Streifen anzufahren, die Messungen durchzuführen und die Rohdaten zu speichern. Dies wird für alle gewählten Streifen wiederholt, außer wenn vorher abgebrochen wird. Nach Beendigung der Messung wird die Spannung wieder heruntergefahren und endgültig gespeichert.

Biaswiderstand und Leckstrom

Bei der Messung des Biaswiderstandes ist es erforderlich, den Streifenleckstrom für eine Fehlerkorrektur zu messen. Daher ist es sinnvoll den Streifenleckstrom und den Biaswiderstand zusammen zu messen. Für die Messung des Streifenleckstroms werden zunächst die DC-Nadel und die Backplane mit dem Strommessgerät verbunden und es wird der Strom, der aufgrund der angelegten Biasspannung fließt, zwischen dem Implantat und der Backplane gemessen. Danach wird zusätzlich eine kleine Spannung zwischen DC- und Biasnadel angelegt und der Strom zwischen diesen Nadeln gemessen. Für die Berechnung des Biaswiderstandes wird der Leckstrom vom Strom zwischen DC- und Biasnadel abgezogen.

Diese Messungen können Wahlweise für das DC-Pad oder mit der DC2-Nadel für das DC2-Pad durchgeführt werden.

Zwischenstreifenwiderstand

Um den Zwischenstreifenwiderstand zu messen, werden mit den Relais die DC-Nadel an eine Spannungsversorgung und die DC2-Nadel an das Strommessgerät angeschlossen. Damit wird der Strom des zweiten Streifens gemessen, während am ersten Streifen eine Spannungsrampe über 0 bis 0,5 Volt angelegt wird.

Pinhole

Hier werden die Relais so eingestellt, dass eine Spannungsquelle mit der AC- und der DC-Nadel verbunden wird sowie ein Strommessgerät in Reihe geschaltet wird. Damit wird der Strom über das Dielektrikum zwischen Implantat und Aluminiumstreifen gemessen. Ist dieser zu groß, bedeutet dies, dass die Isolation zwischen Implantat und Aluminium schlecht ist.

7.9 SPEICHERN DER DATEN

Das Speichern der Daten wird von zwei VI's durchgeführt. Das eine VI dient dazu während der Messung ständig die Rohdaten zu speichern, während das andere VI die Daten gebündelt am Ende der Messung auf Festplatte und in eine Datenbank schreibt. Die ständige Speicherung Messung dient dazu, Datenverlust durch einen Computerfehler vorzubeugen. Der Pfad an dem die Daten gespeichert werden, wird aus einem Grundpfad und dem Strukturnamen zusammengesetzt. Wenn ein Sequenzschrittnamen angegeben wurde, wird dieser zusätzlich verwendet. Außerdem wird noch ein Zeitstempel im Dateinamen verwendet, um zu vermeiden, dass Daten aus Versehen überschrieben werden.

Nach dem Ende der Messung wird dann das eigentliche VI zum Speichern aufgerufen. Dieses speichert die Daten am eigentlichen Speicherort ab und bietet die Möglichkeit schon Operationen an den Daten vorzunehmen. Zum Beispiel können hier die Daten aus verschiedenen Sequenzschritten vereint werden.

KALIBRATIONSMESSUNGEN ZWISCHEN DER ALTEN UND DER NEUEN PROBESTATION

Um die Zuverlässigkeit der Messungen zu überprüfen wurden die wichtigen Charakteristika eines Minisensors, die IV- und CV-Messung und Kopplungskapazität, Biaswiderstand, Strom übers Dielektrikum, Streifenleckstrom, Zwischenstreifenwiderstand und Zwischenstreifenkapazität gemessen. Der Minisensor stammt aus der CMS-Produktion und wurde in der alten und der neuen Teststation gemessen. Die Messungen wurden bei Raumtemperatur, mit den Parametern¹ des CEC durchgeführt. Diese Messergebnisse sollen hier vorgestellt werden.

8.1 MESSUNGEN DER GLOBALEN CHARAKTERISTIKA DES MINISENSORS

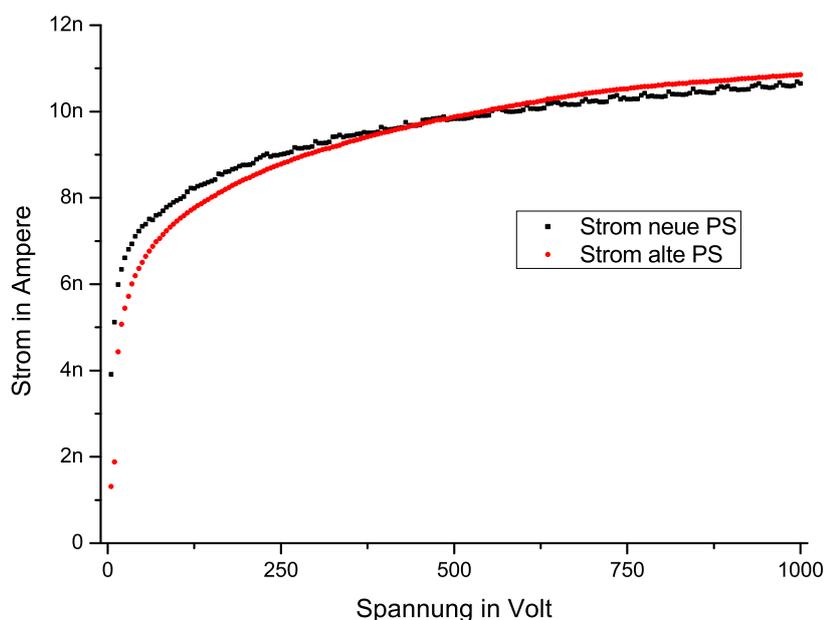


Abbildung 54: Leckstrom in Abhängigkeit der Spannung

In [Abbildung 54](#) ist die IV-Kurve des Minisensors zu sehen. Der Verlauf der beiden Messungen ist zwar leicht unterschiedlich, liegt aber dennoch über den ganzen Messbereich sehr dicht zusammen.

[Abbildung 55](#) zeigt die CV-Kurve des Minisensors. Die beiden Kurven sind, bis auf einen Offset gleich. Der Offset stammt aus dem Aufbau der Teststationen. Das Messprogramm der neuen Teststation korrigiert diesen Offset von ca. 60pF heraus.

¹ siehe [[Haroga](#)]

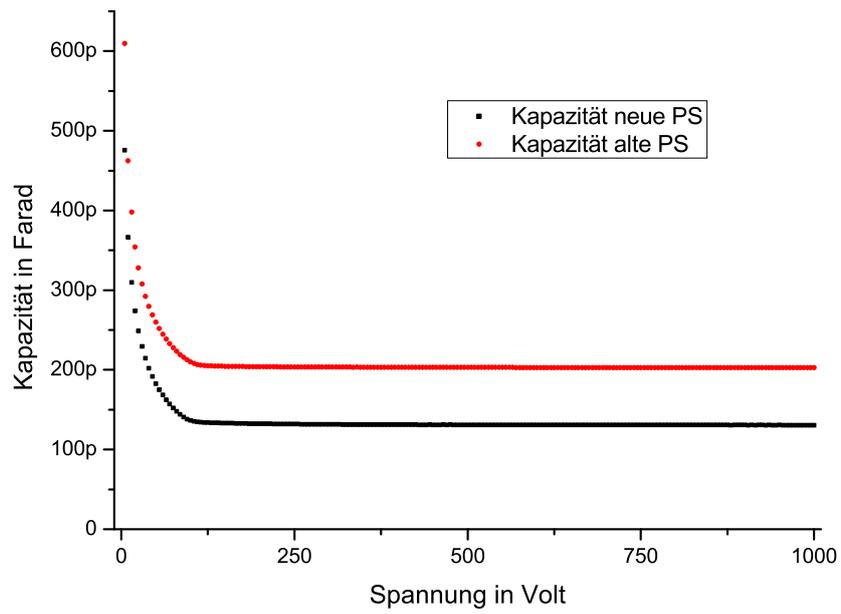


Abbildung 55: Kapazität in Abhängigkeit der Spannung

Wie diese beiden Messungen zeigen, sind bei beiden Teststationen die Messungen von Kapazitäten und Strömen kompatibel.

8.2 MESSUNGEN DER STREIFENWERTE

In den folgenden Messungen wurden die Charakteristika der 192 Streifen des Minisensors bestimmt. Normalerweise, bei guter Produktion und fehlerfreiem Messen, sollten die Werte bei allen Streifen gleich sein. Allerdings kommt es nahezu immer zu Ausreißern, die zumeist auf Kontaktprobleme zwischen der Messnadel und dem Streifen zurückzuführen sind.

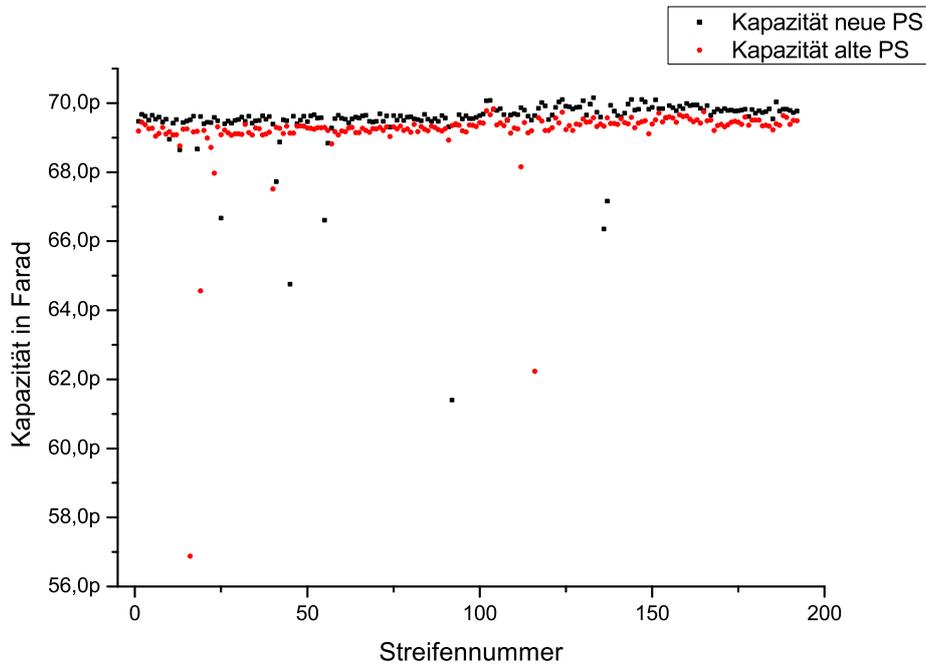


Abbildung 56: Kopplungskapazitäten der Streifen des Minisensors

In [Abbildung 56](#) ist die Messung der Kopplungskapazitäten der Streifen gezeigt. Beide Teststationen messen diese Kapazität sehr konstant bei fast allen Streifen. Dabei sind die Messwerte, bis auf einen minimalen Offset, bei beiden Messungen gleich.

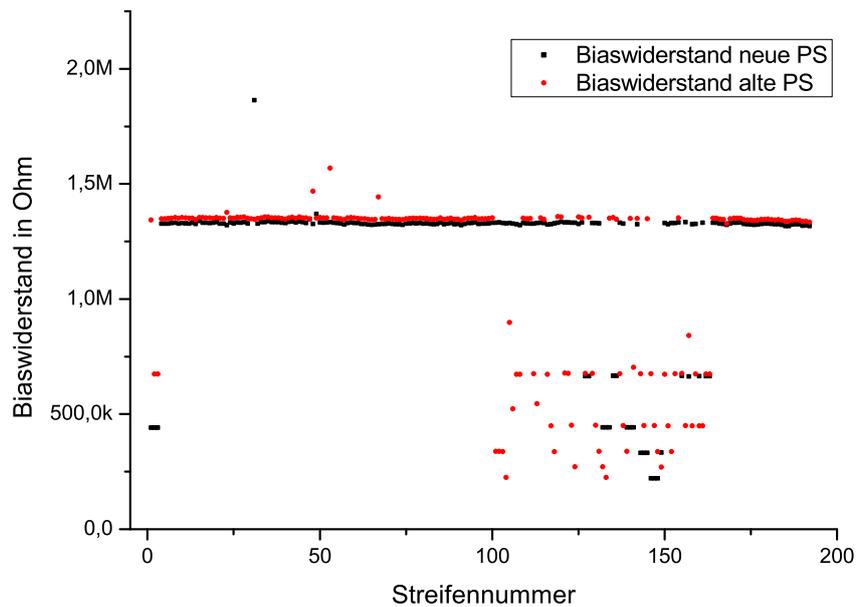


Abbildung 57: Biaswiderstände der Streifen des Minisensors

In Abbildung 57 ist die Messung der Biaswiderstände der Streifen gezeigt. Beide Teststationen messen bis auf einen minimalen Offset die gleichen Werte. Im Bereich zwischen Streifen 125 und 165 sind die meisten Widerstände geringer, als sie sein sollten. Die gemessenen Werte legen die Vermutung nahe, dass jeweils 2 bis 6 Streifen direkten Kontakt haben, da die Werte mit der Anzahl benachbarter Streifen mit gleichem Wert korrespondieren.

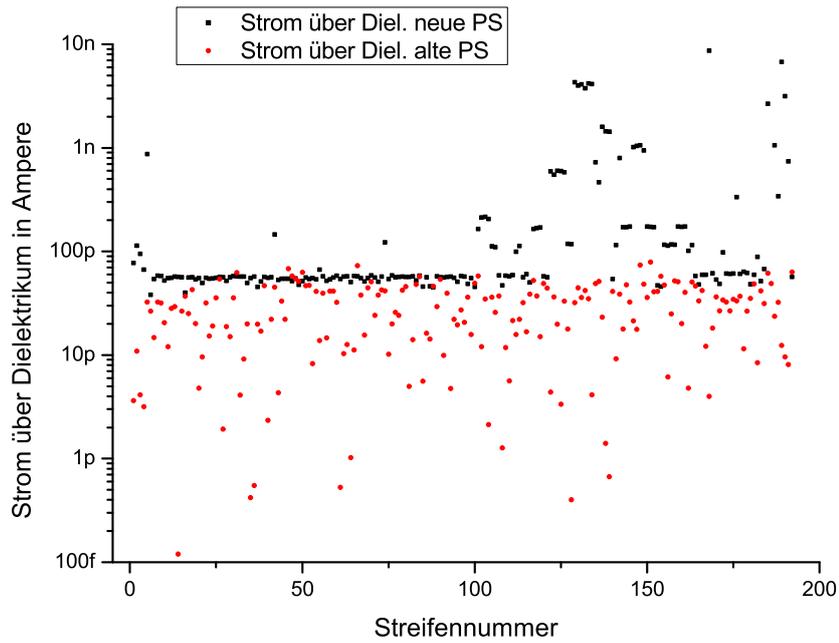


Abbildung 58: Leckströme über die Dielektrika der Streifen des Minisensors

Abbildung 58 zeigt den Strom über das Dielektrikum der Streifen, also zwischen dem Auslesestreifen und dem Implantat. Hier ist zu erkennen, dass die neue Station über weite Bereiche ein konstantes Niveau misst, während die alte Station Werte bis maximal zu diesem Niveau misst. Im Bereich zwischen Streifen 125 und 165, in dem auch die Messung der Biaswiderstände auf fehlerhafte Streifen deutet, ist bei der neuen Station ein erhöhter Leckstrom zu sehen, den die alte Station nicht misst.

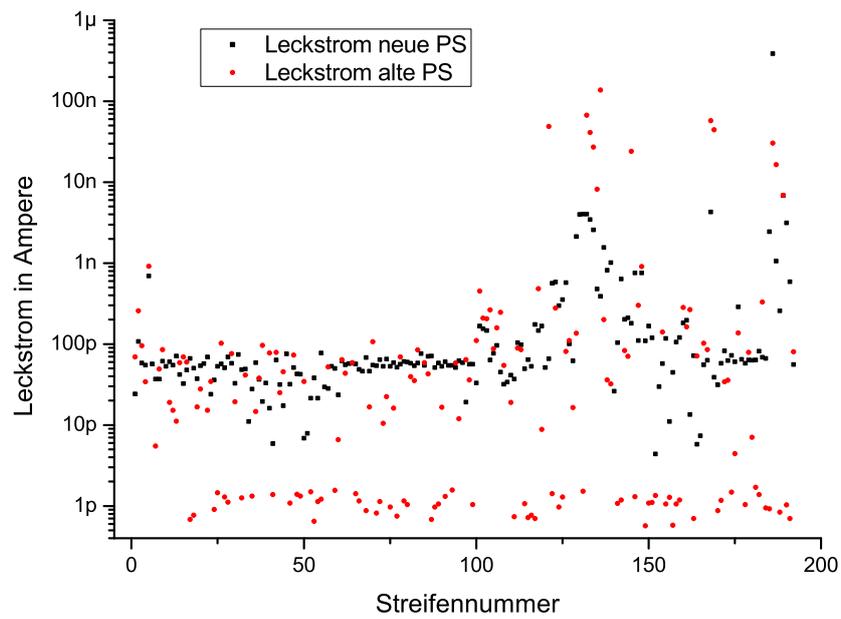


Abbildung 59: Leckströme der Implantate der Streifen des Minisensors

In Abbildung 59 ist der Leckstrom des Streifenimplantats zu sehen. Wie schon bei dem Leckstrom über das Dielektrikum liegen die Messwerte der neuen Station eher auf einem Niveau, während die Messwerte der alten Station eher darunter, bis maximal auf Höhe dieses Niveaus liegen. Auch hier ist im Bereich zwischen Streifen 125 und 165 ein erhöhter Leckstrom zu sehen.

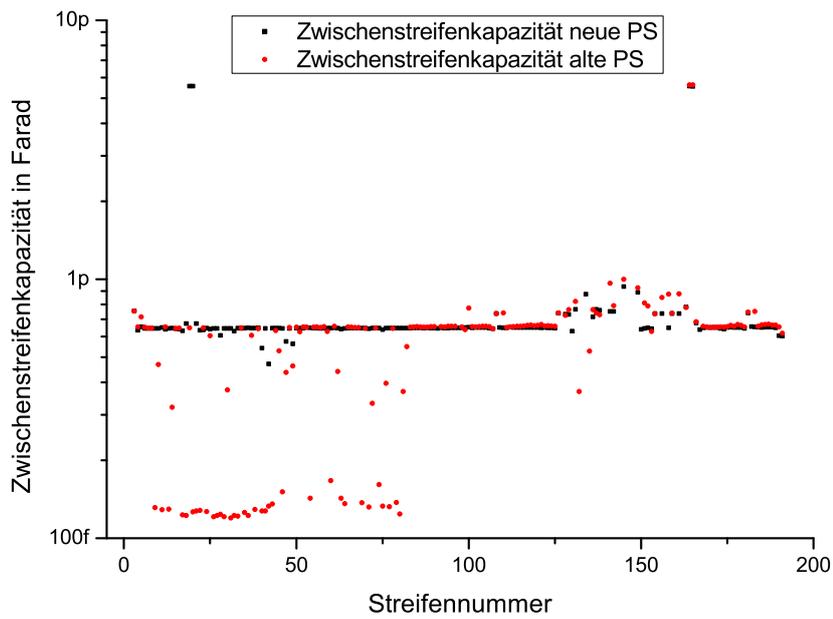


Abbildung 60: Zwischenstreifenkapazitäten der Streifen des Minisensors

In Abbildung 60 ist die Kapazität zwischen den Streifen gezeigt. Streifennummer 1 entspricht dabei der Kapazität zwischen den Streifen 1 und 2. Dabei ist bei den Messungen mit beiden Station klar ein Niveau von 550fF zu erkennen, wobei die Messung mit der alten Station im Bereich zwischen Streifen 10 und 85 einige Kontaktprobleme aufweist. Der Bereich zwischen Streifen 125 und 165 zeigt eine erhöhte Zwischenstreifenkapazität, was ein weiteres Zeichen dafür ist, dass der Sensor in diesem Bereich Fehler aufweist.

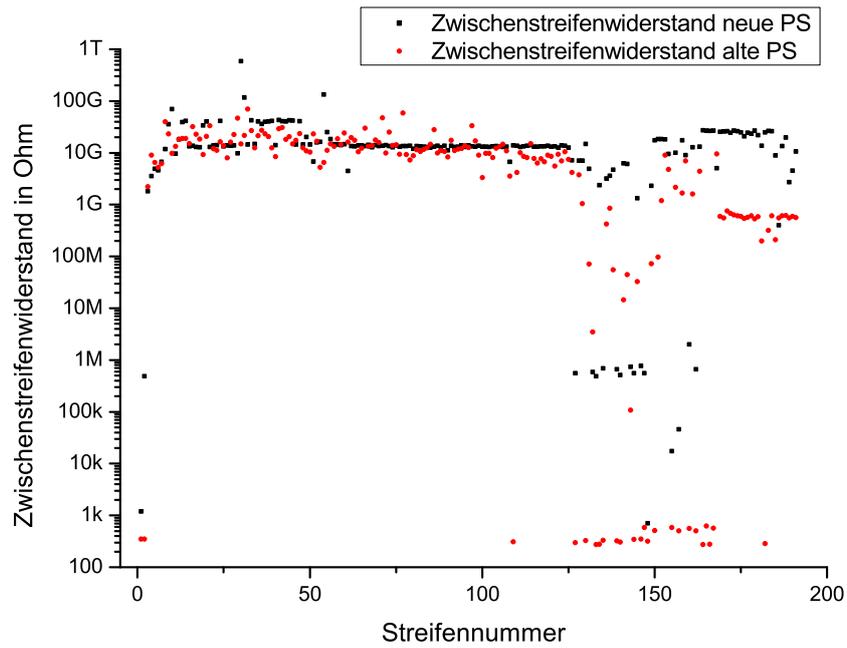


Abbildung 61: Zwischenstreifenwiderstände der Streifen des Minisensors

In Abbildung 61 sind die Widerstände zwischen den Streifen gezeigt. Während die alte Station hier hauptsächlich Werte misst, die im Bereich zwischen $10\text{G}\Omega$ und $50\text{G}\Omega$ liegen, misst die neue über weite Bereiche ein stabiles Niveau bei $10,5\text{G}\Omega$. Der Bereich zwischen Streifen 125 und 165 zeigt auch hier, einen deutlich verringerten Widerstand, so dass davon auszugehen ist, dass in diesem Bereich die Implantate elektrisch miteinander verbunden sind.

8.3 MESSUNG DES STROMS ÜBER DER ZEIT

In dieser Messung wurde ermittelt, wie groß die Einflüsse äußerer Störungen auf die Teststation sind. Dazu wurden jeweils in der neuen und der alten Teststation an eine Diode aus der CMS-Produktion in Sperrrichtung 200V angelegt und der Leckstrom gemessen. Da hier die Störungen aufgrund äußerer Einflüsse untersucht wurden, wurden zwei verschiedene Dioden aus der CMS Produktion verwendet, und die Messung gleichzeitig durchgeführt.

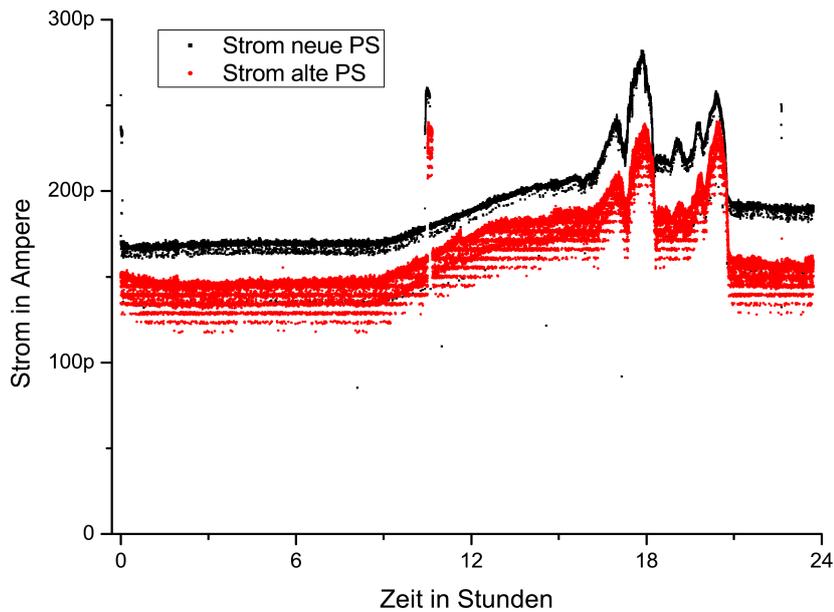


Abbildung 62: Entwicklung des Leckstroms einer Diode über einen Zeitraum von 24 Stunden.

In Abbildung 62 ist der Verlauf der beiden Leckströme zu sehen. Die Messung wurde Abends gestartet. Zunächst ist in der Nacht ein konstantes Niveau zu sehen. Bei Tagesanbruch steigt das Niveau leicht an, hat am Nachmittag einige Spitzen und nähert sich am Abend wieder dem anfänglichen Niveau an.

Beide Stationen das gleiche Verhalten zeigen, wenn auch mit einem kleinen Offset.

Beim SLHC wird die Luminosität um eine Größenordnung erhöht. Dies bedeutet für den Spurendetektor des CMS-Experiments, dass zum einen die Strahlenhärte der bisherigen Silizium-Sensoren nicht mehr ausreichend und zum anderen die Kanalbelegung zu hoch ist. Für den neuen Tracker müssen deshalb Sensoren neu entwickelt und gebaut werden. Für die Entwicklung dieser Sensoren müssen neue Materialien und neue Strukturen untersucht werden.

Für diese Untersuchungen wurde eine Teststation gebaut, die die elektrischen Charakteristika wie Kapazitäten, Widerstände und Leckströme untersuchen kann. Da bei höheren Bestrahlungen die Leckströme stark ansteigen und die Messungen erschweren oder unmöglich machen, müssen diese Leckströme möglichst klein gehalten werden. Dies wird dadurch möglich, dass der Sensor während der Messung gekühlt wird, da die Leckströme von der Temperatur abhängen. Deshalb wurde ein von Karl-Heinz Hoffmann gebauter Kühljig in die Station eingebaut, der Kaltmessungen bis -30°C erlaubt. Zusätzlich können mittels des Kühlsystems, das sehr schnell bestimmte Temperaturen einstellen kann, Sensorcharakteristika auch als Funktion der Temperatur aufgenommen werden. Die Kontrolle des Jigs wurde soweit automatisiert, dass der Benutzer lediglich die gewünschte Temperatur eingeben muss, während die Software automatisch die aktuelle Luftfeuchtigkeit berücksichtigt sowie bei Temperaturwerten, die außerhalb eines zulässigen Bereichs liegen, aus Sicherheitsgründen abschaltet. Unabhängig davon gibt es noch ein Temperaturüberwachungssystem, das bei zu hohen Temperaturen abschaltet um eine Überhitzung zu vermeiden.

Außerdem steigt bei Bestrahlung die Depletionsspannung an. Um trotzdem bei hoch bestrahlten Sensoren noch deren Charakteristika untersuchen zu können, kann eine Spannung über die Struktur bis 2kV angelegt werden.

Um die Zeit, die benötigt wird um einen Sensor oder einen Satz von Teststrukturen zu messen zu verringern, können alle Operationen, die der Benutzer direkt in der Software durchführen kann, wie die Temperatur einstellen, die Position des Messtisches zu ändern oder Messungen auszuführen, in einer Datei abgelegt werden, die dann automatisch abgearbeitet wird.

Um die Messnadeln mikrometergenau positionieren zu können, wurde ein Mikroskop mit hoher Vergrößerung eingebaut. Dieses Mikroskop ist mit einer hochauflösenden Kamera ausgestattet, die ein flüssiges Live-Bild ausgibt. Mit diesem Live-Bild wird es möglich die Nadeln auch dann noch zu positionieren, wenn ein Luftfeuchteschott eingesetzt ist. Dieses Luftfeuchteschott wird benötigt, um bei tiefen Temperaturen eine Taubildung auf dem Sensor, aufgrund zu hoher Luftfeuchtigkeit, zu vermeiden.

Um Sensoren und Teststrukturen zu produzieren, werden Masken benötigt, die alle Information über den Aufbau der Struktur beinhalten. Um diese Masken zu erstellen werden Dateien verwendet, in der die Formen für die jeweiligen Masken gespeichert sind. Um diese Dateien zu erstellen gibt es kommerzielle Programme und ein quelloffenes Programm. Dieses quelloffene Programm habe ich an unsere Bedürfnisse angepasst und ist dadurch in der Lage durch Makros, die benötigten Dateien automatisiert zu erstellen, indem die Strukturen aus Sub-Strukturen zusammengesetzt werden.

Mit Hilfe dieses Programms habe ich einige Varianten eines auf dem Sensor integrierten Pitchadapters gezeichnet, die sich durch jeweils spezifische Eigenschaften auszeichnen.

In Zukunft sollen mit der Teststation neue Materialien und Strukturen auf ihre Eignung für CMS untersucht werden. In der Produktionsphase soll dann eine gleichbleibende Qualität sichergestellt werden. Auf dem Sensor integrierte Pitchadapter sollen produziert werden und ihre Auswirkungen auf den Sensor untersucht werden. Bei der CEC-Bestellung von Teststrukturen bei HPK sind ein Strixelsensor und eine Variante eines Sensors mit integriertem Pitchadapter vorgesehen.

Teil IV
ANHANG



TECHNISCHE ZEICHNUNGEN DER PROBESTATION

Die technischen Zeichnungen, nach denen die Probestation aufgebaut wurden, sowie der Schaltplan der Relais liegen als EKP-Note „Technische Pläne und Zeichnungen der Probestation 2009“ mit der Registrierungsnummer: IEKP-KA-CMS/2009-12 vor.

Diese ist unter http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/index.php?option=com_content&view=article&id=94%3Averoeffentlichungenpublikationen&catid=1%3Aforschung&Itemid=94%E3%80%88%3Dde&lang=de#CMS abzurufen.

Zum Abschluss meiner Diplomarbeit möchte ich mich bei allen bedanken, die mir während dieser Zeit zur Seite standen.

Zunächst möchte ich Herrn Prof. Thomas Müller für das interessante Thema und die Möglichkeit die Diplomarbeit am IEKP zu erstellen, danken. Herrn Prof. Wim de Boer möchte ich für die Übernahme des Korreferats danken.

Meinen Betreuern Dr. Frank Hartmann und Karl-Heinz Hoffmann möchte ich für die Einführung in die Thematik und die Hilfestellung, Unterstützung und Diskussionen während der Diplomarbeit danken.

Dr. Martin Frey und Dr. Alexander Dierlamm danke ich für die Tipps, insbesondere bei der Gerätekommunikation. Dr. Hans-Jürgen Simonis danke ich für die Unterstützung, vor allem im IT-Bereich.

Für die vielen kleinen und größeren Arbeiten, Hilfestellungen, Ideen und Diskussionen danke ich besonders Tobias Barvich, Pia Steck und Felix Boegelspacher.

Bei meinen Bürokollegen Karl-Heinz Hoffmann und Michael Schneider möchte ich mich für die gute Atmosphäre, die Diskussionen und kleinen Hilfestellungen und Tipps bedanken.

Für die Bewältigung der bürokratischen Angelegenheiten danke ich Diana Fellner-Thedens und Brigitte Schulz.

Den Mitarbeitern der mechanischen Werkstatt danke ich für die schnelle und gute Erledigung meiner Aufträge.

Meinen Eltern Gabriele und Günther Erfle möchte ich dafür danken, dass sie mir dieses Studium ermöglicht und mich dabei unterstützt haben.

Diese Diplomarbeit wurde unterstützt vom Impuls- und Vernetzungsfonds der Helmholtz Gemeinschaft, Vertrag HA-101 ("Physics at the Terascale").

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1	LHC und SLHC-Schema [ELo8]	5
Abbildung 2	Ansicht des CMS [Aeo6]	6
Abbildung 3	Schematische Ansicht des CMS-Spurdetektors [Zito9]	7
Abbildung 4	Übersicht über die Vorbeschleuniger Upgrade-Optionen	8
Abbildung 5	Gitterstruktur von Halbleitern [Sze81]	11
Abbildung 6	Gitterstruktur von Silizium [Kra09]	12
Abbildung 7	Bändermodell für verschiedene Materialklassen [Kra09]	13
Abbildung 8	Die Bandlücke im Halbleiter [Dieo3]	13
Abbildung 9	Die Ladungsträgerkonzentration im Halbleiter in Abhängigkeit der Temperatur [Goso8]	14
Abbildung 10	Fünfwertiges Fremdatom [Goso8]	15
Abbildung 11	Dreiwertiges Fremdatom [Goso8]	16
Abbildung 12	Donator- und Akzeptorniveaus im dotierten Halbleiter [IL99]	16
Abbildung 13	Ausbildung eines pn-Übergang [Kra09]	17
Abbildung 14	Die Charakteristika eines pn-Übergangs [Kra09]	18
Abbildung 15	Anlegen einer äußeren Spannung an einen pn-Übergang [Kra09]	19
Abbildung 16	Detektionsprinzip eines Siliziumstreifensensors [Furo2]	21
Abbildung 17	Aufbau eines Siliziumstreifensensors [Furo2]	22
Abbildung 18	Lücken im Gitter, direkt nach Bestrahlung [Huh02]	24
Abbildung 19	Depletionsspannung in Abhängigkeit der Fluenz direkt nach Bestrahlung [Mol99]	25
Abbildung 20	Effektive Dotierkonzentration über der Zeit bei 60°C [Mol99]	26
Abbildung 21	Querschnitt eines Wafers mit n ⁺ -Dotierung auf der Rückseite [Mar05]	29
Abbildung 22	Querschnitt eines Wafers mit Öffnung im SiO ₂ für die p-Dotierung.[Mar05]	30
Abbildung 23	Querschnitt eines Wafers mit implantiertem p ⁺ -Streifen.[Mar05]	30
Abbildung 24	Erzeugen der Schicht von Polykristallinem Silizium für den Biaswiderstand.	30
Abbildung 25	Querschnitt eines Wafers, fertig zur Metallisierung.[Mar05]	31
Abbildung 26	Ein (bis auf die Schutzschicht) fertiger Sensor.[Mar05]	31
Abbildung 27	Zeichnung einer Diode	34
Abbildung 28	Zeichnung eines Vias	35
Abbildung 29	Zeichnung einer Ecke mit einem inneren runden Ausschnitt	36
Abbildung 30	Zeichnung eines Rechtecks mit innen abgerundeten Ecken	37
Abbildung 31	Zeichnung eines äußeren Schutzrings	38
Abbildung 32	Zeichnung eines Minisensors	40
Abbildung 33	Nicht abgewinkelter Pitchadapter	42
Abbildung 34	Einfach abgewinkelter Pitchadapter Variante 1	43
Abbildung 35	Einfach abgewinkelter Pitchadapter, Variante 2	44
Abbildung 36	Einfach abgewinkelter Pitchadapter, Variante 3	45
Abbildung 37	Einfach abgewinkelter Pitchadapter, Variante 3, mit auseinandergezogenem Auslesefeld	46
Abbildung 38	Ministrixelsensor mit Pitchadapter	47
Abbildung 39	Minisensor mit Pitchadapter	49
Abbildung 40	Ministrixelsensor mit vier Strixel	50
Abbildung 41	Gesamtaufbau der Probestation	54
Abbildung 42	Zeichnung der Trägerstruktur	59

Abbildung 43	LED-Ringlicht	60
Abbildung 44	UML-Zeichenerklärung	65
Abbildung 45	Übersicht über die Probestation-Software.	67
Abbildung 46	Die Temperaturkontrolle	68
Abbildung 47	Die Verfahrtschsteuerung	71
Abbildung 48	Lese Sequenz	74
Abbildung 49	Erzeuge Sequenzschritt	74
Abbildung 50	Starte Sequenzschritt	75
Abbildung 51	Position der Nadeln auf einem Sensor bei Standardmessungen	76
Abbildung 52	Messung von IV und CV	77
Abbildung 53	Die Streifenmessung	79
Abbildung 54	Leckstrom Leckstrom in Abhängigkeit der Spannung	81
Abbildung 55	Kapazität in Abhängigkeit der Spannung	82
Abbildung 56	Kopplungskapazitäten der Streifen des Minisensors	83
Abbildung 57	Biaswiderstände der Streifen des Minisensors	84
Abbildung 58	Leckströme über die Dielektrika der Streifen des Minisensors	85
Abbildung 59	Leckströme der Implantate der Streifen des Minisensors	86
Abbildung 60	Zwischenstreifenkapazitäten der Streifen des Minisensors	87
Abbildung 61	Zwischenstreifenwiderstände der Streifen des Minisensors	88
Abbildung 62	Entwicklung des Leckstroms einer Diode über einen Zeitraum von 24 Stunden.	89

LITERATURVERZEICHNIS

- [Aeo6] ACOSTA, Daniel ; ET. AL.: CMS Physics - Technical Design Report. (2006), Februar. http://cmsdoc.cern.ch/cms/cpt/tdr/ptdr1_final_colour.pdf. – Volume I: CERN-LHCC-2006-001 (Zitiert auf den Seiten 6, 7 und 99.)
- [CECo8] CEC: R&D proposal for an R&D project to develop materials, technologies and simulations for silicon sensor modules at intermediate to large radii of a new CMS tracker for SLHC. (2008), Februar. http://cmsdoc.cern.ch/cms/electronics/html/elec_web/docs/slhcusg/proposals/08_02.pdf (Zitiert auf den Seiten 9.)
- [CERo8] CERN COMMUNICATION GROUP: LHC the Guide. (2008), Januar. <http://cdsmedia.cern.ch/img/CERN-Brochure-2008-001-Eng.pdf> (Zitiert auf den Seiten 5 und 8.)
- [Dieo3] DIERLAMM Alexander: *Untersuchungen zur Strahlenhärte von Siliziumsensoren*, Universitaet Karlsruhe, Diss., 2003. – IEKP-KA/03-23 (Zitiert auf den Seiten 13 und 99.)
- [ELo8] EVANS, Lyn ; LINSSEN, Lucie: The Super-LHC is on the starting blocks. In: *CERN Courier* 48 (2008), Juli/August, Nr. 6 (Zitiert auf den Seiten 5, 8 und 99.)
- [Eva08] EVANS, Lyn: SLHC Accelerator and Injector Upgrades. (2008), April. <http://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=16&sessionId=4&resId=1&materialId=slides&confId=29254>. – SLHC-PP kick-off meeting (Zitiert auf den Seiten 8.)
- [Furo2] FURGERI, Alexander: *Studien zu Strahlenschäden an Siliziumstreifensensoren fuer CMS*. 2002. – IEKP-KA/2002-14 (Zitiert auf den Seiten 21, 22 und 99.)
- [Goso8] GOSSNER Stefan: *Grundlagen der Elektronik*. 7. Auflage. Shaker Verlag, 2008 (Zitiert auf den Seiten 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20 und 99.)
- [Halo8] HALL, G.: The upgrade programme of the CMS Tracker at SLHC. In: *PoS VERTEX 2008* (2008), August, 18. http://cdsweb.cern.ch/record/1196121/files/VERTEX202008_018.pdf. – CERN-CMS-CR-2009-053 (Zitiert auf den Seiten 9.)
- [Har09a] HARTMANN, Frank: *Calibration and final measurement*.3. 2009. – E-Mail Anhang (Zitiert auf den Seiten 81.)
- [Har09b] HARTMANN, Frank: *Evolution of Silicon Sensor Technology in Particle Physics*. First Edition. Karlsruhe, Germany : Springer Verlag, 2009 (Zitiert auf den Seiten 20, 23 und 25.)
- [Hof08] HOFFMANN, Karl-Heinz: *Vorbereitende Arbeiten zur Qualitätskontrolle zukuenftiger Halbleiterdetektoren in Hochenergieexperimenten*. 2008. – IEKP-KA/2008-9 (Zitiert auf den Seiten 56 und 69.)
- [Huh02] HUHTINEN, M.: Simulation of non-ionising energy loss and defect formation in silicon. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 491 (2002), Nr. 1-2, 194 - 215. [http://dx.doi.org/DOI:10.1016/S0168-9002\(02\)01227-5](http://dx.doi.org/DOI:10.1016/S0168-9002(02)01227-5). –

- DOI DOI: 10.1016/S0168-9002(02)01227-5. – ISSN 0168-9002 (Zitiert auf den Seiten 24 und 99.)
- [IL99] IBACH Harald ; LUETH Hans: *Festkoerperphysik. Einfuehrung in die Grundlagen*. 4. Auflage. Springer Verlag, 1999 (Zitiert auf den Seiten 16 und 99.)
- [Kra09] KRAMMER, Dr. M.: *Detektoren in der Hochenergiephysik - Halbleiterdetektoren*. <http://wwwhephy.oeaw.ac.at/p3w/halbleiter/V0Skriptum/V0-4-Halbleiterdetektoren.pdf>. Version: 2009. – Vorlesung (Zitiert auf den Seiten 11, 12, 13, 17, 18, 19 und 99.)
- [Lino03] LINDSTROEM, Gunnar: Radiation damage in silicon detectors. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 512 (2003), Nr. 1-2, 30 - 43. [http://dx.doi.org/DOI:10.1016/S0168-9002\(03\)01874-6](http://dx.doi.org/DOI:10.1016/S0168-9002(03)01874-6). – DOI DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01874-6. – ISSN 0168-9002. – Proceedings of the 9th European Symposium on Semiconductor Detectors: New Developments on Radiation Detectors (Zitiert auf den Seiten 25.)
- [Mar05] MARCZEWSKI, Jacek: *Bulk silicon detectors of ionizing radiation : The role of the depletion layer*. Warschau, Polen, 2005. – ISBN 83-91417-95-6 (Zitiert auf den Seiten 29, 30, 31 und 99.)
- [Mol99] MOLL, Michael: *Radiation Damage in Silicon Particle Detectors*, Universitaet Hamburg, Diss., 1999. <http://www-library.desy.de/cgi-bin/showprep.pl?desy-thesis-99-040> (Zitiert auf den Seiten 25, 26 und 99.)
- [Sato8] SATPATHY, Asish: Overview and Status of the CMS Silicon Strip Tracker. In: *J.PHYS.CONF.SER* 092026 (2008). http://www.iop.org/EJ/article/1742-6596/110/9/092026/jpconf8_110_092026.pdf (Zitiert auf den Seiten 6.)
- [Sze81] SZE, S. M.: *Physics of Semiconductor Devices*. Second Edition. Murray Hill, New Jersey, USA : John Wiley & Sons, 1981 (Zitiert auf den Seiten 11, 12, 15 und 99.)
- [Thi] THIES, Juergen: *LayoutEditor*. <http://www.layouteditor.net/> (Zitiert auf den Seiten 33.)
- [Zito9] ZITO, Giuseppe: *CMS Tracker Visualization*. <http://www.ba.infn.it/~zito/cms/tvis.html>. Version: 2009 (Zitiert auf den Seiten 7 und 99.)

PRÜFUNGSERKLÄRUNG

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Prüfungsleistung selbstständig verfasst habe und noch nicht anderweitig zu Prüfungszwecken vorgelegt und keine anderen, als die angegebenen Quellen und erlaubten Hilfsmittel verwendet und Zitate als solche kenntlich gemacht habe.

Karlsruhe, September 2009

Joachim Erfle