

Entwicklung und Integration einer  
Lasernsteuerung für einen automatischen  
Infrarot-Laser-Teststand für  
Silizium-Streifen-Detektoren

*Development and integration of a laser-control for an  
automatic infrared-laser-teststand for silicon detectors*

Masterthesis Physik

vorgelegt von

Martin Kesselkaul

17.10.2014

Gießen

Betreuer der Arbeit: Prof. Dr. Brinkmann

Justus-Liebig-Universität Gießen

Fachbereich 07 Physik

II. Physikalisches Institut



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>9</b>
2.1	Das Standardmodell . . . . .	9
2.2	Die starke Wechselwirkung . . . . .	11
<b>3</b>	<b>FAIR - Forschungseinrichtung</b>	<b>13</b>
3.1	Das PANDA-Experiment . . . . .	15
3.1.1	Physikalische Zielsetzung . . . . .	15
3.1.2	Charmonium-Spektroskopie . . . . .	15
3.1.3	Glueballs, Hybrids und Multiquarks . . . . .	16
3.1.4	Hadronen in Kernmaterie . . . . .	17
3.1.5	Hyperkerne . . . . .	17
3.2	Der PANDA-Detektor . . . . .	18
3.3	Targetspektrometer . . . . .	20
3.3.1	Die Targets . . . . .	21
3.3.2	Der Micro-Vertex-Detektor . . . . .	22
3.3.3	Zentrales Tracking . . . . .	25
3.3.4	DIRC-Detektor . . . . .	26
3.3.5	Elektromagnetisches Kalorimeter . . . . .	27
3.3.6	Myonen-Detektor . . . . .	29
3.4	Vorwärtsspektrometer . . . . .	30
3.4.1	Vorwärtstracker . . . . .	30
3.4.2	RICH-Detektor . . . . .	30
3.4.3	Time of Flight . . . . .	30
3.4.4	Elektromagnetisches Kalorimeter . . . . .	31
3.4.5	Myonen-Detektor . . . . .	31
<b>4</b>	<b>Detektorgrundlagen</b>	<b>33</b>
4.1	Nachweis geladener Teilchen . . . . .	33
4.2	Silizium . . . . .	35

4.3	Dotierung . . . . .	37
4.4	PN-Übergang . . . . .	39
4.5	Silizium-Streifendetektoren . . . . .	43
4.5.1	Doppelseitige Streifendetektoren . . . . .	44
4.6	Silizium-Pixeldetektoren . . . . .	46
4.7	Ortsauflösung der Streifendetektoren . . . . .	47
4.8	Guardring . . . . .	51
4.9	Strahlenschäden . . . . .	52
4.9.1	NIEL-Hypothese . . . . .	54
4.9.2	Auswirkungen der Strahlenschäden . . . . .	56
<b>5</b>	<b>Verwendete Geräte und Programme</b>	<b>61</b>
5.1	xy-Tisch . . . . .	61
5.1.1	Höhenverstellung . . . . .	63
5.2	Borland Builder 6 . . . . .	64
5.3	COM-Port-Adapter . . . . .	64
5.4	Laser . . . . .	65
5.5	TTL-Interface . . . . .	68
5.6	Verwendete Silizium-Streifendetektoren . . . . .	69
5.7	Laser-Box . . . . .	71
<b>6</b>	<b>Steuerungsprogramm</b>	<b>75</b>
<b>7</b>	<b>Messungen</b>	<b>77</b>
7.1	Laser-Testmessungen . . . . .	77
7.2	Messungen mit fertigem Aufbau . . . . .	81
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>85</b>
<b>9</b>	<b>Danksagung</b>	<b>87</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>89</b>
A.1	Tischsteuerung . . . . .	89
A.1.1	Der Quellcode . . . . .	89

A.1.2	Die Bedienoberfläche . . . . .	93
A.2	TTL-Interface-Steuerung . . . . .	103
A.2.1	Der Quellcode . . . . .	103
A.2.2	Die Bedienoberfläche . . . . .	110
A.3	Messdaten . . . . .	114
A.4	Fitparameter . . . . .	117

---

---

---

## **Zusammenfassung**

Im Rahmen dieser Masterthesis wurde für das PANDA-Projekt ein Infrarot-Laser-Teststand für Silizium-Streifen-Detektoren entwickelt und in Betrieb genommen. Mittels eines motorisierten xy-Tisches werden kollimierte Laserpulse, des verwendeten 1060 nm Lasers,  $\mu\text{m}$  genau auf den Sensoren positioniert. Die Steuerungssoftware für den xy-Tisch wurde selbst entworfen und ermöglicht umfangreiche Bewegungsmanöver. Die gesamte Konstruktion wurde in eine eigens für diese Arbeit entworfene Dunkelbox eingebaut.

## **Abstract**

As part of this master thesis an infrared-laser-teststand for silicon strip detectors has been developed and put into operation for the PANDA project. Using a motorized xy-table, the collimated laser pulses of a 1060 nm laser are positioned with  $\mu\text{m}$  accuracy on the sensors. The control-software for the xy-table was designed discretely and allows extensive motion maneuvers. The entire construction was installed in a darkroom especially designed for this work.

---

---



# 1 Einleitung

In den kommenden Jahren wird am GSI Helmholzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt die FAIR-Forschungseinrichtung (**F**acility for **A**ntiproton and **I**on **R**esearch) entstehen. PANDA (Anti**p**rotonen **a**nnihilation at **D**armstadt) zählt als eines der zentralen Experimente der Beschleunigeranlage und soll bislang noch wenig untersuchten physikalischen Fragestellungen auf den Grund gehen.

Wesentliches Element des PANDA-Detektors ist der Mikro-Vertex-Detektor, der als erste Detektorlage den Interaktionspunkt umgibt. In dem Mikro-Vertex-Detektor werden zahlreiche Silizium-Streifen-Sensoren verbaut, die vor ihrem Einsatz mittels eines Infrarot-Laser-Teststandes untersucht werden sollen.

Zentraler Bestandteil dieser Masterthesis war die Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme eines Laser-Teststandes im Rahmen des PANDA-Experiments. Zu diesem Zweck wurde eine lichtdichte Box konstruiert, in deren abgedunkelten Bereich die Silizium-Streifen-Sensoren vermessen werden sollen. Die Messungen wurden mit einem 1060 nm Infrarot-Laser durchgeführt, dabei wurde die Tatsache ausgenutzt, dass Siliziumsensoren auf gebündelte Laserpulse genauso reagieren, wie auf minimal ionisierende Teilchen. Durch genaue Positionierung der Laserpulse lässt sich so die individuelle Ladungsverteilung pro Puls auf den Auslestreifen und die Dotierungskonzentration des Silizium-Bulks untersuchen. Desweiteren ist es möglich, den Einfluss eines elektrischen Feldes auf die Ladungsaufnahme und die Ortsauflösung der Streifendetektoren zu studieren.



## 2 Grundlagen

### 2.1 Das Standardmodell

Die Teilchenphysik beschäftigt sich mit der Frage nach den elementaren Bausteinen der Materie, sowie den grundlegenden Kräften zwischen ihnen. Bekanntermaßen ist die Materie aus Protonen, Neutronen und Elektronen aufgebaut. Bis heute konnte für das Elektron keine Substruktur oder räumliche Ausdehnung gefunden werden. Es wird als punktförmiges Elementarteilchen mit Spin  $1/2$  angesehen. Bei Protonen und Neutronen wurden in Experimenten Anregungszustände entdeckt, was auf eine Substruktur der besagten Teilchen schließen lässt. Um die experimentell gefundenen Eigenschaften zu beschreiben, verwendet man das Quarkmodell, welches allen Hadronen eine innere Struktur, bestehend aus zwei (Mesonen) oder drei (Baryonen) Quarks, zuweist. Die Quarks wiederum gelten, genau wie die Leptonen, aktuell als punktförmige, ausdehnungslose Elementarteilchen, da bis heute keine Anregungszustände für sie gefunden wurden. Mit Hilfe des Standardmodells werden alle bekannten Teilchen und ihre Wechselwirkungen untereinander in einer Theorie zusammengefasst. Es ist noch nicht gelungen, die Gravitation in diese Theorie zu integrieren, somit behandelt das Standardmodell nur die starke, schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung. Die Leptonen und Quarks werden in drei Generationen unterteilt. Wie Abbildung 2.1 zeigt, verkörpern Elektron ( $e^-$ ), Myon ( $\mu$ ), Tauon ( $\tau$ ), Elektron-Neutrino ( $\nu_e$ ), Myon-Neutrino ( $\nu_\mu$ ) und Tauon-Neutrino ( $\nu_\tau$ ) insgesamt 6 Leptonen sowie deren jeweilige Antiteilchen. Die ungeladenen Neutrinos wechselwirken nur schwach, wohingegen die geladenen Leptonen auch elektromagnetisch wechselwirken können.

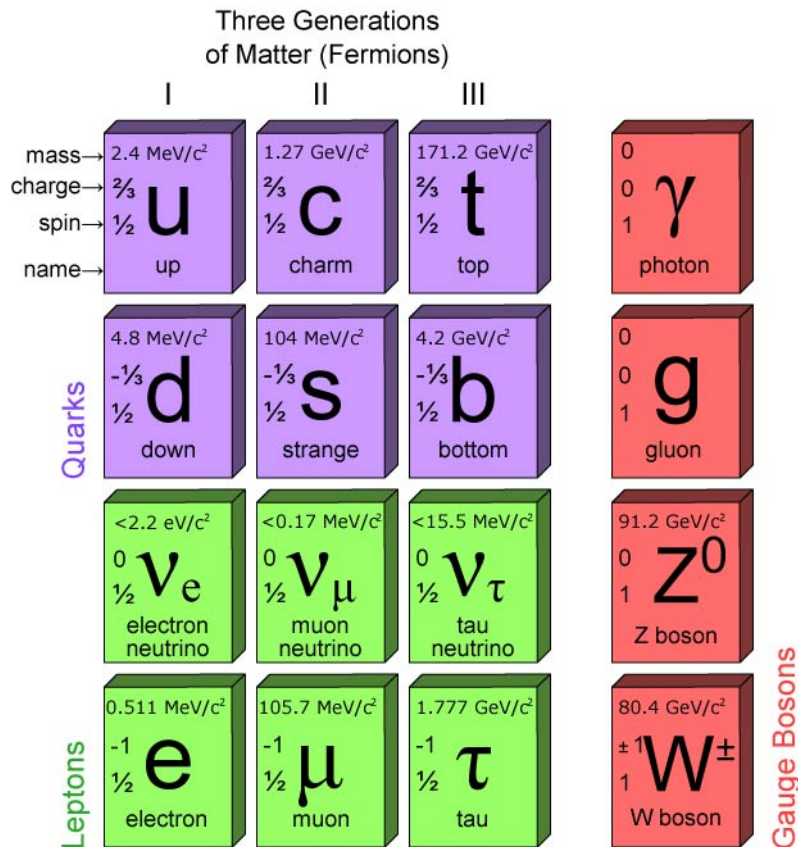


Figure 2.1: Die aktuellen Kenntnisse der Teilchenphysik, zusammengefasst im Standardmodell. Abgebildet sind alle bekannten Elementarteilchen sowie die Austauschteilchen der Wechselwirkungen [1].

Neben den 6 Leptonen zeigt Abbildung 2.1 auch alle 6 Quarks up (u), down (d), strange (s), charm (c), top (t) und bottom (b), mit ihrer jeweiligen Masse, Ladung und Spin. Darüber hinaus trägt jedes Quark noch eine sogenannte Farbladung, die als zusätzliche Quantenzahl eingeführt wurde, da manche Baryonen ansonsten das Pauli-Prinzip verletzen würden, nachdem es für Fermionen (Leptonen und Quarks zählen zu den Fermionen) keine symmetrische Gesamtwellenfunktion geben darf. Die Delta-Resonanz,  $\Delta^{++}$  bestehend aus 3 up-Quarks (uuu), verfügt wegen der Ununterscheidbarkeit der up-Quarks über eine symmetrische Ortswellenfunktion. Die Spins der Quarks von je  $1/2$  koppeln zum Gesamtspin  $3/2$ , womit auch die Spinwellenfunktion und analog dazu auch die Isospinwellenfunktion symmetrisch sind. Somit wäre die zusammengesetzte Wellenfunktion symmetrisch, wodurch das Pauli-Prinzip ver-

letzt würde. Nur durch eine weitere Quantenzahl, die Farbladung, kann die Funktion antisymmetrisiert und damit das Pauli-Prinzip erfüllt werden. Mit der zusätzlichen Quantenzahl können Quarks eine von drei Farbladungen tragen, also rot, grün oder blau, wobei die Antiteilchen mit der jeweiligen Antifarbe vorkommen. Die Farbquantenzahl bedingt desweiteren einen elementaren Unterschied zwischen Leptonen und Quarks. Während Leptonen als einzelne Teilchen existieren können, können Quarks nicht isoliert auftreten, da sie die Farbneutralität erfüllen müssen. Die Bedingung der Farbneutralität wird Confinement genannt und lässt Quarks entweder als Mesonen (Quark-Antiquark-Paar) oder als Baryonen (Quark-Drilling) auftreten, wobei sich die Farbladungen entweder durch Farbe und Anti-Farbe aufheben oder durch blau-rot-grün-Zusammenschluss zu weiß kombinieren.

## 2.2 Die starke Wechselwirkung

Die verantwortliche Kraft, die die Quarks zu Hadronen bindet, wird durch die starke Wechselwirkung vermittelt, welche durch die Theorie der Quantenchromodynamik beschrieben wird. Die entsprechenden Austauscheteilchen sind die Gluonen, welche an die Farbladung der Quarks koppeln. Da Gluonen selbst auch Farbe und Antifarbe tragen, können sie auch untereinander wechselwirken. Für sehr kleine Abstände, also deutlich unterhalb von  $10^{-15}$  m, ist das Modell der QCD gut verstanden. Bei solchen Abständen sind die Wechselwirkungen zwischen Quarks und Gluonen so schwach, dass diese störungstheoretisch berechnet werden können. Die Störungstheorie liefert jedoch nur bei kleinen Kopplungsstärken der Quark-Gluonen-Wechselwirkung genaue Ergebnisse.

Liegt der Abstand der Quarks bei Größenordnungen eines Nukleons ( $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ ), lässt sich die Störungstheorie nicht mehr anwenden. Im Gegensatz zu gravitativen und elektromagnetischen Kräften, die mit steigendem Abstand immer kleiner werden, wächst die Kraft zwischen Quarks mit steigendem Abstand. Dieses besondere Verhalten resultiert aus dem sogenannten Confinement, welches besagt, dass Quarks nicht als freie Teilchen existieren können. Wird der Abstand zwischen zwei Quarks zu groß, bilden sich Quark-Antiquark-Paare, die sich mit den Quarks verbinden (Hadronisierung), so dass der Zustand des freien Quarks verhindert wird.

Experimentelle Untersuchungen der starken Wechselwirkung werden oft mit Hilfe der Charmoniumspektroskopie durchgeführt. Denn für kleine Abstände ähnelt das Charmoniumspektrum dem des Positroniums (dazu mehr in Kapitel 3.1.2). Der Grund dieser Gemeinsamkeiten ist ein coulombartiger Anteil im Potential der starken Wechselwirkung. Die Tatsache, dass Quarks nicht isoliert existieren können deutet an, dass das Potential mit steigendem Abstand linear wächst, was letztendlich zu dem folgenden Potential führt:

$$V(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s(r) \cdot \hbar c}{r} + k \cdot r$$

Dabei steht  $r$  für den Radius zwischen den wechselwirkenden Teilchen,  $\alpha_s$  für die vom Radius abhängige Kopplungskonstante der starken Wechselwirkung und  $k$  ist der konstante Parameter, der das Confinement beschreibt.

### 3 FAIR - Forschungseinrichtung

Mit der FAIR-Forschungseinrichtung am GSI Helmholtzzentrum, werden eine Vielzahl von bisher nicht realisierbaren Experimenten ermöglicht, die neue Erkenntnisse im Bereich der Hadronenstruktur, Kernstruktur, Kernmaterie, Atomphysik, Plasma-physik und angewandte Forschung mit Ionenstrahlen sowie Antiprotonen versprechen [2]. Mit der geplanten Fertigstellung der FAIR-Anlage wird das GSI Helmholtzzentrum zu einer der wichtigsten physikalischen Forschungseinrichtungen weltweit. An dem insgesamt 1,2 Milliarden Euro teuren Aufbau beteiligen sich die 9 Staaten Deutschland, Finnland, Frankreich, Indien, Polen, Rumänien, Russland, Schweden und Slowenien [3].

Abbildung 3.1 zeigt die geplante FAIR-Anlage. Dabei ist in **blau** der bereits bestehende und in **rot** der im Bau befindliche Teil der Anlage mit seinen Experimenten PANDA, CBM (**C**ompressed **B**arionic **M**atter), Super-FRS (Super-Fragmentseparator) und FLAIR (**F**acility for **L**ow-energy **A**ntiproton and heavy-**I**on **R**esearch) dargestellt. Der bereits bestehende Beschleunigerring SIS 18 (**S**chwerionen **S**ynchrotron) wird in Zukunft dem größeren Doppelbeschleuniger SIS 100/300 als Injektor dienen.

Aus finanziellen Gründen wird zunächst nur eine Teilversion der geplanten Anlage gebaut und in Betrieb genommen. Zu dieser Version gehören der Protonen-Linearbeschleuniger (p-LINAC), das Antiprotonen-Target, der Kollektor-Ring (**col**lector-**r**ing, CR) und der Hochenergiespeicherring (HESR - **H**igh **E**nergy **S**torage **R**ing) an dem auch der PANDA-Detektor positioniert sein wird [4].

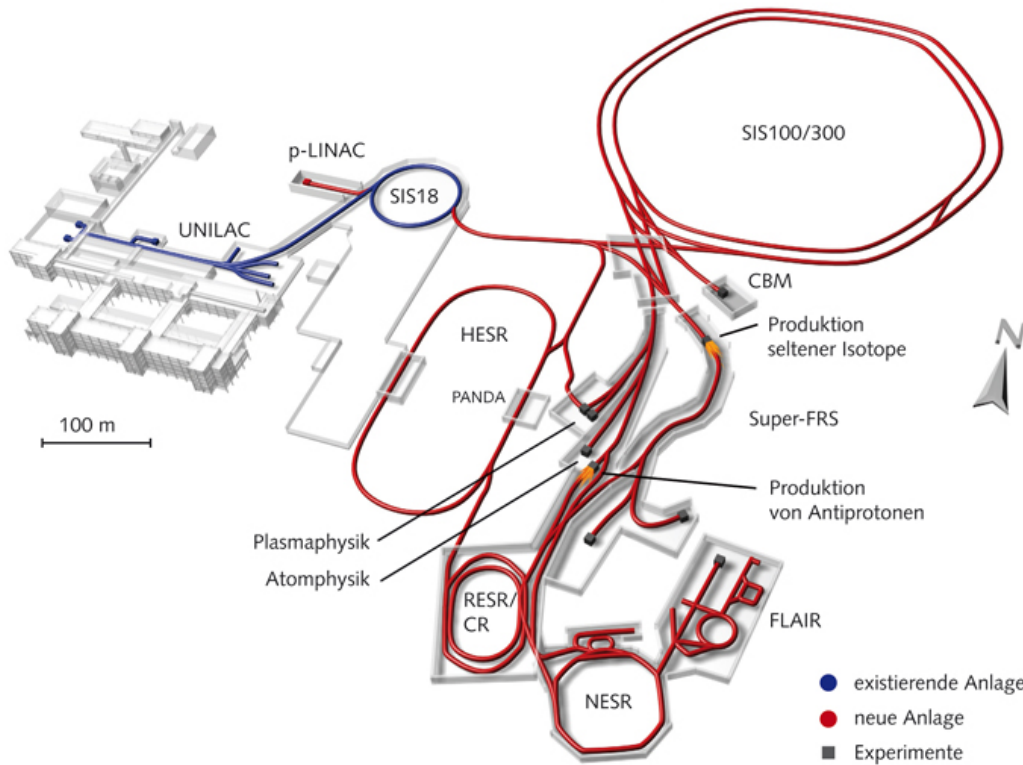


Figure 3.1: Forschungseinrichtung FAIR. Der rot dargestellte Bereich ist das im Bau befindliche Upgrade zu dem bereits vorhandenen Komplex, der blau hervorgehoben ist [5].

Für das PANDA-Experiment wird ein Antiprotonenstrahl benötigt. Dazu werden Protonen vom p-LINAC in den Beschleuniger SIS18 geschossen, auf etwa 2 GeV beschleunigt und anschließend in den SIS100 eingespeist, wo die Energie auf 29 GeV erhöht wird. Mit dieser Energie werden die Protonen in 50 ns kurzen Paketen (auch Bunches genannt) auf ein Nickeltarget geschossen. Die dabei entstehenden Antiprotonen werden gekühlt und im Kollektor-Ring gesammelt, von wo sie dann in den Hochenergiespeicherring weitergeleitet und auf die für das PANDA-Experiment benötigte Energie beschleunigt werden. Auf diese Weise werden alle 10 Sekunden (mit einem zukünftigen Upgrade auf alle 5 Sekunden)  $10^8$  Antiprotonen erzeugt. Dieser Zyklus wird insgesamt 100-mal wiederholt, bis der Hochenergiespeicherring  $10^{10}$  Antiprotonen angesammelt hat.



Besonderes Merkmal von PANDA ist die hohe Luminosität von  $L = 2 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , die für das Experiment zur Verfügung steht.

## 3.1 Das PANDA-Experiment

### 3.1.1 Physikalische Zielsetzung

Zielsetzung des PANDA-Experiments ist die Erforschung fundamentaler Fragestellungen der Quanten-Chromo-Dynamic (QCD). Dies wird neue Erkenntnisse über den theoretisch nur schwer zugänglichen, nicht-perturbativen Bereich der starken Wechselwirkung, welche Informationen der mikroskopischen Struktur der Materie liefert, eröffnen.

Nach aktuellem Wissensstand sind Quarks die elementaren Bausteine der Materie und wechselwirken miteinander durch den Austausch von Gluonen. Bisher wurden Quarks nur als Hadronenbausteine in Quark-Antiquark-Systemen (Mesonen) oder 3-Quark-Systemen (Baryonen) beobachtet. Die theoretischen Modelle erlauben jedoch auch derzeit noch unbeobachtete exotische Zustände wie Pentaquarks, Hybrids und Glueballs, die in den folgenden Abschnitten genauer betrachtet werden.

Um eben diese Zustände zu erforschen, werden Antiprotonen bei Impulsen von 1,5 - 15 GeV/c auf ein ruhendes Protonentarget (Wasserstoff) geschossen.

### 3.1.2 Charmonium-Spektroskopie

Ziel des PANDA-Experiments ist unter anderem die Erforschung von Charmoniumzuständen, also mesonischen Bindungszuständen aus Charm- und Anticharm-Quarks ( $c\bar{c}$ ), welche die leichtesten der schweren Quarks sind. Für kleine Quarkabstände ist das Charmoniumspektrum dem des Positroniums sehr ähnlich (siehe Abbildung 3.2), obwohl den jeweiligen Systemen unterschiedliche Wechselwirkungen zugrunde liegen. Während das Positronium ein Produkt der elektromagnetischen Wechselwirkung ist, ist das Charmonium eines der starken Wechselwirkung. Unterhalb der in Abbildung 3.2 rechts zu sehenden  $D\bar{D}$ -Schwelle sind die Zerfälle der  $c\bar{c}$ -Zustände durch die sogenannte OZI-Regel unterdrückt und folglich die Zerfallsbreiten vergleichsweise schmal. Dementsprechend sind die Charmoniumzustände unter-

halb der  $D\bar{D}$ -Schwelle gut bekannt, für die Zustände oberhalb dieser Schwelle jedoch gilt dies nicht. Ab dieser Grenze zerfallen die Charmoniumzustände in D-Mesonen und bedingen so eine große Zerfallsbreite. Besonders wegen den Diskrepanzen zwischen theoretischen Vorhersagen und experimentell gemessenen Zuständen sind weitere Untersuchungen in diesem Bereich nötig.

• Positronium                      • Charmonium

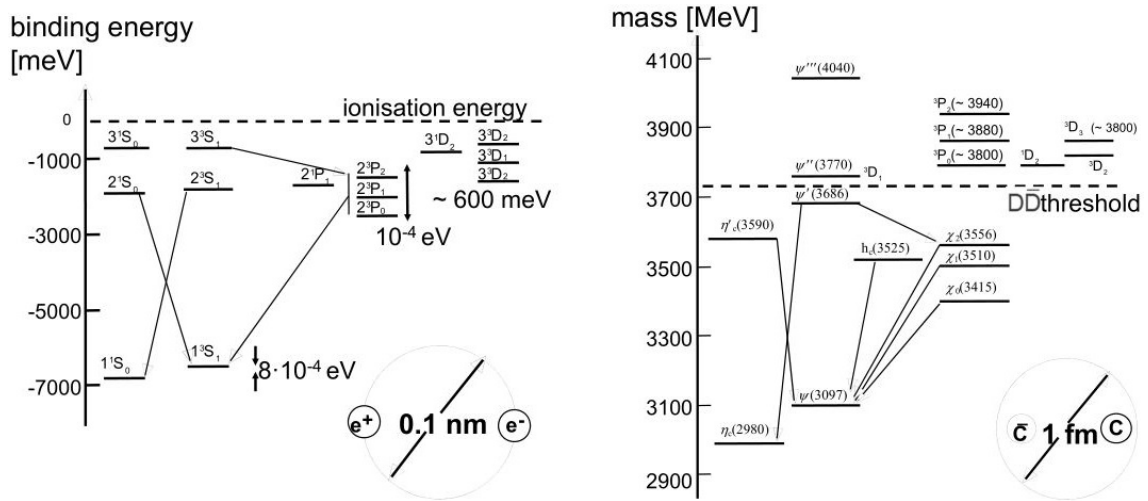


Figure 3.2: Vergleich von Charmonium-Spektrum mit Positronium-Spektrum [6].

### 3.1.3 Glueballs, Hybrids und Multiquarks

Wegen der Selbstwechselwirkung der Gluonen aufgrund ihrer Farbladung, erlaubt die Quantenchromodynamik neben den allgemein bekannten 2- und 3-Quarksystemen auch exotische Zustände, die das Confinement erfüllen. So ist zum einen die Existenz von reinen Gluonensystemen, sogenannten Glueballs, theoretisch möglich, zum anderen werden auch Hybridzustände vorhergesagt, bei denen an mesonische Quark-Antiquark-Systeme ein oder mehrere Gluonen gebunden sein können. Diese Zustände besitzen, anders als die bekannten hadronischen Zustände, exotische Quantenzahlen, verursacht durch zusätzliche Freiheitsgrade aufgrund der Gluonen. Eine

Mischung der Hybriden mit anderen mesonischen Zuständen ist durch die exotischen Quantenzahlen ausgeschlossen, was die Identifikation solcher Exoten erleichtert und damit ihre Erforschung zum Verständnis der starken Wechselwirkung erleichtert [7]. Ähnlich wie bei den Hybriden im Zusammenhang mit den Gluonen, gibt es bei den Hadronen theoretisch auch komplexere Systeme als die der Mesonen und Baryonen, sogenannte Multiquarkzustände, wie zum Beispiel das Pentaquark, welches aus 5 Quarks besteht. Die Existenz solcher Multiquarks ist zurzeit nur theoretisch vorhergesagt und soll in Zukunft experimentell untersucht werden.

#### **3.1.4 Hadronen in Kernmaterie**

Innerhalb der Kernmaterie weisen Mesonen andere Eigenschaften auf als im Vakuum. Bei leichten Mesonen wie Pionen und Kaonen wurden Änderungen der Lebensdauer, sowie eine Verschiebung ihrer Ruhemasse festgestellt. Die Erforschung solcher Gegebenheiten, deren Auftreten durch die Gluonen begründet wird, ist ein wichtiger Schritt zur Erweiterung der Theorie über die starke Wechselwirkung.

#### **3.1.5 Hyperkerne**

Ein weiteres Forschungsgebiet von PANDA ist die Untersuchung von Hyperkernen. Hyperkerne sind Kerne, in denen mindestens ein Hyperon vorhanden ist. Da Hyperonen nur eine kurze Lebensdauer haben, sind Experimente über die Hyperon-Hyperon-Wechselwirkung sehr schwierig. Es bietet sich daher an, die Experimente an Doppelhyperkernen durchzuführen, was bei PANDA mit hochauflösender  $\gamma$ -Spektroskopie auch gemacht wird.

### 3.2 Der PANDA-Detektor

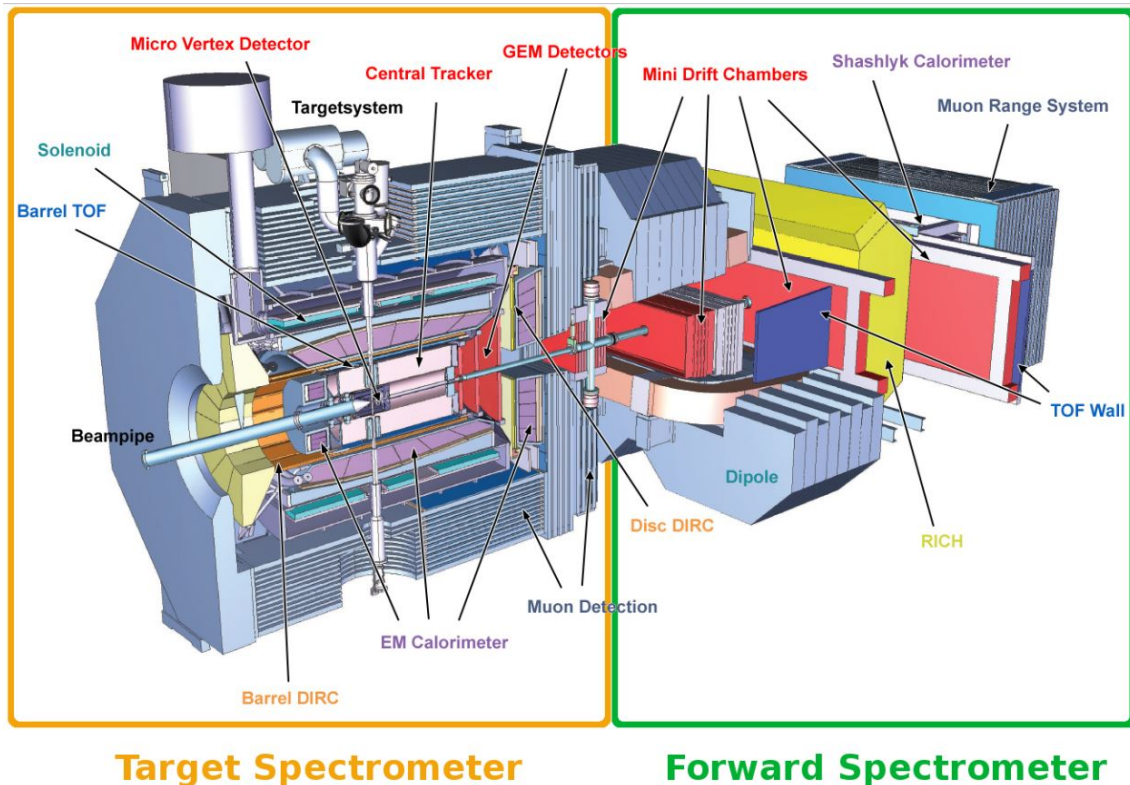


Figure 3.3: Schematische Darstellung des PANDA-Detektors. Der Antiprotonenstrahl läuft von links durch die Beampipe in den Detektor ein. Der Wechselwirkungspunkt befindet sich innerhalb des Targetspektrometers. Die Aufteilung in Target- und Forwärtsspektrometer sind durch farbige Rahmen gekennzeichnet. Die einzelnen Detektorparts werden in den nächsten Kapiteln beschrieben [8].

PANDA ist ein Fixed-Target-Experiment, folglich erhalten die bei der Kollision erzeugten Teilchen einen Lorentz-Boost in Vorwärtsrichtung, weswegen der Detektor asymmetrisch um den Interaktionspunkt aufgebaut ist. Der PANDA-Detektor kann, wie in seiner Gesamtdarstellung in Abbildung 3.3 veranschaulicht, in zwei Hauptkomponenten unterteilt werden. Das wären zum einen das Targetspektrometer, welches den Wechselwirkungspunkt umschließt und zum anderen das Vorwärtsspektrometer, welches den Vorwärtsbereich abdeckt. Das Targetspektrometer verfügt über einen Solenoidmagneten und verschiedenen Unterdetektoren, die zwiebelschalenartig um den Interaktionspunkt angeordnet sind.

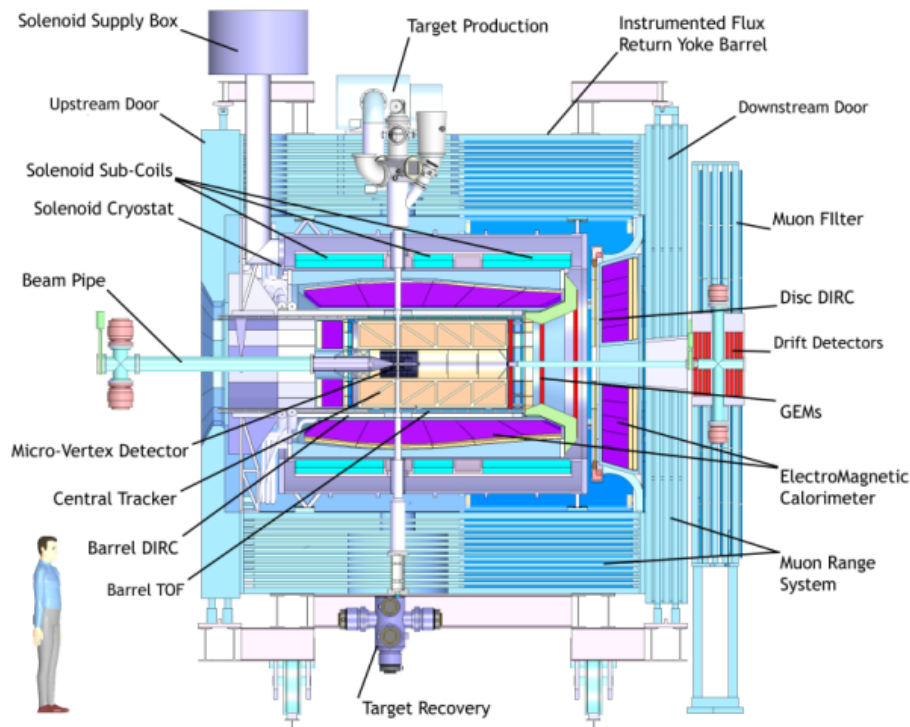


Figure 3.4: Schematische Darstellung des PANDA-Targetspektrometers [9].

Wie in Abbildung 3.4 gezeigt, ist das Targetspektrometer mit seinen Unterdetektoren wie folgt aufgebaut:

Im Zentrum befindet sich das Target, gefolgt vom zentralen Trackingsystem, bestehend aus dem Mikro-Vertex-Detektor (MVD) und einem Straw-Tube-Tracker (STT). Dem folgen Gas-Elektronen-Multiplier (GEM), zwei Cherenkov- und ein Time-of-Flight-Detektor. Die äußeren Parts des Targetspektrometers sind ein elektromagnetisches Kalorimeter und die Myonenkammern, wobei sich letztere im Rückführjoch des Magnetsystems befinden.

Mit dieser Anordnung werden Teilchen im Targetspektrometer erfasst, die einen Polarwinkel  $\theta$  von über  $10^\circ$  in horizontaler und über  $5^\circ$  in vertikaler Richtung zur Strahlachse besitzen.

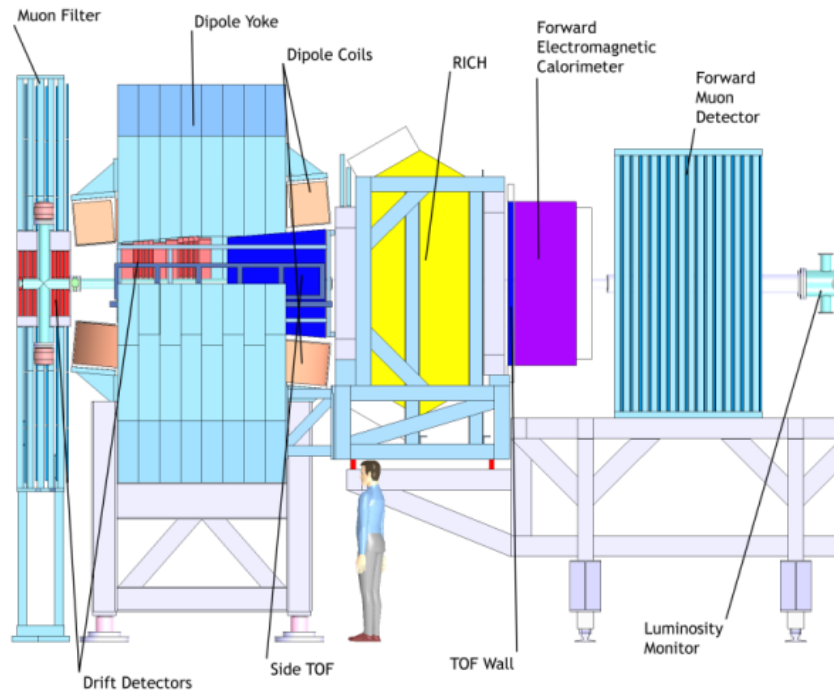


Figure 3.5: Schematische Darstellung des PANDA-Vorwärtsspektrometers [9].

Teilchen mit kleinerem Polarwinkel werden vom Vorwärtsspektrometer registriert, welches aus einem Dipolmagneten und verschiedenen Unterdetektoren besteht, welche in Abbildung 3.5 zu sehen sind. Die Unterdetektoren sind Straw-Tubes gefolgt von einem Cherenkovdetektor, einem Vorwärtskalorimeter und anschließend den Myonendetektoren.

Für das Target stehen zwei Optionen zur Verfügung, ein Wasserstoff-Pellet-Target und alternativ ein Cluster-Jet-Target. Die jeweiligen Unterdetektoren sowie die Targetsysteme werden in den folgenden Kapiteln 3.3 und 3.4 noch genauer beschrieben.

### 3.3 Targetspektrometer

Wie in Kapitel 3.2 bereits angesprochen, ist das Targetspektrometer der Part des PANDA-Detektors, der direkt um den Kollisionspunkt herum aufgebaut ist. Im Zentrum befindet sich eines von zwei möglichen Targets. Die Einrichtung, welche die Targets zum Interaktionspunkt führt, ist auf dem Rückführjoch des Magneten

angebracht und in Abbildung 3.6 gezeigt.

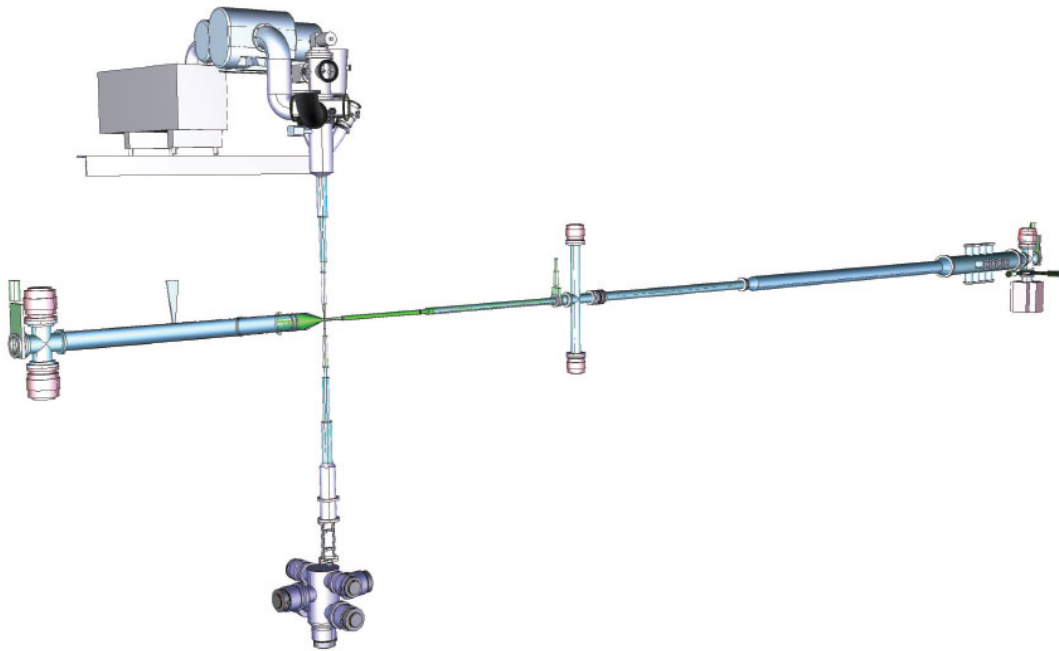


Figure 3.6: PANDA-Target [10].

### 3.3.1 Die Targets

#### Cluster-Jet-Target

Beim Cluster-Jet-Target wird 20 K bis 30 K kaltes Wasserstoffgas mit sehr hohem Druck von bis zu 20 bar durch eine Navaldüse gepresst [11]. Durch Van-der-Waals-Kräfte bildet sich ein homogener, dünner Strahl aus Wasserstoffclustern. Das ergibt gegenüber den Pellets den Vorteil, dass das Target zeitlich und räumlich homogene Monolagen von Wasserstoffatomen bildet, was in einer stabileren Luminosität resultiert [12].

#### Wasserstoff-Pellet-Target

Das Design des Wasserstoff-Pellet-Targets für PANDA basiert auf dem Target des WASA-Detektors am COSY-Teilchenbeschleuniger. Dabei handelt es sich um kleine gefrorene Wasserstoffkügelchen, die mit einer Geschwindigkeit von ca. 60 m/s den Wechselwirkungsbereich durchqueren. Dazu wird ein Wasserstoffstrahl mit hohem

Druck aus einer Düse in die Vakuumkammer geschossen. Durch den hohen Druck zerstäubt der Strahl zu kleinen Tröpfchen, die auf ihrem Weg zum Kollisionspunkt gefrieren und so Pellets mit einem Durchmesser von 25  $\mu\text{m}$  bis 40  $\mu\text{m}$  bilden. Die Abstände zwischen den Pellets betragen 0,5 bis 5 mm, sodass sie mit einer Rate von einigen kHz den Antiprotonenstrahl durchkreuzen und eine effektive Targetdicke von etwa  $10^{15}$  Atome/ $\text{cm}^2$  ergeben. Da die Pelletausdehnung so klein ist, lässt sich der Vertex sowohl in transversaler, als auch in longitudinaler Richtung gut rekonstruieren [13]. Durch die hohe Dichte der Pellets erhält man zwar eine hohe Luminosität, diese schwankt jedoch wegen des Pelletabstands periodisch. Dieses Problem gilt es noch zu lösen, ebenso ist noch die Strahldivergenz der Wasserstoffkügelchen zu verbessern.

### **3.3.2 Der Micro-Vertex-Detektor**

Der Mikro-Vertex-Detektor (MVD) ist mit einem Innenradius von 2,5 cm (minimaler Radius der innersten Sensorlage) die innerste Komponente der Subdetektoren. Er befindet sich unmittelbar um den Interaktionspunkt und ist in zwei Komponenten unterteilt, dem sogenannten Barrel- (die Namensgebung begründet sich mit der zylindrischen Form) und dem Vorwärts-Part. Der MVD ist ein Spurdetektor, der für die hochauflösende Detektion von sekundären Vertices von D-Mesonen- und Hyperonenzerfällen optimiert ist [12].



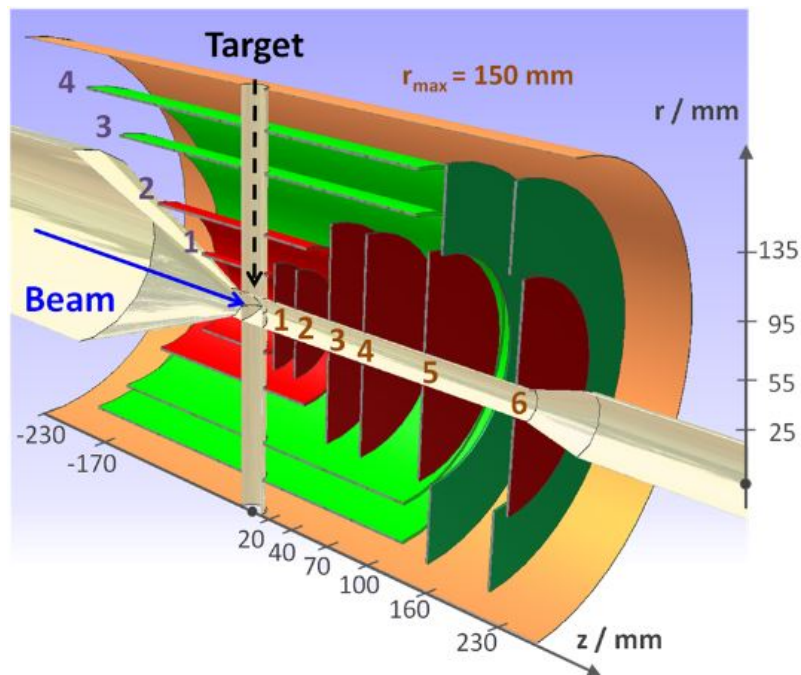


Figure 3.7: Schematische Darstellung des Mikro-Vertex-Detektors [13].

Abbildung 3.7 zeigt, dass das Barrel aus insgesamt vier Detektorlagen besteht, die radial um die Strahlachse angeordnet sind, wobei die inneren beiden Lagen aus Silizium-Pixeldetektoren, die äußeren beiden aus doppelseitigen Silizium-Streifen-Detektoren aufgebaut sind. Den Vorwärtspart bilden sechs senkrecht zur Strahlachse angeordnete Vorwärtsscheiben, von denen die inneren vier ebenfalls aus reinen Pixeldetektoren bestehen, während die äußeren beiden zusätzlich noch doppelseitige Streifensensoren enthalten. Die Pixelgröße liegt bei  $100\ \mu\text{m} \cdot 100\ \mu\text{m}$ , was eine sehr hohe und zweidimensionale räumliche Auflösung gewährleistet, jedoch den Nachteil hat, dass sehr viele Auslesekanäle benötigt werden (insgesamt  $10,3 \cdot 10^6$  Auslesekanäle für den Pixel-Anteil des Barrels). Aus diesem Grund werden die Pixelsensoren auch nur bei den inneren Detektorlagen verwendet, wo der Teilchenfluss am größten ist und der Vorteil der besseren Ortsbestimmung den Nachteil der zahlreichen Kanäle überwiegt [13].

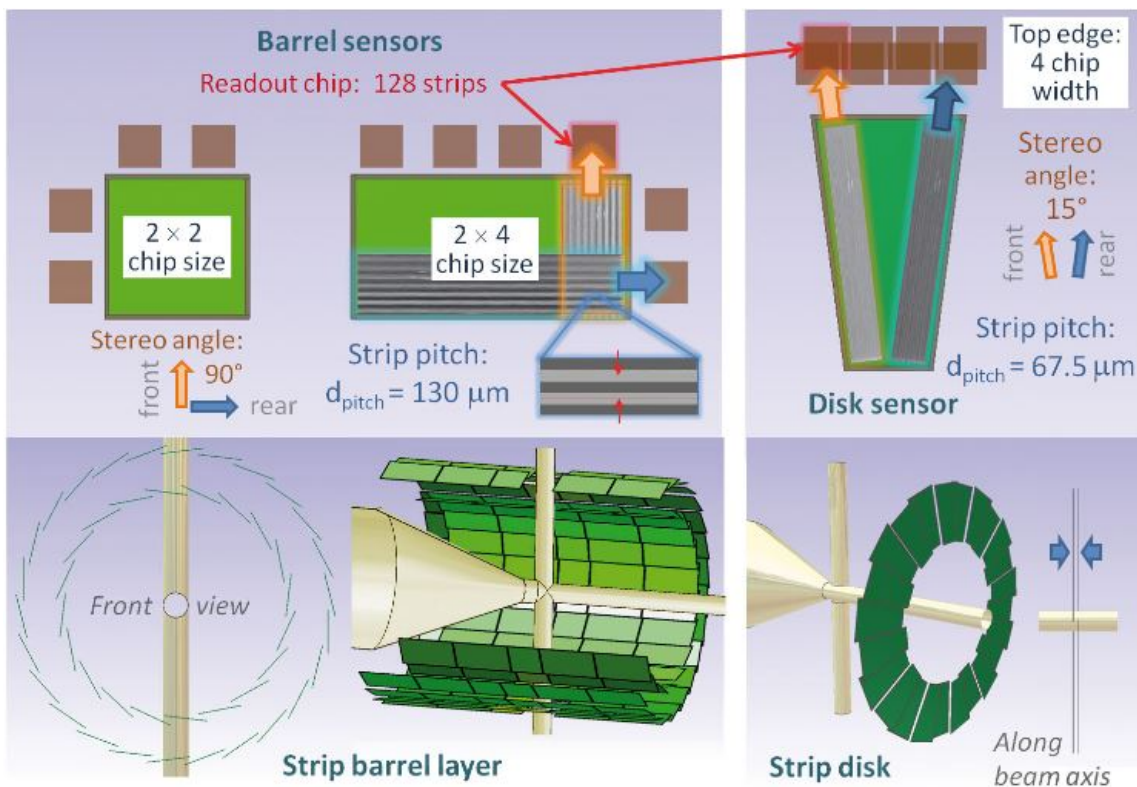


Figure 3.8: Darstellung der unterschiedlichen Streifendetektoren (Barrel-Sensoren und Disk-Sensoren), die beim MVD eingesetzt werden [13].

Für die Streifendetektoren werden zwei unterschiedliche Typen benutzt, die jeweils in Abbildung 3.8 oben veranschaulicht werden. In dem Barrel-Part werden rechteckige Streifendetektoren eingesetzt, die einen Stereowinkel (Winkel zwischen den Streifen der Vorderseite zu den Streifen der Rückseite, siehe Abbildung 3.8) von  $90^\circ$  und einen Streifenabstand, auch Streifenpitch genannt, von  $65\ \mu\text{m}$  haben. Es wird aber nur jeder zweite Streifen ausgelesen, sodass der sogenannte Auslesepitch  $130\ \mu\text{m}$  beträgt. Die Vorwärtsscheiben wurden mit trapezförmigen Sensoren ausgestattet, welche einen Stereowinkel von  $15^\circ$  haben. Die dadurch verursachte schlechtere Auflösung soll durch einen kleineren Streifenpitch von  $45\ \mu\text{m}$  bzw. einem Auslesepitch von  $90\ \mu\text{m}$  wieder ausgeglichen werden. Zu den Auslesekänen der Pixelsensoren kommen so noch einmal knapp 200.000 Kanäle durch die Streifendetektoren hinzu [13], [8].

### 3.3.3 Zentrales Tracking

Der zentrale Tracker ist ebenfalls ein Spurdetektor und ist nach dem MVD die nächste Detektorlage (in radialer Richtung). Er besteht aus zahlreichen Straw Tube Trackern (STT); das sind gasgefüllte Zylinderstangen aus aluminisierter Mylar-Folie, durch die jeweils ein Kathodendraht entlang der Achse gespannt ist. Abbildung 3.9 *links* zeigt ein Foto der Straw Tube Tracker und ihre Komponenten und *rechts* ein CAD-Bild vom Querschnitt des Central Trackers. Die Stangen haben eine Länge von 150 cm und einen Durchmesser von 1 cm. Das Gas mit dem die Straw Tube Tracker befüllt sind, ist ein Argon-CO<sub>2</sub>-Gemisch (10% Argon, 90% CO<sub>2</sub>) und hat einen Überdruck von 1 bar, was den Zylinderstangen zusätzliche Stabilität verleiht, sodass keine zusätzlichen Rahmenstruktur benötigt wird.

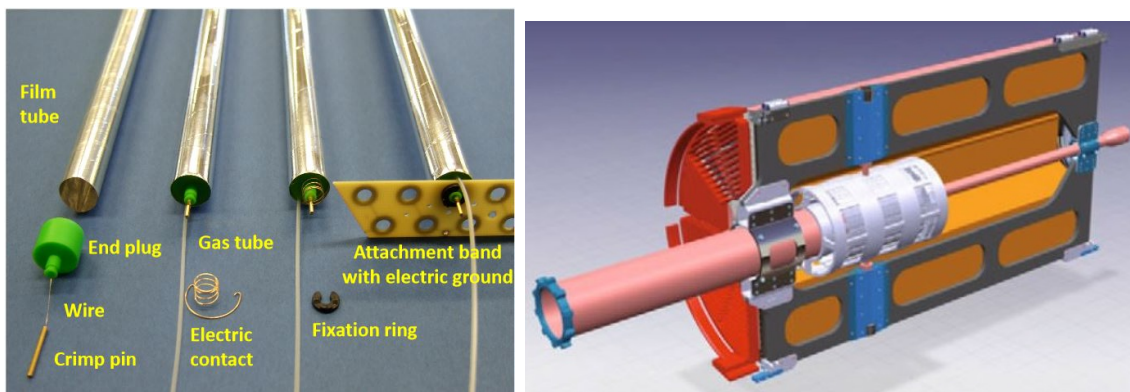


Figure 3.9: Links: Darstellung einzelner Straw Tube Tracker und deren Bestandteile; rechts: Schematische Darstellung des zentralen Trackers [14].

Üblicherweise liegt an den Drähten eine Spannung von mehreren kV an. Ein geladenes Teilchen, das die Straw Tube Tracker durchläuft, ionisiert das Gas, sodass die Elektronen/Ionen jeweils zu den Drähten/Wänden abfließen und dort als Spannungsimpuls registriert werden. Durch die hohe anliegende Spannung lösen auch vereinzelte Elektronen lawinenartige Kettenreaktionen aus und können dadurch detektiert werden. Auf Grund des kleinen Durchmessers der Stangen haben die Ladungen nur sehr kurze Driftzeiten und werden zeitnah registriert. Insgesamt werden 24 Lagen der Straw Tube Tracker zylindrisch um den Micro-Vertex-Detektor

angebracht, wobei der innere Radius 16 cm und der äußere 41 cm betragen wird. Die mittleren acht Lagen der Stangen sind mit einem Winkel von  $\pm 2,9$  gegenüber der Strahlachse angeordnet (siehe Abbildung 3.10), was eine longitudinale Rekonstruktion der Teilchenspür ermöglicht. Mit diesen Parametern wird der Straw Tube Tracker über eine longitudinale Auflösung von  $\sigma_z = 3 \text{ mm}$  und eine transversale Auflösung von  $\sigma_{xy} = 150 \mu\text{m}$  verfügen [14].

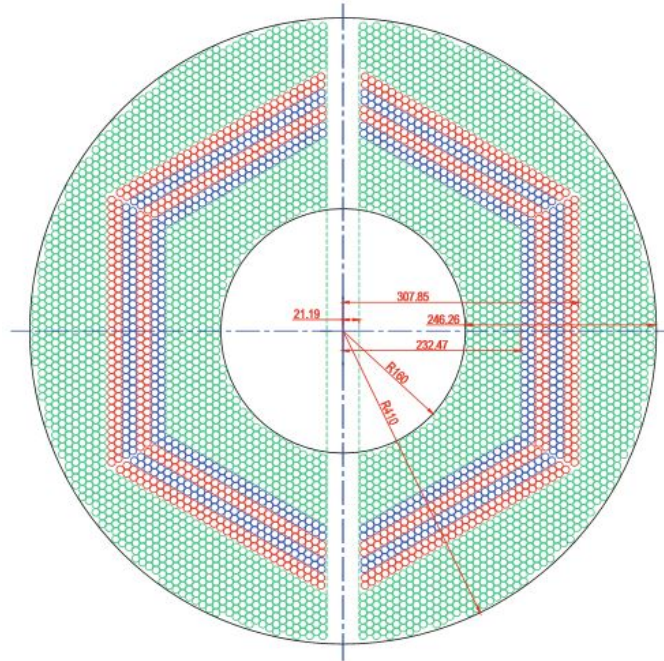


Figure 3.10: Layout der Straw Tube Tracker in xy-Ansicht. Die grün markierten STTs sind parallel zur Strahlachse angeordnet, die blau/rot markierten sind relativ zur Strahlachse um  $+2,9^\circ/-2,9^\circ$  verdreht angeordnet [14].

### 3.3.4 DIRC-Detektor

Neben der Spur soll auch die Geschwindigkeit der Teilchen gemessen werden, wodurch deren Identifikation ermöglicht wird. Die Geschwindigkeit wird mit einem Cherenkov-Detektor, dem sogenannten DIRC-Detektor (**D**etection of **I**nternally **R**elected **C**herenkov Light) erfasst. Er kann in zwei Teile untergliedert werden; in den Barrel-DIRC, der zylinderförmig um den zentralen Tracker herum gebaut ist und dem Endcap-Disc-DIRC, einer Scheibe aus Quarzglas in Vorwärtsrichtung. Um die

Partikelgeschwindigkeit zu messen, macht sich der DIRC-Detektor den Cherenkov-Effekt zu Nutze. Sobald ein geladenes Teilchen in einem Medium schneller fliegt, als das Licht in diesem Medium, werden von dem jeweiligen Teilchen Photonen, unter einem für die Geschwindigkeit charakteristischem Polarwinkel  $\theta_C$ , abgestrahlt. Zwischen dem Polarwinkel und der Teilchengeschwindigkeit  $\beta$ , sowie dem Brechungsindex  $n$  besteht folgender Zusammenhang:

$$\theta_C = \arccos \frac{1}{n\beta}$$

Aus dieser Relation kann die Geschwindigkeit der Teilchen bestimmt werden, was kombiniert mit der Impulsinformation des Trackingsystems die Masse des jeweiligen Teilchens ergibt.

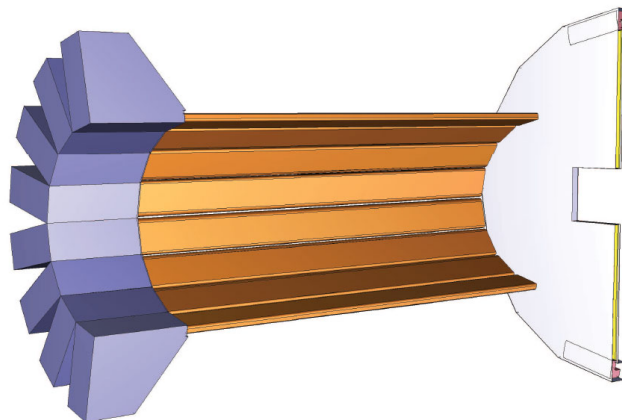


Figure 3.11: Schematische Darstellung des DIRC-Detektors [15].

In Abbildung 3.11 ist der schematische Aufbau des DIRC-Detektors zu sehen. Als Radiatormaterial wird Quarzglas verwendet. Das entstehende Cherenkov-Licht wird über Totalreflexion aus dem Detektor heraus zu Photomultipliern geleitet, wo es ausgewertet wird [4], [15].

### 3.3.5 Elektromagnetisches Kalorimeter

Nach dem DIRC-Detektor ist ein elektromagnetisches Kalorimeter (EMC) zylinderförmig um die anderen Subdetektoren herum gebaut. Es verfügt zusätzlich über

zwei Endkappen, eine in Vorwärtsrichtung, eine in Rückwärtsrichtung. Eine modellhafte Darstellung des Kalorimeters ist in Abbildung 3.12 zu sehen. Das EMC soll geladene Teilchen und Photonen mit hoher Energieauflösung messen. Als Detektormaterial werden Szintillationskristalle aus Bleiwolframat ( $\text{PbWO}_4$ ) verwendet, da dieses Material eine kurze Strahlungslänge hat. In dem zylinderförmigen Part wurden insgesamt 11360 Kristalle eingesetzt, in der Vorwärts-Endkappe sind es 3600 und in der Rückwärts-Endkappe 592. Die Kristalle haben eine Länge von etwa 22 cm. Die Auslese wird mit Hilfe sogenannter large area avalanche photodiodes (LAAPDs) durchgeführt, die eine hohe intrinsische Verstärkung liefern. Um die Lichtausbeute der Kristalle noch zu verbessern, wird das gesamte EMC auf eine Temperatur von  $-25\text{ }^\circ\text{C}$  herab gekühlt [16].

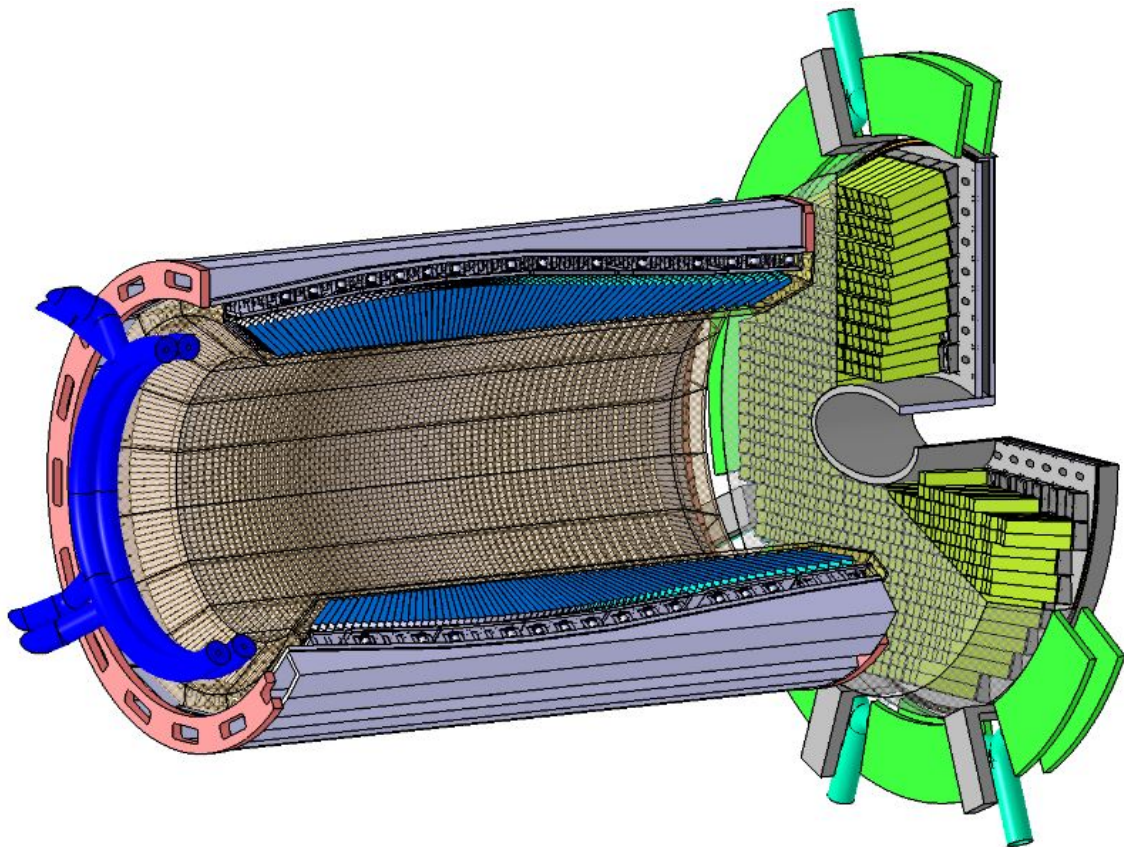


Figure 3.12: Darstellung des Barrel- und des Vorwärtskalorimeters [16].

### 3.3.6 Myonen-Detektor

Bei der Proton-Antiproton-Annihilation entstehen zahlreiche geladene Pionen, die in den meisten Fällen in Myonen zerfallen. Diese müssen von den bei der Primärreaktion entstehenden Myonen getrennt werden. Dazu ist das Rückführjoch des Solenoidmagneten in insgesamt 13 Segmente unterteilt, die mit Spurkammern durchsetzt sind. Die Segmentschichten des Eisenjochs fungieren dabei als Absorber für den Untergrund, die stark durchdringenden Myonen können jedoch passieren und in den Driftkammern registriert werden. Durch diese sandwichartige Anordnung von aktiven und passiven Detektorschichten kann der differentielle Energieverlust der Myonen bestimmt werden, so dass kombiniert mit der Spurrekonstruktion die primären und sekundären Myonen getrennt werden können. Anordnung und Segmentierung des Eisenjochs für die Myonenkammern ist in Abbildung 3.13 gezeigt. Die innere Segmentlage des Eisenjochs weist, genau wie die äußere, eine Dicke von 6 cm auf, während die mittleren 11 Lagen eine Dicke von 3 cm haben; die Lücken zwischen den Eisenschichten, in denen die Detektoren sitzen, betragen jeweils 3 cm [17].

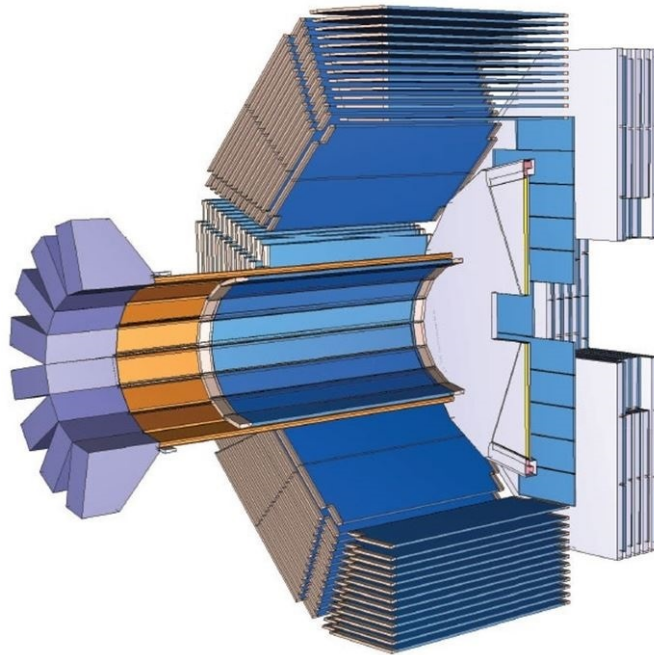


Figure 3.13: Myonendetektor, der um den DIRC-Detektor herumgebaut ist [10].

### 3.4 Vorwärtsspektrometer

Wie bereits in Kapitel 3.2 erwähnt, können Teilchen mit einem Polarwinkel kleiner als  $5^\circ$  nur im Vorwärtsspektrometer nachgewiesen werden. Die Detektoren innerhalb des Vorwärtsspektrometers müssen besonders hohe Teilchenflussdichten von  $10^4 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  verarbeiten und den dabei entstehenden Strahlenschäden widerstehen können. Die einzelnen Komponenten des Vorwärtsspektrometers werden im Folgenden genauer erläutert.

#### 3.4.1 Vorwärtstracker

Als Spurdetektoren werden im Vorwärtsspektrometer Drahtkammern, bestehend aus Straw Tube Trackern, verwendet, die in sechs Lagen angeordnet werden. Davon befinden sich die inneren und äußeren zwei Lagen vor und hinter dem Dipolmagneten, die mittleren beiden Lagen, zur Detektion niederenergetischer Teilchen, innerhalb der Öffnung des Magneten. Die erwartete Impulsauflösung liegt bei 0,2% für  $3 \text{ GeV}/c$  Protonen [4].

#### 3.4.2 RICH-Detektor

Zur Teilchenidentifikation wird im Vorwärtsspektrometer ein Dual-Radiator RICH-Detektor (Ring Imaging Cherenkov Detektor) eingesetzt. Es werden zwei verschiedene Detektormaterialien (Silikat-Aerogel und  $\text{C}_4\text{F}_{10}$ -Gas) verwendet, um mit Hilfe der unterschiedlichen Brechungsindizes eine Unterscheidung von Pion-Kaon und Kaon-Proton innerhalb eines breiten Impulsbereiches von  $2\text{-}15 \text{ GeV}/c$  zu ermöglichen. Eine Anordnung von leichten Spiegeln fokussiert das Cherenkov-Licht auf ein Array von Photomultipliern, die sich außerhalb des aktiven Volumens befinden [4].

#### 3.4.3 Time of Flight

Zusätzlich zu den Cherenkov-Detektoren werden zur Teilchenidentifikation noch Flugzeitdetektoren (Time of Flight, TOF) eingesetzt. Eine Schicht aus schnellen Plastikszintillatoren, die sich  $7 \text{ m}$  hinter dem Target befinden, wird als Stopp-Signal



für die Flugzeitmessung dienen. Es wird eine Zeitauflösung von  $\sigma = 50$  ps erwartet, sodass die Unterscheidung von Pion-Kaon und Kaon-Proton bei Impulsen von  $2,8 \text{ GeV}/c$  bzw.  $4,7 \text{ GeV}/c$  möglich sein wird [4].

#### **3.4.4 Elektromagnetisches Kalorimeter**

Für die Detektion der Photonen und Elektronen wird ein hochauflösendes Schaschlik-Kalorimeter verwendet, welches abwechselnd aus aktivem (Szintillationsschicht) und passivem (Bleischicht) Detektormaterial besteht. Die Auslese wird mit an Photomultipliern gekoppelten Lichtleitern realisiert [4].

#### **3.4.5 Myonen-Detektor**

Die letzte Detektorkomponente des Vorwärtsspektrometers ist der Myonendetektor, der aus Driftkammern besteht. Dadurch ist es möglich, Pionen von Myonen zu unterscheiden und zusätzlich kann die Energie von Neutronen und Antineutronen bestimmt werden [4].



## 4 Detektorgrundlagen

### 4.1 Nachweis geladener Teilchen

Hochenergetische Teilchen können beim Durchgang durch Materie auf verschiedene Arten mit dem Medium wechselwirken und aufgrund dessen Energie verlieren. Je nach Teilchenart, Teilchenenergie und Materie sind jeweils andere Energieverlustmechanismen vorrangig. So tritt der Energieverlust durch starke Wechselwirkung mit einem Kern nur bei Hadronen auf, während geladene Teilchen hauptsächlich durch die elektromagnetische Wechselwirkung mit dem Target interagieren. Der Energieverlust findet bei den geladenen Teilchen vor allem durch inelastische Stöße mit den Elektronen der Atomhülle und durch elastische Streuung am geladenen Atomkern (Rutherford-Streuung) statt. Weniger dominant, aber auch vorhanden, sind Cherenkov-Strahlung und Bremsstrahlung. Der mittlere Energieverlust pro Wegstrecke wird für einen großen Energiebereich durch die Bethe-Bloch-Formel quantenmechanisch beschrieben [18].

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_A r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[ \ln \left( \frac{2m_e \gamma^2 v^2 W_{max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right]$$

mit:

- $N_A$  : Avogadrokonstante
- $r_e$  : klassischer Elektronenradius =  $2,817 \cdot 10^{-15}$  m
- $m_e$  : Elektronenmasse
- $I$  : mittleres Anregungspotential
- $Z$  : mittlere Kernladungszahl des Absorbermaterials
- $A$  : mittlere Massenzahl des Absorbermaterials
- $\rho$  : mittlere Dichte des Absorbermaterials
- $z$  : Ladung des durchdringenden Teilchens
- $c$  : Lichtgeschwindigkeit
- $\beta$  : auf  $c$  normierte Geschwindigkeit  $v/c$  des durchdringenden Teilchens

- $\gamma$  :  $\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$  des durchdringenden Teilchens  
 $\delta$  : Dichtekorrektur  
 $C$  : Hüllenkorrektur  
 $W_{max}$  : maximaler Energieübertrag einer Kollision

Die Bethe-Bloch-Formel liefert lediglich einen Mittelwert für den statistischen Energieverlust der Teilchen. Die Energieverlustverteilung hängt von der Dicke der Absorber ab. Für dicke Absorber hat die Verteilung die Form einer Gaußkurve. Für dünne Absorber, die im Bereich der Tracking-Detektoren eine wesentlich größere Rolle spielen, hat die Energieverlustverteilung die Form einer Landau-Verteilung. Die Abweichungen von einer Gaußverteilung werden durch sogenannte  $\delta$ -Elektronen verursacht. Sie treten in seltenen Fällen auf, wenn ein hoher Energieübertrag auf ein Hüllenelektron stattfindet und dieses als  $\delta$ -Elektron genügend Energie besitzt, um selbst ionisierend zu wirken (mehr dazu in Kapitel 4.7).

In Abbildung 4.1 ist für verschiedene geladen Teilchen der Energieverlust pro Strecke gegen die kinetische Energie bei unterschiedlichen Absorbermaterialien aufgetragen. In dieser Visualisierung der Bethe-Bloch-Formel ist zu sehen, dass alle Teilchen, unabhängig von Masse oder Absorbermaterial, ein Ionisationsminium bei einem relativen Impuls von etwa  $\beta\gamma = 3$  haben. Teilchen mit eben diesem Impuls werden minimal ionisierende Partikel (minimal ionizing particles, MIPs) genannt. Da das Ionisationsminimum von unterschiedlich schweren Teilchen nur mit jeweils spezifischen Impulsen erreicht wird, kann man die Energieverlustmessung zur Teilchenidentifikation benutzen.

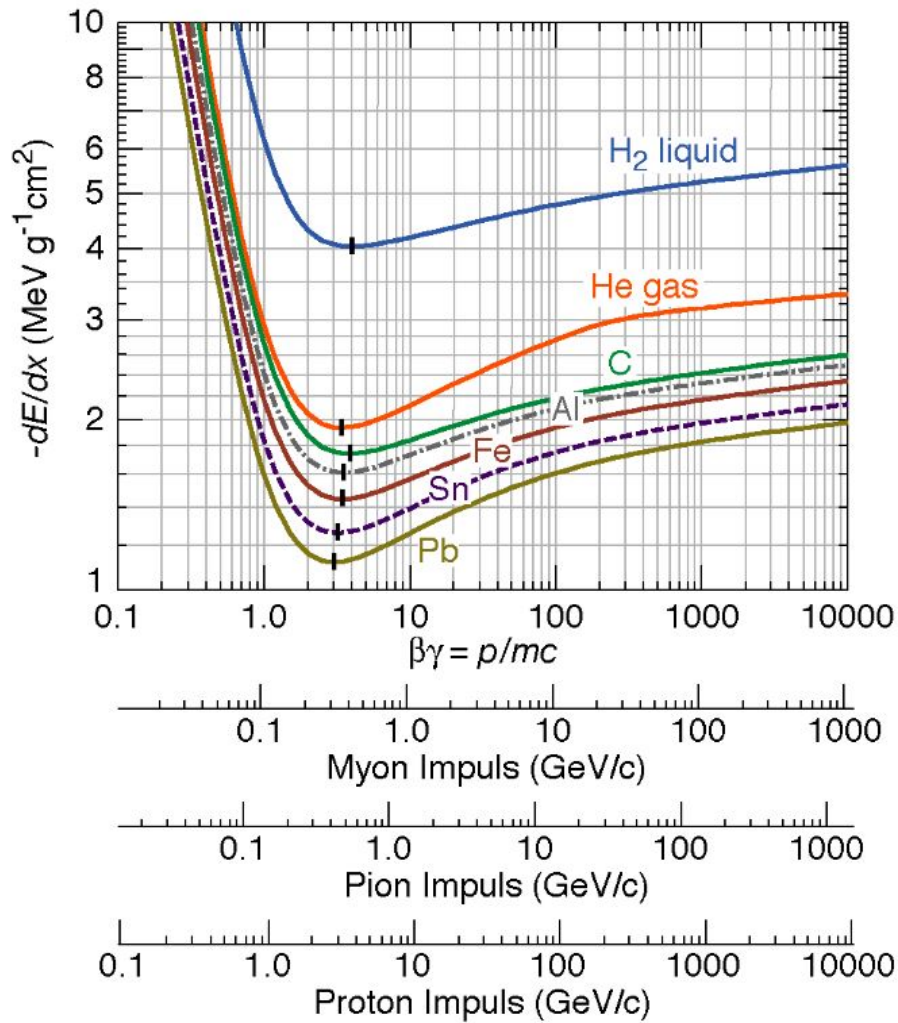


Figure 4.1: Energieverlust für verschiedene geladene Teilchen (Myonen, Pionen und Protonen) in unterschiedlichen Materialien. Alle Teilchen haben in jedem Material bei einem relativen Impuls von etwa  $\gamma\beta = 3$  einen minimalen Energieverlust und gelten dann als minimal ionisierende Partikel (MIPs) [19].

## 4.2 Silizium

Silizium ist ein Element der vierten Hauptgruppe des Periodensystems. Entsprechend hat jedes Atom vier Valenzelektronen, was der Grund dafür ist, dass Silizium eine Kristallstruktur bildet, indem jedes Siliziumatom, wie in Abbildung 4.2 zu sehen, mit seinen vier nächsten Nachbaratomen je eine kovalente Bindung eingeht.

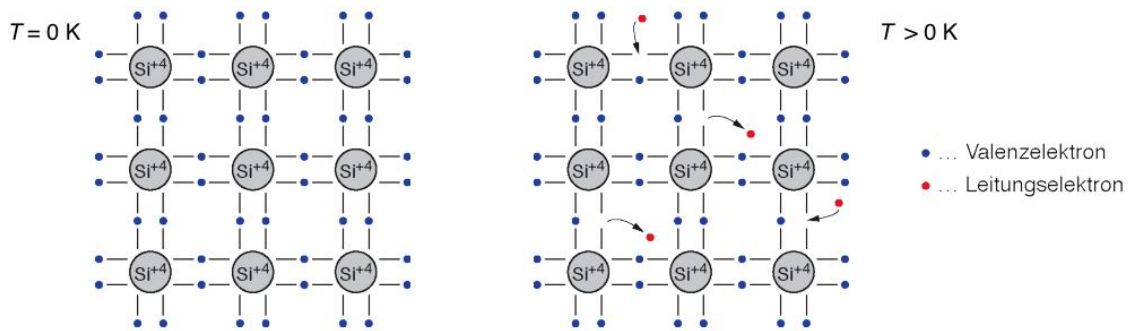


Figure 4.2: Silizium Gitterstruktur: bei 0 K (links) sind alle Elektronen fest gebunden; bei höheren Temperaturen (rechts) werden einige der Bindungen durch thermische Gitterschwingungen aufgebrochen und die Elektronen führen zu elektrischer Leitfähigkeit des Kristalls [19].

In Festkörpern formen sich die einzelnen diskreten Energieniveaus der Atome zu Energiebändern. Das letzte noch besetzte Band wird Valenzband, das darüber liegende unbesetzte wird Leitungsband genannt. Bei Isolatoren und Halbleitern wie Silizium sind diese Bänder durch eine Bandlücke (band gap) voneinander getrennt. Wie Abbildung 4.3 zeigt, können bei Metallen diese Bänder überlappen. In Halbleitern befinden sich bei niedrigen Temperaturen alle Elektronen im Valenzband und das Material wirkt als Isolator. Bei höheren Temperaturen jedoch können durch thermische Anregungen Elektronen in das Leitungsband gehoben werden. Dort können sie, genau wie die zurückbleibenden Elektronenlöcher im Valenzband, als freie Ladungsträger angesehen werden und den Stromtransport ermöglichen [19].

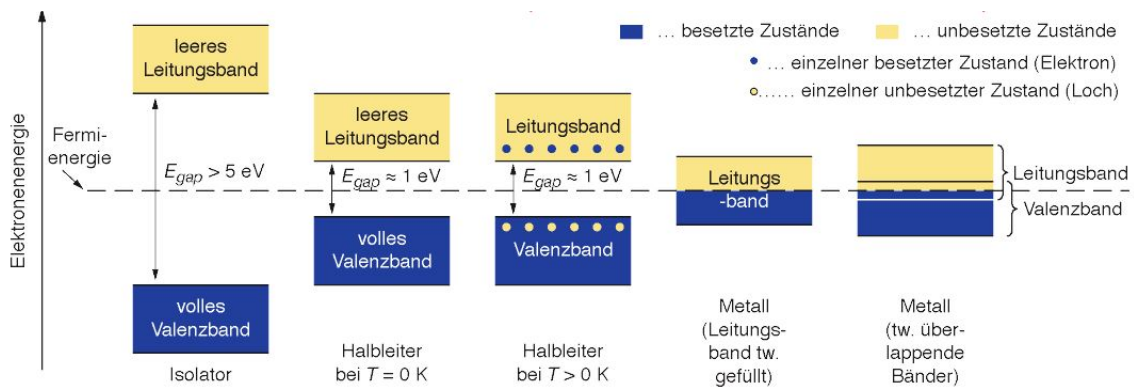


Figure 4.3: Bandstruktur für Isolatoren, Halbleiter und Metalle [19].

Da die Elektronen nicht nur thermisch vom Valenzband ins Leitungsband angeregt werden können, sondern auch beim Durchgang eines ionisierenden Teilchens durch das Material, ist es möglich (Silizium-) Halbleiterkristalle als Teilchendetektoren zu benutzen. Ein Detektor sollte dabei über ein möglichst gutes Signal-Rauschverhältnis verfügen, also einerseits eine kleine Bandlücke aufweisen, um mit niedriger Ionisationsenergie eine große Anzahl an Ladungsträgern zu erzeugen, andererseits eine große Bandlücke, um möglichst wenig Rauschen auf Grund thermischer Anregungen zu erzeugen. Eine optimale Bandlücke wären etwa 6 eV. Bei diesem Bandabstand wäre eine thermische Erzeugung von Ladungsträgern bei Raumtemperatur sehr unwahrscheinlich, gleichzeitig ist die Lücke aber klein genug, dass durch ionisierende Teilchen zahlreiche Elektron-Lochpaare entstehen und ein deutliches Signal zeigen. Diamant hat in etwa eine solche Bandlücke, ist jedoch wegen der hohen Preise für den Bau größerer Detektoren ungeeignet. Silizium weist in natürlicher Form eine Bandlücke von etwa 3,6 eV auf, was in Anbetracht der wesentlich geringeren Kosten eine gute Alternative darstellt.

### 4.3 Dotierung

Damit Silizium als Detektormaterial eingesetzt werden kann, müssen die Eigenschaften des Materials verändert werden. Dies ist mit Hilfe von Dotierungen möglich. Dabei werden einzelne Atome des Halbleiters durch Fremdatome ersetzt, was zusätz-

liche Energieniveaus erzeugt. Das Material kann entweder n-dotiert, oder p-dotiert werden.

Bei der n-Dotierung wird ein 5-wertiges Atom, wie zum Beispiel Phosphor, gezeigt in Abbildung 4.4 *links*, in das Kristallgitter eingebaut. Dadurch ist ein zusätzliches Valenzelektron vorhanden, das nur schwach gebunden ist und somit leicht in das Leitungsband angehoben werden kann. Das Fremdatom wird Donator genannt und erzeugt ein zusätzliches Energieniveau knapp unterhalb der Leitungsbandkante, wodurch das Fermi-niveau hin zum Leitungsband verschoben wird. Eine Abbildung des Bändermodells ist in Bild 4.5 zu sehen.

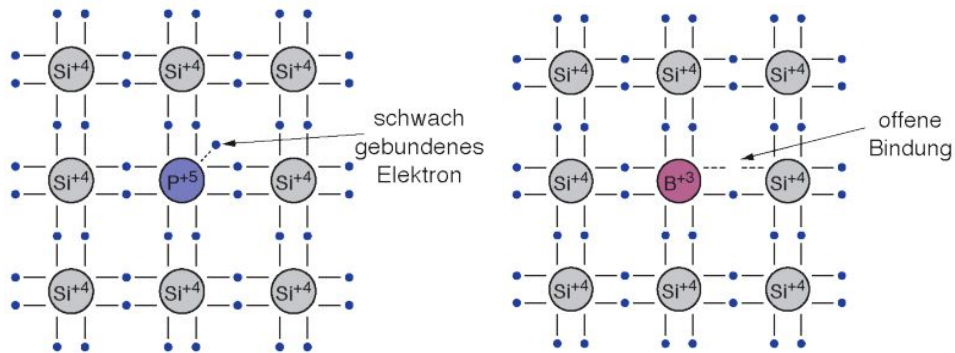


Figure 4.4: Links: n-Dotierung mit Phosphor; rechts: p-Dotierung mit Bor [19].

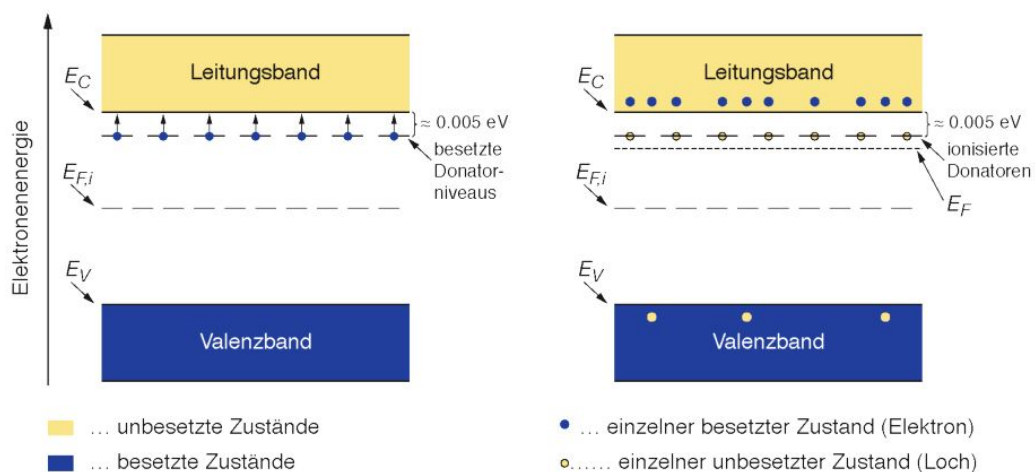


Figure 4.5: Energieniveaus von Silizium im Bändermodell nach n-Dotierung mit Phosphor [19].



Bei der p-Dotierung wird ein 3-wertiges Atom, wie zum Beispiel Bor, siehe Abbildung 4.4 rechts, in das Kristallgitter eingebaut. In diesem Fall fehlt ein Elektron, um eine kovalente Bindung zu erzeugen. In diese offene Bindung können andere Elektronen sehr leicht hineingezogen werden. Das Fremdatom wird Akzeptor genannt und erzeugt ein zusätzliches Energieniveau knapp oberhalb der Valenzbandkante (siehe Abbildung 4.6), wodurch das Fermi-niveau hin zum Valenzband verschoben wird.

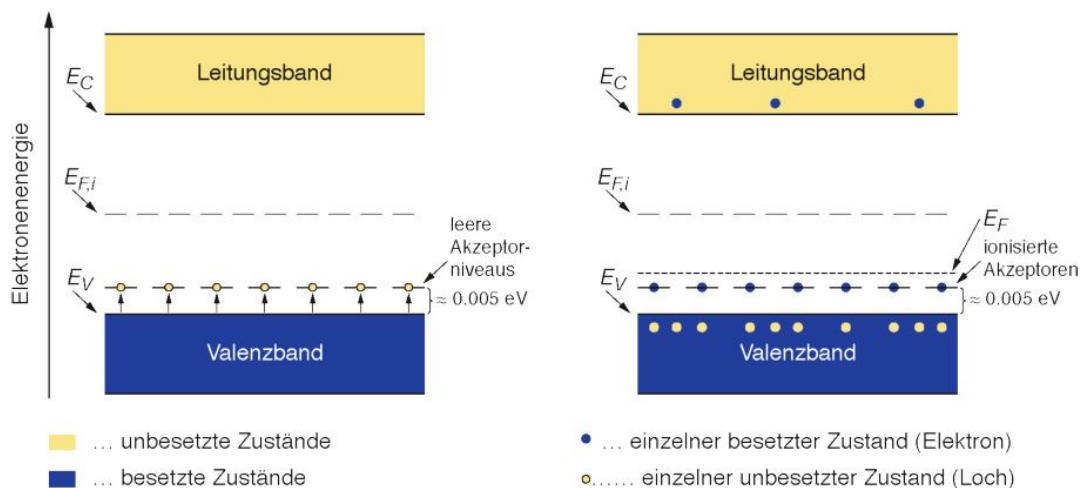


Figure 4.6: Energieniveaus von Silizium im Bändermodell nach p-Dotierung mit Bor [19].

Typische Dotierungskonzentrationen liegen etwa bei  $10^{12}$  Atome/cm<sup>3</sup>, wobei Silizium  $10^{22}$  Atome/cm<sup>3</sup> aufweist. Die Dotierung wird meist mittels Diffusion durchgeführt. Dabei werden die Ionen auf das Material aufgebracht und wirken zunächst noch wie Gitterstörungen, erst das Erhitzen (Tempern) auf ca. 600 °C sorgt dafür, dass die Fremdatome in das Kristallgitter eingegliedert werden.

#### 4.4 PN-Übergang

Betrachtet man die unterschiedlich dotierten Halbleiter einzeln, so haben sie zwar unterschiedliche Ladungsträgerdichten (bzw. unterschiedliche Ladungsträgerarten) und verschiedene Fermi-niveaus, sind aber jeweils neutral geladen. In diesem Zustand können die Halbleiter noch nicht als Detektor benutzt werden. Bringt man

jedoch zwei verschiedenartig dotierte Halbleiter in Kontakt, gleichen sich die unterschiedlichen Ladungsträgerdichten und damit die jeweiligen Fermi-niveaus an. Das geschieht, indem vom n-dotierten Bereich überschüssige Elektronen in den p-dotierten Bereich diffundieren und dort mit den überschüssigen Elektronenlöchern rekombinieren. So gleicht sich zwar die Ladungsträgerdichte an, gleichzeitig jedoch bauen die beiden Halbleiterhälften eine Spannung auf und es bildet sich ein elektrisches Feld um die Kontaktstelle herum, die sogenannte Raumladungszone, die dem Diffusionsstrom entgegenwirkt. In dieser Zone befinden sich wie in Abbildung 4.7 gezeigt, keine freien Ladungsträger mehr.

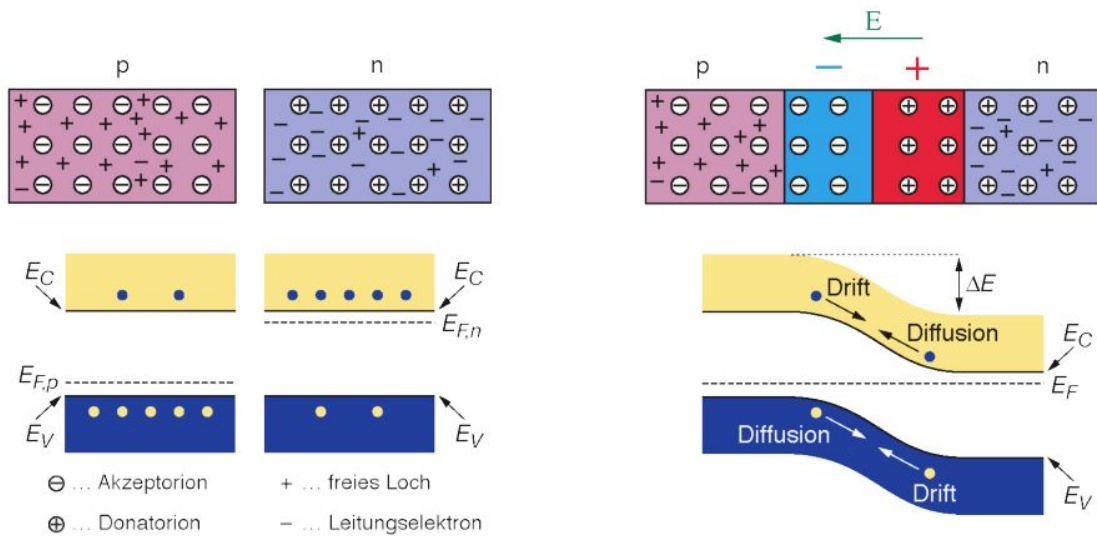


Figure 4.7: Bändermodell vor und nach Kontakt zweier unterschiedlich dotierter Halbleiter [19].

Mit Hilfe einer externen Spannung kann die Breite der Raumladungszone variiert werden. Wird eine Spannung in Durchlassrichtung angelegt, also an der n-Seite eine negative und an der p-Seite eine positive, so werden die Elektronen und Löcher an die Kontaktstelle der Halbleiter gedrückt und die Grenzschicht verkleinert sich. Dadurch nehmen Diffusionsströme massiv zu.

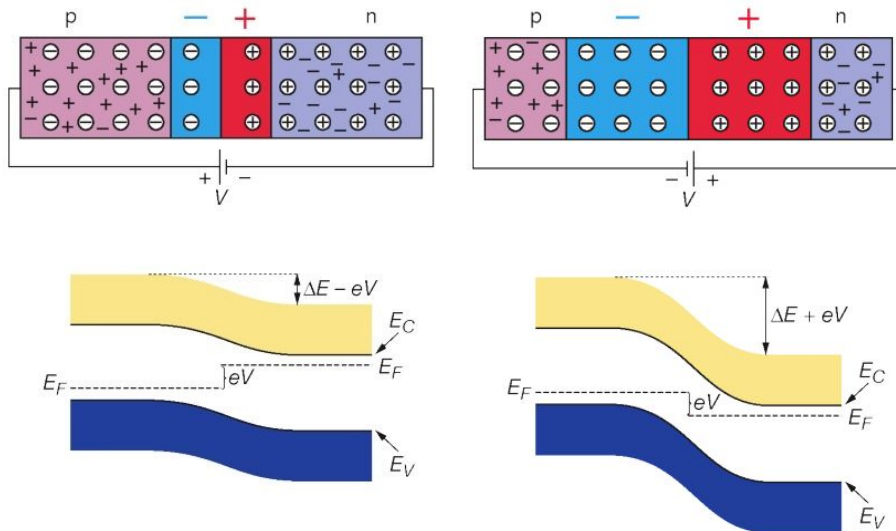


Figure 4.8: PN-Übergang mit angelegter Spannung in (links) Durchlassrichtung und (rechts) Sperrrichtung [19].

Wird die Spannung in Sperrrichtung angelegt, also eine positive Spannung an der n-Seite und eine negative an der p-Seite, so werden die Elektronen und Löcher aus dem Halbleiter herausgezogen, wodurch sich die Grenzschicht vergrößert und Diffusionsströme kaum noch stattfinden. Lediglich Leckströme auf Grund thermisch angeregter Elektronen-Loch-Paare sind noch vorhanden.

Die Sperrspannung kann soweit erhöht werden, bis der gesamte Halbleiter depletiert ist, also die Raumladungszone über den kompletten Bereich geht. In diesem Zustand kann der Halbleiter optimal als Teilchendetektor benutzt werden, da der komplette Bereich depletiert ist und somit hindurch fliegende ionisierende Teilchen Elektronen-Loch-Paare erzeugen, die zu den Elektroden gezogen und dort registriert werden können.

Ein Sonderfall des pn-Übergangs ist der  $p^+n$ -Übergang, bei dem der p-Bereich eine Dotierungskonzentration hat, die mehrere Größenordnungen höher sein kann, als die des n-Bereiches. Die effektive Dotierung beeinflusst jeweils die Breite und Position der Verarmungszone. Dadurch ist es möglich, einen kleinen aber hoch dotierten  $p^+$ -Bereich auf einem großen n-dotierten Substrat aufzubringen, wobei die Raumladungszone wegen der unterschiedlichen Dotierungskonzentrationen hauptsächlich

in das Substrat hinein ragt. Der kleine p<sup>+</sup>-dotierte Bereich dient lediglich dazu, die Raumladungszone aufzubauen.

Die Breite der Raumladungszone wird also im Wesentlichen durch zwei Faktoren beeinflusst; die Dotierungskonzentration und eine externe Spannung, was sich durch folgende Formeln beschreiben lässt.

$$W_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_r\epsilon_0(V_0 - V)}{eN_a(1 + N_a/N_d)}} \quad W_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_r\epsilon_0(V_0 - V)}{eN_d(1 + N_d/N_a)}}$$

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_r\epsilon_0}{e} \cdot (V_0 - V) \cdot \left(\frac{1}{N_d} + \frac{1}{N_a}\right)}$$

mit:

- $W_n$  : Ausdehnung der Verarmungszone im n-dotierten Bereich
- $W_p$  : Ausdehnung der Verarmungszone im p-dotierten Bereich
- $W$  : Gesamtbreite der Verarmungszone
- $\epsilon_r$  : Dielektrizitätszahl
- $\epsilon_0$  : elektrische Feldkonstante
- $N_a$  : Dotierdichte der Akzeptoren
- $N_d$  : Dotierdichte der Donatoren
- $e$  : Elementarladung
- $V_0$  : Diffusionsspannung
- $V$  : externe Spannung

Die Diffusions- bzw. Biasspannung berechnet sich aus:

$$V_0 = \frac{kT}{e} \cdot \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right)$$

mit:

- $n_i^2$  : Anzahl der intrinsischen Ladungsträger
- $k$  : Boltzmannkonstante
- $T$  : Temperatur

## 4.5 Silizium-Streifendetektoren

Durch Aufbringen einer Streifen-Struktur auf einer der Halbleiterseiten, lässt sich eine eindimensionale Ortsauflösung der Detektoren realisieren. Darum werden die  $p^+$ -Bereiche als Streifen auf das Substrat aufgebracht (Siehe Abb. 4.9). Die Position der ionisierenden Teilchen wird mit Hilfe der unterschiedlichen Signalstärken an den einzelnen Streifen ermittelt. Zusätzlich wird auf der Rückseite des Detektors eine dünne  $n^+$ -Schicht aufgebracht, welche zur guten ohmschen Kontaktierung dient [19].

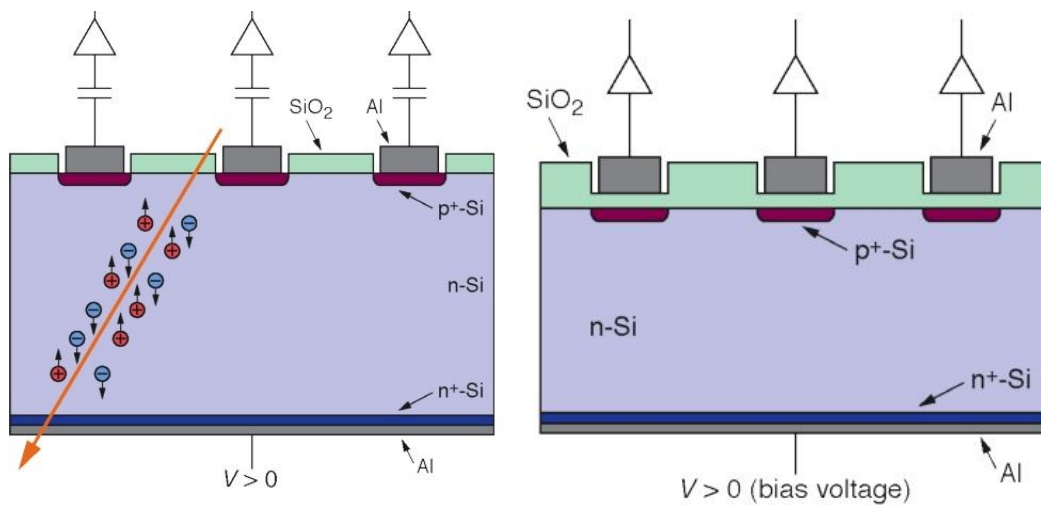


Figure 4.9: Streifendetektor ohne (links) und mit (rechts) integrierter kapazitiver Kopplung. Auf der Rückseite ist die  $n^+$ -dotierte Kontaktierungsschicht zu sehen [19].

Leckströme lassen sich durch Herabsenken der Temperatur zwar verringern, aber nicht vermeiden. Desweiteren sind die Leckströme in den jeweiligen Auslesekämen unterschiedlich und verschieben jeweils den Arbeitspunkt, was eine einheitliche Kalibrierung und Messung erschwert. Um dieses Problem zu beheben, werden die Kontaktierungsstreifen und Vorverstärker nicht direkt mit den  $p^+$ -Streifen verbunden, sondern kapazitiv an diese gekoppelt. Um Platz zu sparen, werden die Kapazitäten direkt im Detektor integriert. Dazu wird, wie in Abbildung 4.9 *rechts* gezeigt, zwischen den auf dem  $n$ -Bulk implantierten  $p^+$ -Streifen und den Aluminiumkontakten eine Siliziumoxidschicht aufgebracht. Dies sorgt dafür, dass die Leckströme nicht

mehr direkt über den Vorverstärker abfließen und die Messungen beeinflusst.

Ein Problem bei der Integration der Kapazitäten sind jedoch sogenannte Pinholes, also Löcher im Dielektrikum (als Dielektrikum dient die  $\text{SiO}_2$ -Schicht), durch welche ein Sperrstrom fließen kann.

#### 4.5.1 Doppelseitige Streifendetektoren

Um die Position der ionisierenden Teilchen nicht nur in einer Koordinate auflösen zu können, verwendet man doppelseitige Streifendetektoren. Dabei sind auf der Rückseite des Detektors  $n^+$ -dotierte Auslestreifen angebracht, die im Idealfall im  $90^\circ$  Winkel (für kartesische Koordinaten erzielt man bei  $90^\circ$  die beste Auflösung) zu den  $p^+$ -Streifen gedreht sind. Im Gegensatz zu den  $p^+$ -dotierten Streifen, bildet sich bei den  $n^+$ -Streifen eine sogenannte Akkumulationsschicht aus (siehe Abbildung 4.10). Sie entsteht dadurch, dass sich beim Si-SiO<sub>2</sub>-Übergang positive Ladungen ansammeln, welche Elektronen aus dem Substrat anziehen, so dass es zu einem Kurzschluss der einzelnen Streifen kommt. Damit ist eine Positionsmessung nicht mehr möglich.

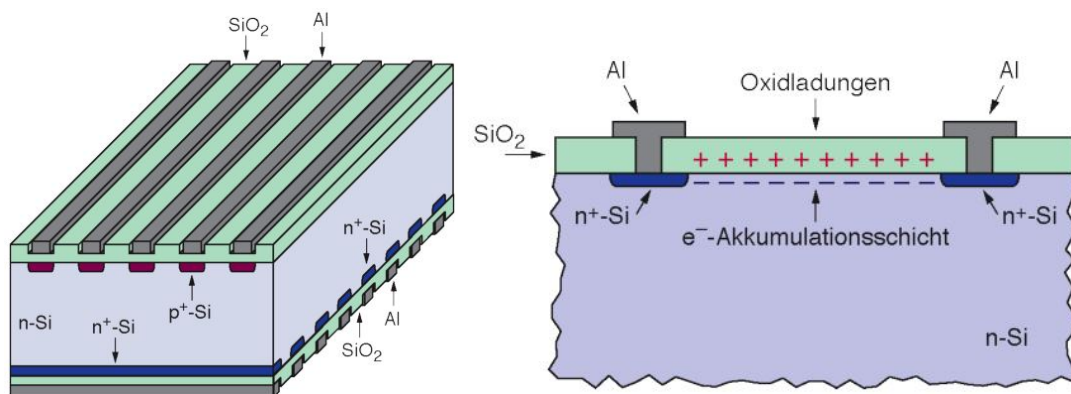


Figure 4.10: Links: Doppelseitiger Streifendetektor. Rechts: Akkumulationsschicht zwischen den  $n^+$ -Streifen [19].

Mit  $p^+$ -Implantaten, sogenannten blocking electrodes oder p-stops, die zwischen den  $n^+$ -Elektroden angebracht werden, können die Akkumulationsschichten unterbrochen werden, wie in Abbildung 4.11 zu sehen ist. Diese Unterbrecherstreifen

dienen nur dazu, den Widerstand zwischen den Auslestreifen aufrecht zu erhalten und werden selbst nicht ausgelesen.

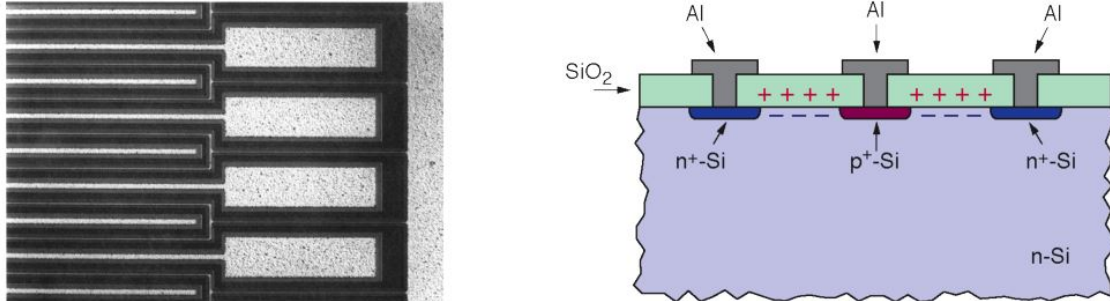


Figure 4.11: Links: Aufnahme von n<sup>+</sup>-Streifen mit p<sup>+</sup>-Implantaten. Rechts: Unterbrechung der Akkumulationsschicht [19].

Ein solcher Detektor kann zwar eine 2-dimensionale Position der Teilchenspür liefern, das funktioniert allerdings nur, solange nur ein einziges Ereignis auftritt. Mehrere Ereignisse gleichzeitig können nicht immer eindeutig rekonstruiert werden, da sogenannte Ghost-Hits auftreten, wie in Abbildung 4.12 veranschaulicht wird.

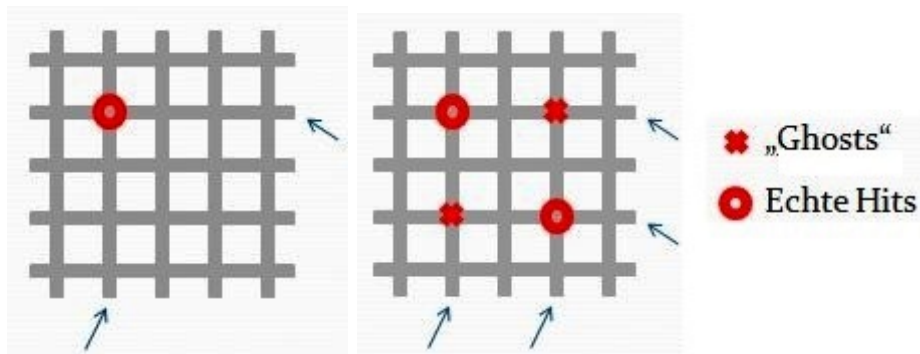


Figure 4.12: Darstellung eines Einzelereignisses (links) und zweier Hits mit zwei Ghosthits (rechts).

Es gibt eine Möglichkeit, einige dieser Ghost-Hits auszusondern. Da es aufgrund der statistischen Natur des Energieverlustes in dünnen Schichten (siehe Kapitel 4.7 Absatz **Statistische Fluktuationen**) möglich ist, dass mehrere Teilchen, die den

Detektor gleichzeitig passieren, jeweils unterschiedlich große Signale verursachen, kann man die Signalhöhen der Auslestreifen (Pulshöheninformation) miteinander vergleichen. Haben die Signale zweier senkrechter Streifen eine unterschiedliche Höhe, handelt es sich um einen Ghost-Hit. Nur wenn zwei Streifen die vergleichbaren Signalhöhen aufweisen, haben sie dasselbe Teilchen registriert und es liegt ein echter Hit vor. Diese Methode funktioniert natürlich nur, wenn die jeweils deponierte Energie der gleichzeitig auftreffenden Partikel so unterschiedlich ist, dass man sie noch unterscheiden kann.

## 4.6 Silizium-Pixeldetektoren

Eine Alternative, um Ghost-Hits gänzlich auszuschließen, sind Pixel-Detektoren. Dabei werden, wie der Name schon vermuten lässt, die Detektoren nicht mit Auslestreifen, sondern mit -Pixeln bestückt. Typische Pixelgrößen liegen bei einigen  $100 \mu\text{m}^2$ . Im Gegensatz zu den doppelseitigen Streifendetektoren liefern Pixel-Detektoren direkt eine zweidimensionale Ortsinformation, sodass Ghost-Hits aufgrund falsch zugeordneter Streifen nicht mehr auftreten können.

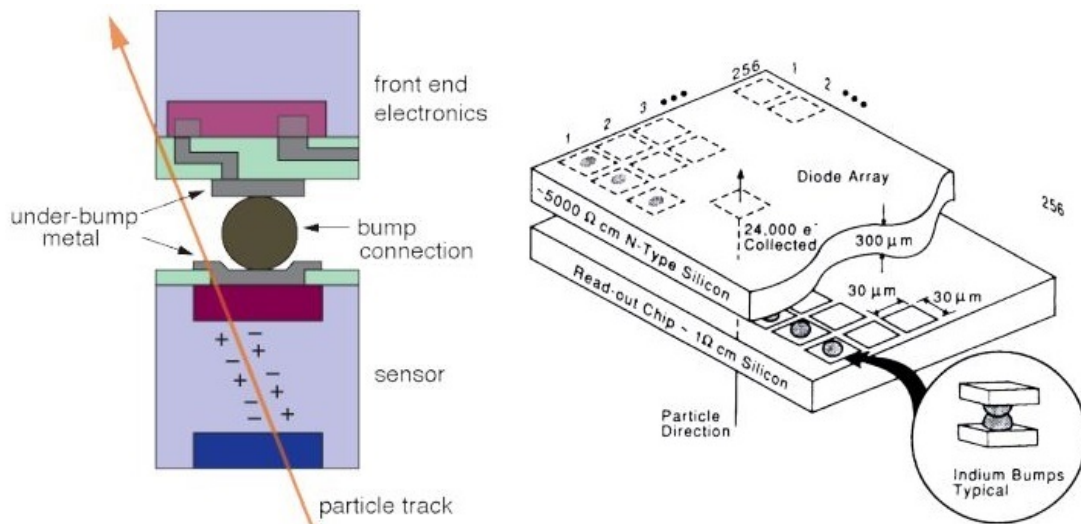


Figure 4.13: Links: Detaildarstellung einer Bump-Bond-Verbindung. Rechts: FlipChip-Pixeldetektor [19].

Ein entscheidender Nachteil der Pixel-Detektoren ist die enorme Anzahl an Ausle-



sekanälen und die damit einhergehende Schwierigkeit der elektronischen Kontaktierung, denn für jeden Pixel wird ein eigener Kanal an Ausleseelektronik benötigt. Um die einzelnen Sensoren mit der Ausleseelektronik zu verbinden, benutzt man in den meisten Fällen die sogenannte Flip-Chip-Technik. Dabei wird wie in Abbildung 4.13 gezeigt, ein Chip, auf dem sich die Pixel befinden, auf einen zweiten Chip mit der Ausleseelektronik gesetzt. Für die Kontaktierung zwischen Sensor und Ausleseelektronik sorgt jeweils ein leitendes Kügelchen (Bump), bestehend aus Indium oder Zinn. Bei dieser Art der Kontaktierung müssen die geometrischen Gegebenheiten von Sensor- und Auslesechip aneinander angepasst sein, sodass die benötigte Fläche der Ausleseelektronik die minimale Pixelgröße begrenzt.

## 4.7 Ortsauflösung der Streifendetektoren

Die Ortsauflösung der Streifendetektoren wird durch verschiedene Parameter beeinflusst. Einer der hervorstechendsten Parameter ist mit Sicherheit der Streifenabstand, aber auch das Signal-Rausch-Verhältnis, die statistische Fluktuation des Energieverlustes und die Diffusion der freien Ladungsträger haben einen Einfluss.

### Statistische Fluktuationen

Silizium-Streifen-Detektoren (wegen der kleinen Geometrie auch Silizium-Microstrip-Detektor genannt) sind typischerweise 300  $\mu\text{m}$  dick und gelten damit als dünne "Absorber", in denen die ionisierenden Teilchen nicht absorbiert werden, sondern hindurch fliegen und dabei einen kleinen Teil ihrer Energie abgeben.

Bei dünnen Absorbern gleicht die Energieverlustverteilung, wie in Kapitel 4.1 bereits angesprochen, einer Landau-Verteilung, also einer asymmetrischen Verteilungsfunktion mit einem langen Ausläufer zu hohen Energieüberträgen hin (zu sehen in Abbildung 4.14 links). Die Asymmetrie der Verteilung wird durch die  $\delta$ -Elektronen verursacht. Es handelt sich dabei um (beim Stoß mit dem hindurchfliegenden Teilchen erzeugte) hochenergetische Elektronen, die große Wegstrecken (im Bereich von  $\mu\text{m}$ ) innerhalb des Detektors zurücklegen können und auf ihrem Weg sekundäre Ladungsträgerpaare erzeugen und so die zu messende Teilchenspur versetzen. Auch wenn die  $\delta$ -Elektronen nur relativ selten auftreten, verursachen sie einen Messfehler

im  $\mu\text{m}$ -Bereich, der sich nicht vermeiden lässt. Je größer die Energie der  $\delta$ -Elektronen ist, umso seltener treten sie auf, desto größer ist jedoch ihre Wegstrecke, was in Abbildung 4.14 rechts gezeigt ist [19].

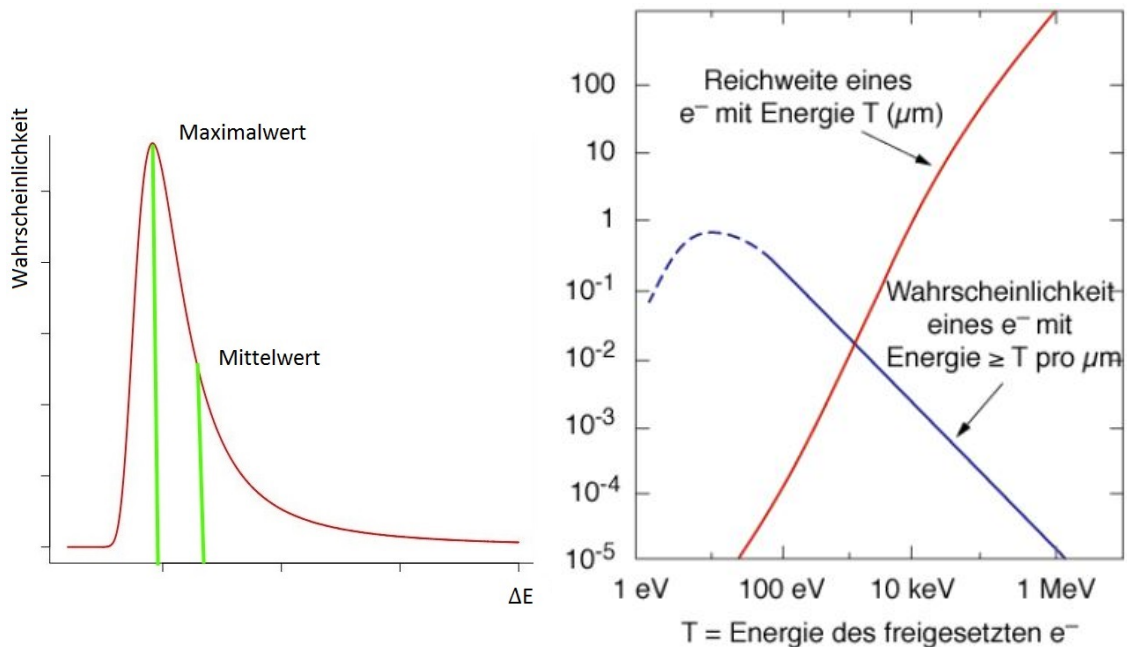


Figure 4.14: Links: Landauverteilung mit für die Verteilung typischem unterschiedlichem Maximal- und Mittelwert. Rechts: Wahrscheinlichkeit ein hochenergetisches  $\delta$ -Elektron zu erzeugen und dessen Reichweite in Silizium. Mit steigender Energie wird die Entstehungswahrscheinlichkeit immer geringer [19].

### Diffusion

Durchquert ein geladenes Teilchen das Substrat, hinterlässt es eine Wolke von Ladungsträgerpaaren im Umkreis von ca.  $1\mu\text{m}$  entlang seiner Spur. Während die Ladungsträger zu den Elektroden driften, diffundiert die Wolke auseinander. Dabei verhält es sich so, dass die Ladungsträger, die nah an ihrer Zielelektrode entstanden sind, einen kürzeren Weg haben als diejenigen an der gegenüberliegenden Elektrode. Folglich haben die Ladungsträger je nach Entstehungsort unterschiedlich lange Driftstrecken und dementsprechend auch unterschiedlich lange Zeit, um auseinander zu diffundieren, bevor sie an den Elektroden registriert werden. Das führt dazu, dass

das Signal an den Elektroden einer Überlagerung vieler verschiedener Gaußverteilungen entspricht, die umso breiter sind, je weiter die Driftstrecke war.

Dieser Diffusionseffekt ist durchaus wünschenswert, da er die Ortsauflösung des Detektors steigert. Die durch die Diffusion verursachte Verbreiterung der Ladungswolke sorgt dafür, dass mehrere Auslestreifen auf ein und dasselbe Teilchen reagieren. Wird an den Streifen nicht nur die digitale Information eines registrierten Teilchen erfasst, sondern auch die jeweilige Signalhöhe verarbeitet, kann darüber der Ladungsschwerpunkt der Wolke berechnet werden, was eine Ortsauflösung ergibt, die noch unterhalb des Streifenabstandes liegt [19].

Für den einfachsten Fall, dass nur ein Auslestreifen die Teilchenspur registriert, lässt sich die Ortsauflösung wie folgt berechnen:

$$\sigma \approx \frac{p}{\sqrt{12}}$$

mit:

$p$  : Streifenabstand der Auslestreifen (readout pitch)

Trifft die Ladungswolke auf mehrere Streifen, ist die Ortsauflösung direkt proportional zum Kehrwert des Signal-Rausch-Verhältnisses:

$$\sigma \sim \frac{p}{S/N}$$

mit:

$S/N$  : Signal-Rausch-Verhältnis (signal to noise)

### **Streifenabstand**

Der Streifenabstand wird Strip Pitch genannt und ist definiert als Abstand zwischen den Mitten zweier Streifen. Er hat signifikanten Einfluss auf die Ortsauflösung, denn je kleiner der Strip Pitch ist, desto genauer ist die Auflösung. Demnach ist man stets bestrebt, zur besseren Ortsauflösung den Streifenabstand immer weiter zu verkleinern, was zur Folge hat, dass pro Detektorfläche immer mehr Streifen und damit auch mehr Auslesekanäle benötigt werden. Ab einem gewissen Punkt macht

der Mehraufwand durch die steigende Anzahl aus Elektronikkanälen den Nutzen der besseren Ortsauflösung zunichte.

Jedoch gibt es eine Möglichkeit, die Auflösung noch weiter zu steigern, ohne die Nachteile durch zahlreiche Auslesekanäle in Kauf nehmen zu müssen. Zwischen den Auslestreifen werden zusätzliche Streifen angebracht, die jedoch nicht ausgelesen werden. Diese Zwischenstreifen (engl. intermediate strips) sind kapazitiv an die restlichen Streifen gekoppelt, was in Abbildung 4.15 veranschaulicht ist.

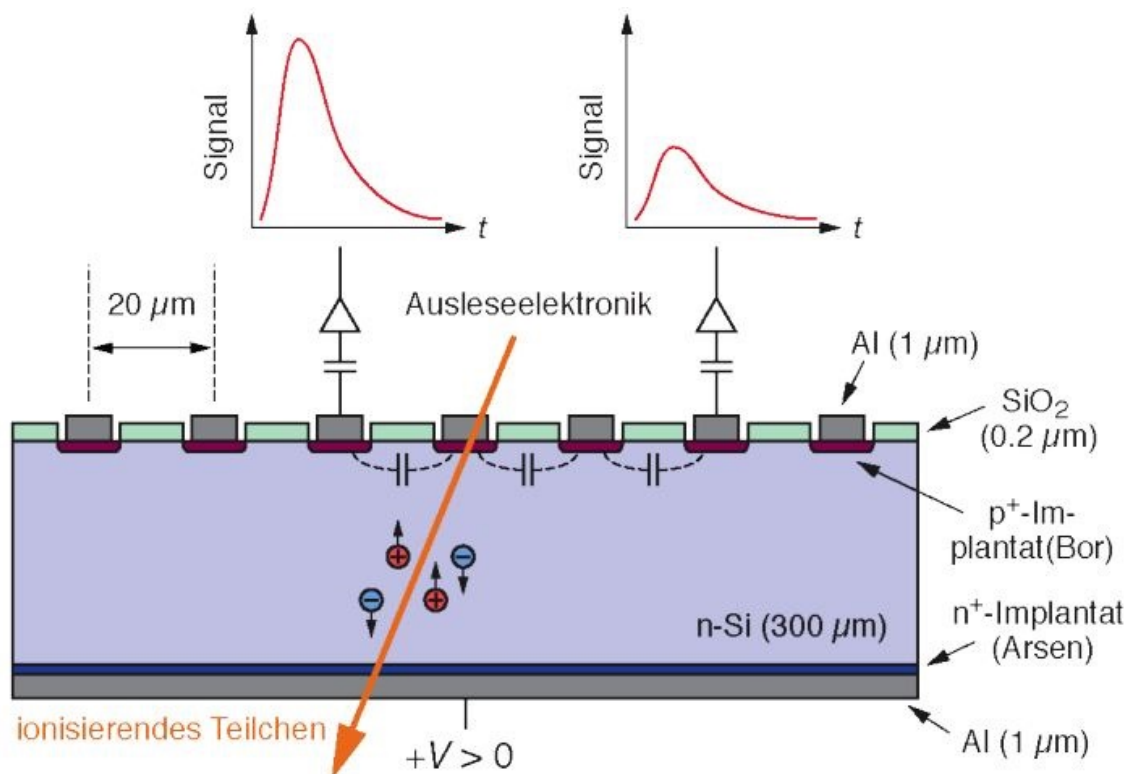


Figure 4.15: Microstripdetektor mit jeweils 2 Zwischenstreifen zwischen den Auslestreifen [19].

Durch die kapazitive Kopplung werden die von den Zwischenstreifen empfangenen Signale an die Auslestreifen übertragen. Mit diesem Aufbau erhält man eine bessere Auflösung bei geringerer Anzahl an Kanälen [19].

## 4.8 Guardring

Durch das Schneiden des Wafers entstehen Gitterfehler an den Detektorkanten. Diese beeinflussen die Form des elektrischen Feldes und generieren zusätzliche Oberflächenzustände, was hohe Leckströme an den Detektorkanten zur Folge hat. Um diese Probleme zu beheben wird eine zusätzliche ringförmige Elektrode, der sogenannte Guardring, auf dem Detektor aufgebracht. Der Guardring umgibt das aktive Detektorgebiet und liegt auf dem gleichen Potential, wie die  $p^+$ -Streifen. Das elektrische Feld bleibt dadurch im Gebiet der Auslestreifen (also innerhalb des Guardrings) homogen und ändert sich erst im Bereich zwischen Guardring und Detektorkante.

Um hohe Feldstärken an der Waferschnittkante zu vermeiden, werden oft mehrere Guardringe auf dem Sensor aufgebracht, durch die das Potential zum Rand hin sukzessive gesenkt wird. Alternativ kann auch, wie in Abbildung 4.16 gezeigt, anstelle der zusätzlichen Guardringe eine  $n^{++}$ -dotierte Elektrode verwendet werden, die auf demselben Potential liegt, wie die Rückseite des Sensors [19], [20].

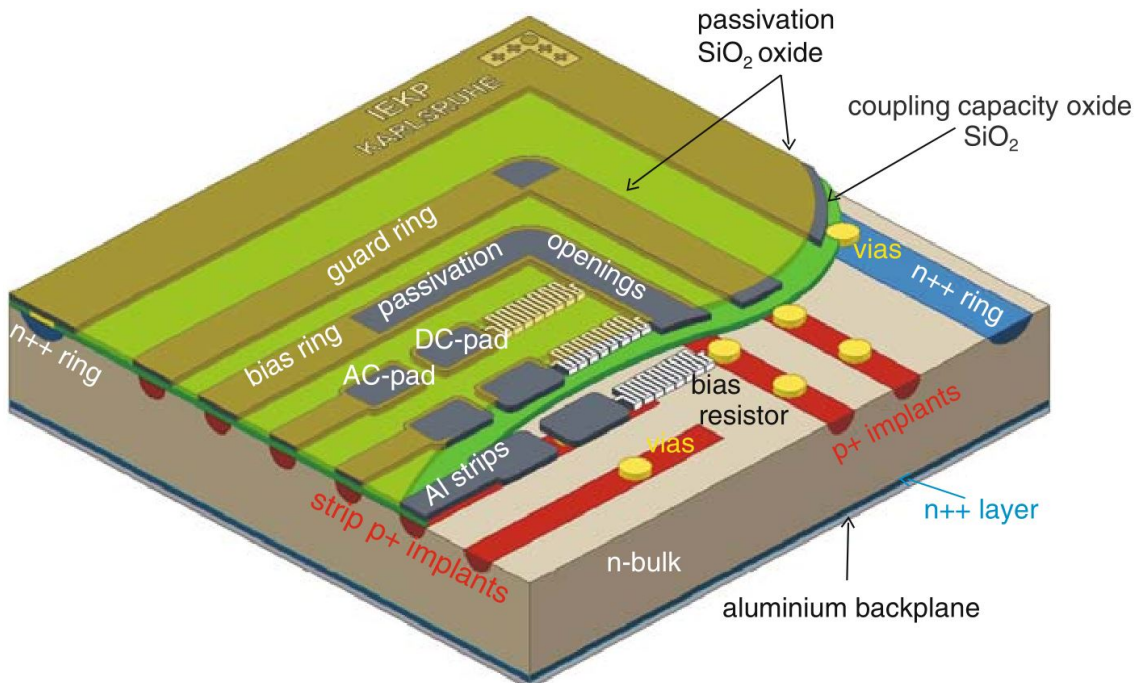


Figure 4.16: 3D Darstellung eines Silizium-Streifen-Detektors [20].

Die in Abbildung 4.16 grün dargestellte Siliziumoxidschicht dient als Dielektrikum und ermöglicht damit die kapazitive Kopplung zwischen den  $p^+$ -Implantaten und den Aluminiumstreifen. Die Aluminiumstreifen können über die sogenannten AC-pads kontaktiert werden. Zusätzlich sind aber auch DC-pads vorhanden; diese sind durch sogenannte VIAs (vertical interconnect access) direkt mit den  $p^+$ -Implantaten verbunden, so dass der Sensor auch ohne kapazitive Kopplung betrieben werden kann. Über den Biasring wird der Sensor mit Spannung versorgt [20].

## 4.9 Strahlenschäden

Die Wechselwirkung der Teilchenstrahlen mit dem Detektormaterial ist entscheidend für den Nachweis der Partikel, jedoch schädigt die Wechselwirkung das Material auch, denn (Teilchen-)Strahlen wechselwirken nicht nur mit den Hüllenelektronen des Targets, sondern auch mit den Atomkernen und zerstören so das Material. Die Detektorbereiche in der Nähe des Wechselwirkungspunktes sind besonders stark betroffen, da dort die Ereignisraten am höchsten sind. Bei PANDA ist der Mikro-Vertex-Detektor dem Kollisionspunkt am nächsten und muss Eventraten von  $2 \cdot 10^7$  Ereignissen/Sekunde standhalten.

Die Strahlenschäden können entweder an den Oberflächen oder im Inneren des Sensors (Bulk) auftreten und haben je nachdem unterschiedliche Auswirkungen. Die Strahlenschäden an den Oberflächen beeinflussen hauptsächlich die Elektronik durch Bildung von Oxidladungen, verursacht durch Photonen und Elektronen. Wegen den isolierenden Eigenschaften der Oxidschichten können die gebildeten Oxidladungen kaum abfließen und bleiben als lokale Aufladungen zurück [19], [21].

Die Schäden innerhalb des Halbleiters gehen in der Regel von Neutronen, Protonen und Pionen aus, die durch Stoßprozesse mit den Atomkernen Störungen im Kristallgitter verursachen. Das führt zu zusätzlichen Energieniveaus innerhalb der Bandlücke, die das Verhalten des Sensors auf unterschiedliche Arten negativ beeinflussen können. Zum einen können Änderungen in der effektiven Dotierkonzentration auftreten, welche die Depletionsspannung des Sensors verändern, zum anderen wird durch die zusätzlichen ungewollten Energieniveaus der Dunkelstrom gesteigert, da die Bandlücke leichter überwunden werden kann. Desweiteren verursachen die

Zusatzniveaus eine geringere Signalhöhe, da sie freie Elektronen und Löcher einfangen und somit deren Lebensdauer vermindern.

Die Gitterfehler werden in zwei primäre Defekttypen, die Punktdefekte und die Clusterdefekte, unterschieden.

### Punktdefekte

Wird ein Siliziumatom so weit von seinem Gitterplatz verschoben, dass es sich an anderer Stelle als Zwischengitteratom einordnet und eine Fehlstelle zurück lässt, handelt es sich um einen Punktdefekt. Dieser sogenannte Frenkel-Defekt ist in Abbildung 4.17 links schematisch dargestellt. Die Zwischengitteratome können auf Grund von thermischen Gitterschwingungen mit der Zeit wieder auf ihren Ursprungsplatz wandern; diese Punktdefekte können also wieder ausheilen. Es besteht aber auch die Möglichkeit, dass Punktdefekte sich mit weiteren vereinen und stabile Sekundärdefekte bilden.

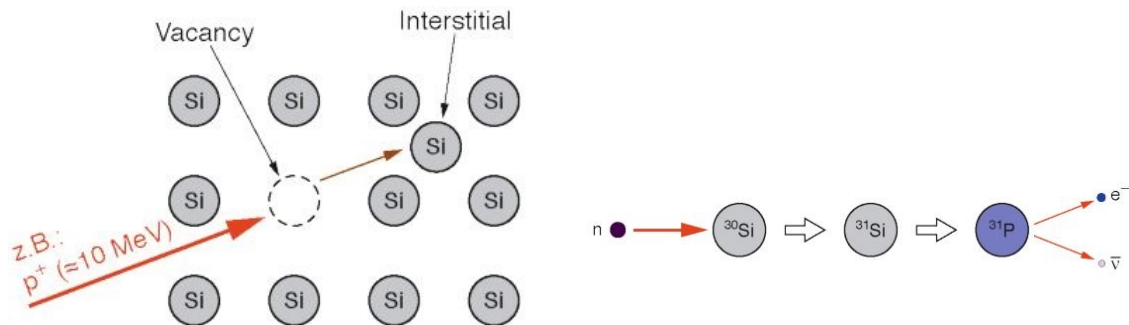


Figure 4.17: Links: Frenkel-Defekt (paarweises Auftreten der Punktdefekte), rechts: Punktdefekt via Kernumwandlung [19].

Ein weiterer Punktdefekt ist die Umwandlung von Gitteratomen, verursacht zum Beispiel durch Neutroneneinfang. So kann, wie in Abbildung 4.17 *rechts* gezeigt, ein Siliziumatom ein Neutron einfangen und sich unter Abstrahlung eines Elektrons und Elektron-Neutrinos ( $\beta$ -Zerfall) in ein Phosphoratom umwandeln. Die durch die Kernreaktionen umgewandelten Kerne wirken fortan als zusätzliche Dotieratome und beeinflussen damit das Verhalten des Halbleiters [19], [21].

### Clusterdefekte

Wird bei einem Stoß auf einen Siliziumkern genügend Energie übertragen, sodass dieses sogenannte Primary Knock-On Atom (PKA) seinerseits wiederum weitere Atomkerne aus ihren Gitterplätzen stoßen kann, entstehen sogenannte Cluster-Defekte. Das ist eine dichte Ansammlung von vielen Punktdefekten, die im Gegensatz zu einzelnen Punktdefekten nicht ausheilen. Abbildung 4.18 veranschaulicht dieses Phänomen, bei dem innerhalb des Cluster-Defektes die kristalline Struktur des Detektors in eine amorphe übergeht.

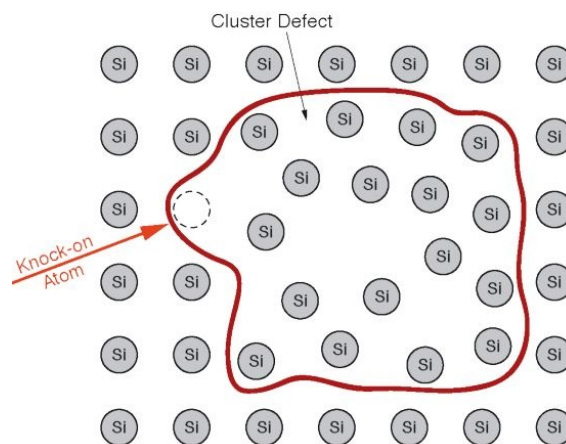


Figure 4.18: Clusterdefekt durch Primary Knock-On Atome, oder durch PKAs verursachte Kaskaden, hervorgerufen [19].

Die Wahrscheinlichkeit, solch einen hochenergetischen Kern (auch Primary Knock-Out Atom genannt) zu erzeugen, welcher Cluster-Defekte verursacht, ist von der Art der ionisierenden Strahlung abhängig. Streuung geladener Teilchen mittels elektromagnetischer Wechselwirkung verursachen größten Teils Punktdefekte, während die Cluster-Defekte durch die Streuung neutraler Hadronen mittels starker Wechselwirkung verursacht werden [19].

#### 4.9.1 NIEL-Hypothese

Um die Strahlenschäden der unterschiedlichen Teilchenarten einheitlich zu beschreiben, benutzt man den Ansatz der sogenannten NIEL-Hypothese (Non-Ionising Ener-



gy Loss). Sie besagt, dass die verursachten Materialschäden proportional zum nicht-ionisierenden Energieverlust der Teilchenstrahlen sind, da sich die durch ionisierenden Energieverlust verursachten Schäden meist auf Punktdefekte begrenzen und somit in der NIEL-Hypothese ignoriert werden. Sämtliche Teilchenstrahlen werden mittels der NIEL-Hypothese auf den Schädigungsgrad von 1 MeV Neutronen skaliert. Anstelle des wirklichen integrierten Strahlenflusses gibt man einen äquivalenten integrierten Fluss (equivalent fluence  $\phi_{eq}$ ) an. Zum Beispiel wird der Fluss einer Protonenstrahlung mit zugehöriger Energie umgerechnet auf den Fluss einer 1 MeV Neutronenstrahlung, die den gleichen Schaden verursacht. In Abbildung 4.19 ist der Verlauf der Strahlenschäden von verschiedenen Teilchen dargestellt, die alle auf das Schadenspotential eines 1 MeV Neutrons normiert sind [19], [20].

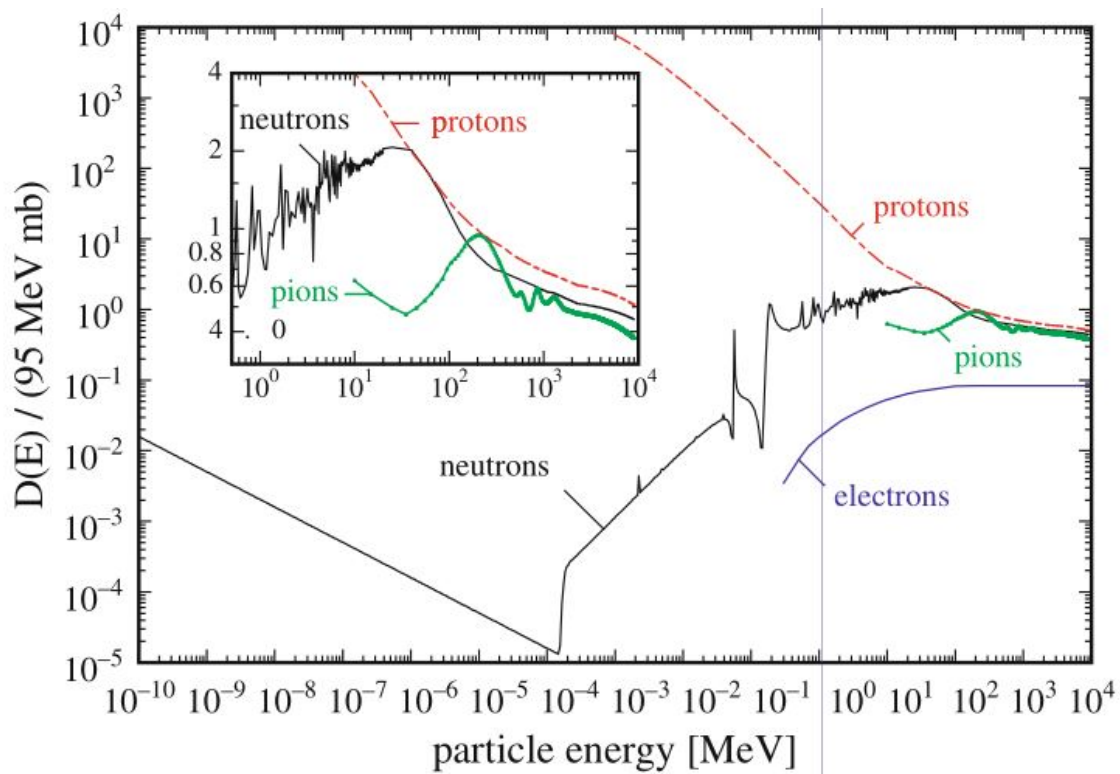


Figure 4.19: Schädigung durch nicht ionisierenden Energieverlust für verschiedene Teilchen in Abhängigkeit der Teilchenenergie [20].

### 4.9.2 Auswirkungen der Strahlenschäden

Wie zu Beginn des Kapitels 4.9 bereits kurz angesprochen, zeichnen sich die Strahlenschäden als zusätzliche Energieniveaus ab, die je nach Position (Niveau) unterschiedliche Auswirkungen auf die Sensoreigenschaften haben, auf die hier nochmal genauer eingegangen wird.

#### Anstieg des Dunkelstroms

Störstellen, die Energieniveaus im mittleren Bereich der Bandlücke erzeugen, lassen den Dunkelstrom ansteigen, da das nötige Potential, welches zum Überwinden der Bandlücke nötig ist, kleiner wird. So können Ladungsträger schon bei geringerer thermischer Energie angeregt werden und zum Leckstrom beitragen. Abbildung 4.20 zeigt den Anstieg des Dunkelstroms bei zunehmender Bestrahlung für verschiedene Siliziumdetektoren.

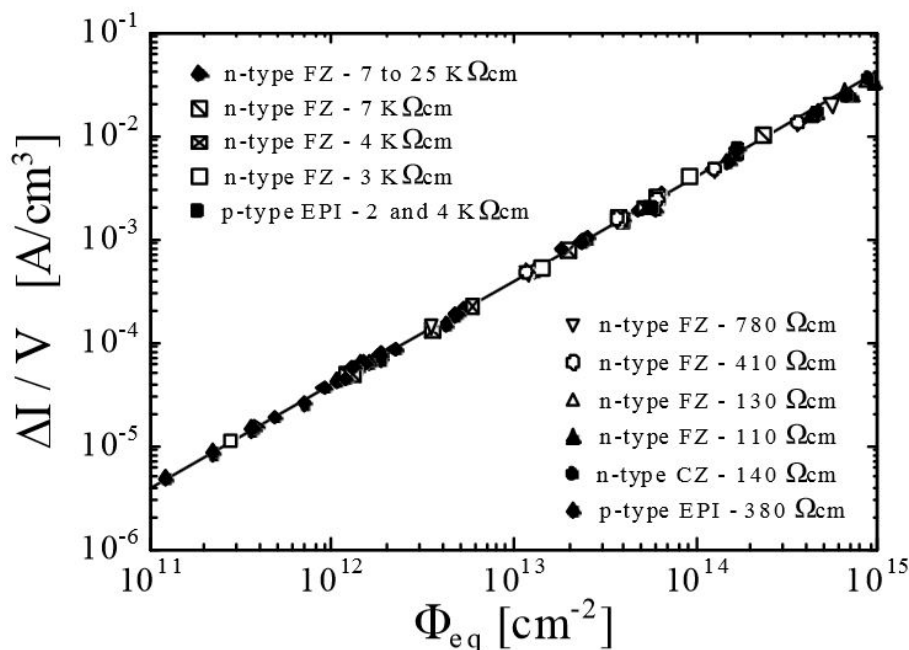


Figure 4.20: Anstieg des Dunkelstroms bei steigender Bestrahlung. Vermessen wurden verschieden hergestellte Siliziumdetektoren nach 80 minütiger Ausheilzeit bei  $60^\circ\text{C}$  [22].

Aus Abbildung 4.20 geht hervor, dass der Volumendunkelstrom linear mit steigendem integrierten Teilchenfluss ( $\phi_{eq}$ ) ansteigt. Die Formel lautet:

$$\frac{\Delta I}{V} = \alpha \cdot \phi_{eq}$$

mit:

$\Delta I$  : Dunkelstrom

$V$  : aktives Detektorvolumen

$\alpha$  : Stromabhängige Schadensrate (current related damage rate)

$\phi_{eq}$  : Neutronenäquivalenter Teilchenfluss

$\alpha$  ist abhängig von Temperatur und dem Zeitraum zwischen Auftreten und Messen der Strahlenschäden, da einige der Defekte ausheilen können. Eine 80 minütige Ausheilung bei 60 °C nach Bestrahlung und vor Messungen hat sich als "Standardverfahren" durchgesetzt. Bekanntlich ist der Ausheileffekt mit steigender Zeit und Temperatur größer, sodass  $\alpha$  kleiner wird. Außerdem fällt in Abbildung 4.20 auf, dass sämtliche Werte der verschiedenen Sensoren auf derselben Geraden liegen; für Silizium ist  $\alpha$  also unabhängig vom Sensortyp [19], [20].

### **Effizienzverminderung der Ladungssammlung**

Ein weiteres Problem, welches von den unerwünschten Energieniveaus ausgeht, ist das sogenannte Trapping. Dabei werden die von ionisierenden Teilchen erzeugten freien Ladungsträger von ungeladenen Störstellen "eingefangen". Folglich brauchen die Ladungsträger länger, um zu den Elektroden zu driften; sie haben also mehr Zeit zu rekombinieren und so zum Signal nicht mehr beitragen zu können, was die Effizienz der Ladungssammlung reduziert. Dem Trapping-Effekt kann man mit einer erhöhten Depletionsspannung entgegenwirken, sodass bestrahlte Sensoren üblicherweise oberhalb der Depletionsspannung (overdepleted) betrieben werden, um die Effizienz der Ladungssammlung aufrecht zu erhalten [19].

**Depletionsspannung**

Den wohl fundamentalsten Einfluss haben die Strahlenschäden auf die Depletionsspannung bzw. die Dotierungskonzentration. Wird innerhalb des Kristallgitters neben einem Donatoratom (z.B. Phosphor) eines der Siliziumatome von seinem Platz weggestoßen, verliert das Phosphoratom seine Donatoreigenschaften. Ein Sauerstoffatom jedoch, welches an sich elektrisch inaktiv ist, wird neben einer Leerstelle im Kristallgitter zu einem Akzeptor. Schließlich wird durch die Strahlenschäden also die effektive Dotierungskonzentration ( $N_{eff} = |N_D - N_A|$ ) geändert, und zwar dahingehend, dass mehr Akzeptoren als Donatoren generiert werden. Siliziumdetektoren werden in der Regel als n-Typ-Sensoren hergestellt, also ein n-dotierter Bulk (aktiver Sensorbereich) mit p<sup>+</sup>-dotierten Streifen. Grund dafür ist, dass Silizium von Natur aus leicht n-dotiert ist; somit ist es also kosteneffizienter, den größten Teil des Sensors n-dotiert zu belassen.

Das hat zur Folge, dass mit zunehmender Teilchenfluenz die effektive Dotierungskonzentration immer weiter abnimmt, sodass sich das n-Typ Silizium langsam in ein p-Typ Silizium umwandelt. Dieser Prozess wird auch Typkonversion oder Typinversion genannt und ist in Abbildung 4.21 dargestellt.

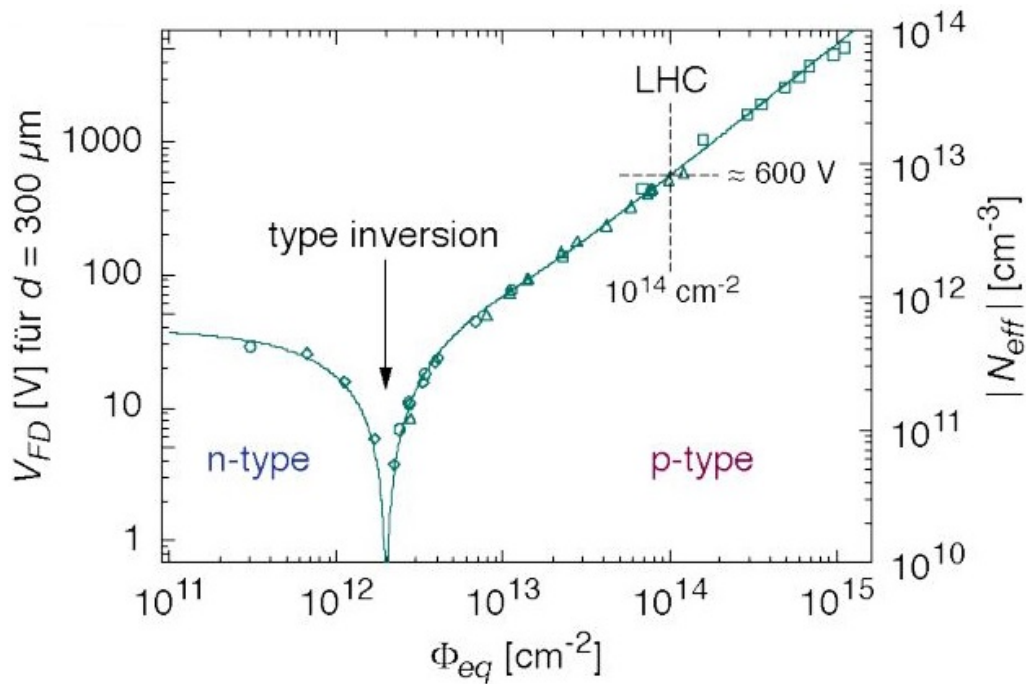


Figure 4.21: Typinversion eines n-Typ-Detektors durch Bestrahlung. Entsprechend der Änderung der effektiven Dotierungskonzentration, muss die Depletionsspannung angepasst werden [19].

Da die Depletionsspannung direkt abhängig von der effektiven Dotierungskonzentration ist, wird diese bis zum Erreichen der Typ-Inversion immer kleiner und steigt anschließend wieder an (siehe Abbildung 4.21). Die Formel zur Berechnung der Depletionsspannung zeigt den linearen Zusammenhang zur Dotierungskonzentration:

$$V_{FD} \approx \frac{e}{2\epsilon_0\epsilon_r} |N_{eff}| d^2$$

mit:

$V_{FD}$  : Depletionsspannung (full depletion voltage)

$N_{eff}$  : effektive Dotierungskonzentration

$d$  : Dicke des Sensors

Sofern man die Betriebsspannung des Sensors anpasst, bleibt dieser trotz der Typ-Inversion weiterhin einsatzfähig. Mit fortlaufender Bestrahlung steigt die benötigte Depletionsspannung jedoch immer weiter an, so dass spätestens bei Erreichen der Sensordurchbruchspannung die Einsatzmöglichkeit ein Ende findet. Dabei ist zu

beachten, dass schon vor der Durchbruchsspannung die Dunkelströme wegen der hohen Betriebsspannung massiv zunehmen und die Qualität der Messung deutlich beeinträchtigen.

N-Typ-Detektoren können theoretisch auch unterhalb der Depletionsspannung betrieben werden. Die Verarmungszone erstreckt sich dann nicht über das gesamte Substrat, so dass freie Ladungsträger im nicht depletierten Bereich rekombinieren können und verloren gehen, wodurch das detektierte Signal kleiner ist. Bei p-Typ-Sensoren ist das nicht möglich, denn diese bauen die Verarmungszone vom  $n^+$ -Bereich von der Detektorrückseite ausgehend auf, was in Abbildung 4.22 veranschaulicht ist. Damit die  $p^+$ -Auslestreifen noch ein Signal registrieren können, muss die Depletionszone bis zu eben diesen Streifen gelangen; die p-Typ-Sensoren müssen also immer vollständig depletiert sein, haben dafür aber den Vorteil, keine Typinversion zu zeigen und damit allgemein als strahlenhart zu gelten [19].

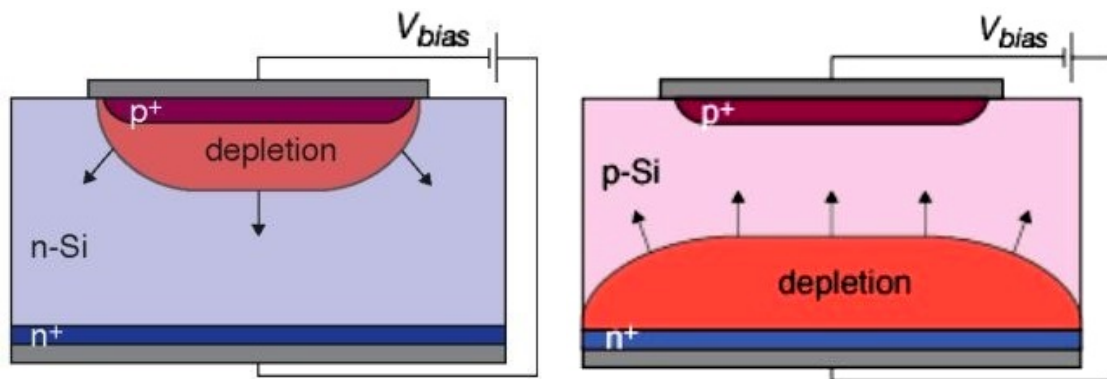


Figure 4.22: Aufbau der Depletionszone vor und nach Typ-Inversion [19].

## 5 Verwendete Geräte und Programme

In diesem Kapitel werden alle verwendeten Geräte und Programme, sowie deren jeweilige Funktionen beschrieben. In Abschnitt 5.7 wird näher auf die Dunkelbox eingegangen, in welche die Laser-Test-Station hinein gebaut wurde. Abschnitt 5.4 geht näher auf den Laser ein, mit dessen Hilfe die in Kapitel 5.6 beschriebenen Sensoren untersucht wurden. Um den Laserkopf an die gewünschte Stelle über dem Sensor zu platzieren, wurde dieser auf einem motorisierten xy-Tisch angebracht, der in Abschnitt 5.1 ausführlicher behandelt wird. Für einige Funktionen des Lasers wird ein logisches Spannungssignal benötigt, das von einem TTL-Interface (Transistor Transistor Logik) abgegriffen wird und in Part 5.5 beschrieben ist. Der xy-Tisch, sowie das TTL-Modul werden über ein selbst entwickeltes Programm angesteuert, dessen Funktion und Bedienung in Absatz 6 erläutert wird. Die benutzte Programmierumgebung des Ansteuerungsprogramms ist in Kapitel 5.2 beschrieben, der für die Datenübertragung benötigte COM-Port-Adapter in Kapitel 5.3.

### 5.1 xy-Tisch

Der xy-Tisch FCS100 (Flat Cross Stage), welcher den Laserkopf über dem Sensorboard positioniert, wurde von der Firma ITK Dr. Kassen GmbH gekauft. Er besteht aus 2 Lineartischen FLS100 (Flat Linear Stage) die im 90° Winkel zueinander zusammengebaut sind. In Abbildung 5.1 ist eine Darstellung des Kreuztisches zu sehen.

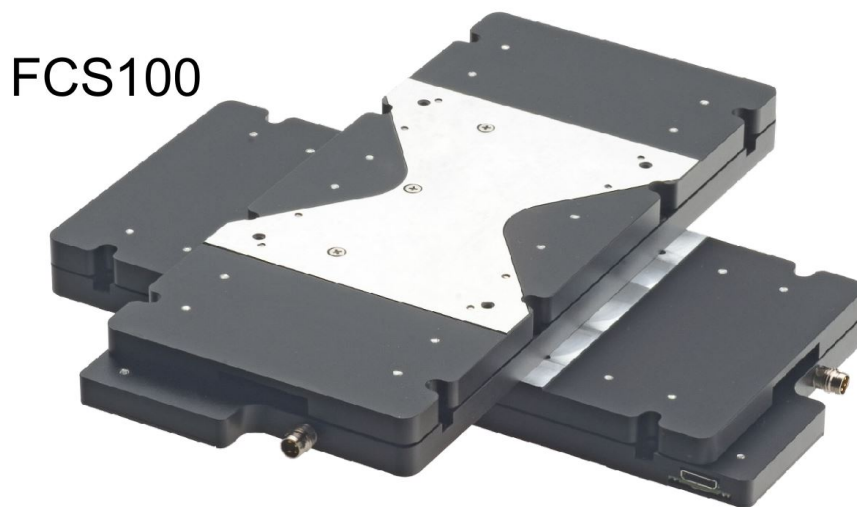


Figure 5.1: Verwendeter xy-Tisch (Flat Cross Stage), aufgebaut aus zwei senkrecht zueinander stehenden Lineartischen der Firma ITK-Kassen [23].

Die beiden Tischmodule können über ein selbst geschriebenes Programm einzeln angesteuert werden. Die jeweilige Geschwindigkeit reicht von 100 nm/s bis 500 mm/s und die Beschleunigung von  $1 \mu\text{m}/\text{s}^2$  bis  $10000 \text{ mm}/\text{s}^2$ . Besonderes Augenmerk beim Kauf wurde drauf gelegt, dass trotz des relativ großen Verfahrweges von 100 mm · 100 mm, noch eine gute Positionsaufösung von  $0.05 \mu\text{m}$ , sowie eine gute Positioniergenauigkeit von  $\pm 5 \mu\text{m}$  vorhanden ist, um aussagekräftige und wiederholbare Messergebnisse zu erhalten.

Der Kreuztisch hat in Ausgangsposition eine Länge und Breite von jeweils 233 mm, bei maximaler Auslenkung sind es jeweils 283 mm. Die Montagefläche befindet sich mit einer Fläche von  $105 \text{ mm} \cdot 105 \text{ mm}$  in der Mitte des Tisches. Mit einer Gesamthöhe (ohne Aufbauten) von 46 mm ist der FCS100 sehr flach und eignet sich somit für Anwendungen auf kleinem Raum.

Angesteuert wird der xy-Tisch von dem Hydra CM - 2 axis controller (gezeigt in Abbildung 5.2). Der Hydra Controller kann die Befehle entweder über das Ethernet oder das RS-232 Interface erhalten und leitet diese dann über den ITK Motor-Bus an die jeweiligen Tischmotoren weiter. Deren Stromversorgung wird auch vom Controller geregelt, welcher jeweils bis zu 10 A zu Verfügung stellen kann.





Figure 5.2: Verwendeter Hydra CM - 2 axis controller zur Ansteuerung des xy-Tisches [24].

### 5.1.1 Höhenverstellung

Die Höhenverstellung des Laserkopfes wird mit einem Koordinatentisch (XSB60) der Firma MiSUMi realisiert. Wegen der konstant bleibenden Brennweite des Laserkopfes, war eine automatisierte Höhenverstellung nicht zwingend erforderlich. Der verwendete Koordinatentisch ist in Abbildung 5.3 gezeigt und hat einen Verfahrweg von  $\pm 21$  mm bei einer Verfahrngenauigkeit von  $30 \mu\text{m}$  [25]. Der XSB60 wurde mit einer speziell für den Laserkopf entwickelten Halterung versehen und senkrecht auf dem xy-Tisch montiert.

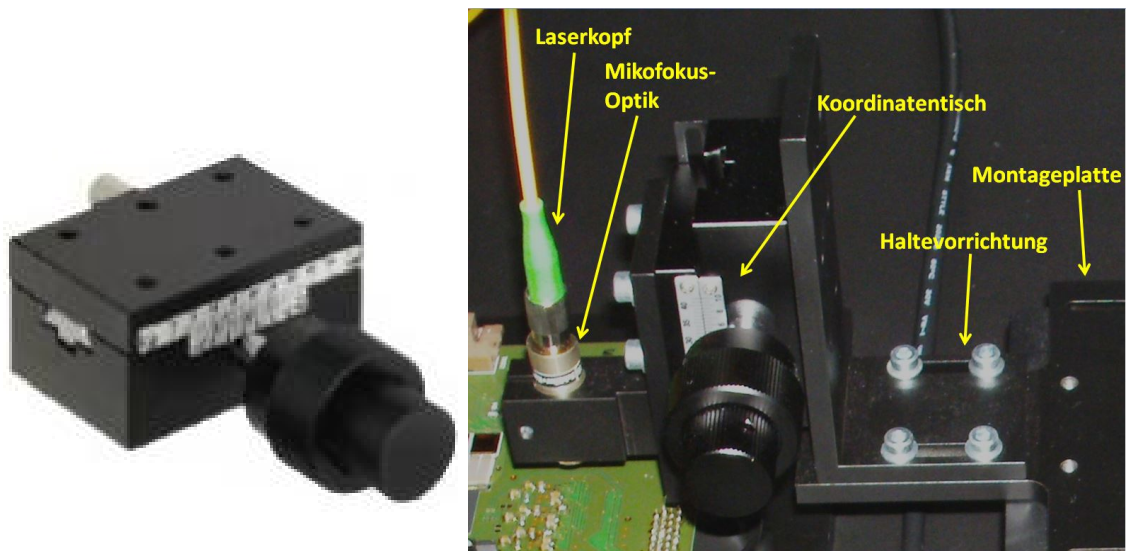


Figure 5.3: Verwendeter Koordinatentisch XSB60 von MiSUMi zur Höhenverstellung des Laserkopfes [25].

## 5.2 Borland Builder 6

Die Programme, die jeweils das TTL-Interface, den xy-Tisch sowie das Versorgungsboard (Supplyboard; siehe Kapitel 5.6) des Sensormoduls ansteuern bzw. deren Daten abgreifen, wurden mit Hilfe des Borland Builder 6 aus dem Jahr 2002 geschrieben. Er ist eine C++ Entwicklungsumgebung der Firma Embarcadero Technologies zur objektorientierten Windows-Programmierung, in der schon zahlreiche vorgefertigte Programmkomponenten vorhanden sind, welche das Arbeiten erleichtern.

## 5.3 COM-Port-Adapter

Um die Befehle an den xy-Tisch zu senden, werden die Daten über einen COM-Port an den Tisch-Controller geschickt. Da bei aktuellen Computern kaum noch COM-Ports verbaut werden, wurde ein USB-Serial-Konverter der Firma HAMA verwendet, der an den USB-Port angeschlossen und über die C++ Programme angesteuert werden kann.

## 5.4 Laser

Der verwendete Laser LDH-C Series der Firma PicoQuant ist ein gepulster Infrarotlaser mit einer Wellenlänge von 1060 nm. Der Laser wurde gezielt mit dieser Wellenlänge ausgesucht, um das Sensormaterial bestehend aus 300  $\mu\text{m}$  dickem Silizium komplett zu durchdringen und so ein geladenes Teilchen zu simulieren. Der Lasertreiber PDL 800-D, zu sehen in Abbildung 5.4, verfügt über einen internen Oszillator, welcher es ermöglicht, zwischen 12 festen Oszillationsfrequenzen von 31,25 kHz bis 80 MHz auszuwählen. Desweiteren ist ein Triggereingang vorhanden, an dem ein beliebiges (maximal 80 MHz) Oszillationssignal angelegt werden kann, falls die gewünschte Frequenz nicht vom Treiber intern geliefert werden kann.

Die Leistung eines einzelnen Laserpulses kann bis zu einem Watt betragen, wobei die maximale Durchschnittsleistung im Pulse-Mode nur etwa 20,2 mW beträgt. Wenn gewünscht, kann der Laser auch im Continuous-Wave-Modus betrieben werden, die maximale Leistung beträgt dann etwa 50,4 mW. Im gepulsten Modus wird, egal ob intern oder extern getriggert, mit jeder steigenden Oszillatorflanke ein Laserpuls ausgelöst und gleichzeitig am Sync-Out-Connector ein 6 ns Puls ausgegeben, welcher dazu genutzt wird, die Auslese des Sensorboards zu triggern.



Figure 5.4: Verwendeter Infrarot-Laser mit zugehörigem Treiber [26].

Weitergehende Anwendungen des gepulsten Betriebes ermöglicht der Gateeingang des Lasertreibers. An diesem wird ein logisches Signal angelegt. Während am Gateeingang eine logische "0" anliegt, bleibt der Laser trotz steigender Signal-

triggerflanke inaktiv; nur wenn eine logische "1" am Gateeingang vorhanden ist, feuert der Laser beim entsprechenden Triggersignal. Wichtig ist dabei, dass der Lasertreiber auch dann ein Triggersignal am Synchronisations-Output ausgibt, wenn der Laser durch das Gatesignal unterdrückt wird, wie in Abbildung 7.4 aus Kapitel 7.1 anhand einer Messung zu erkennen ist.

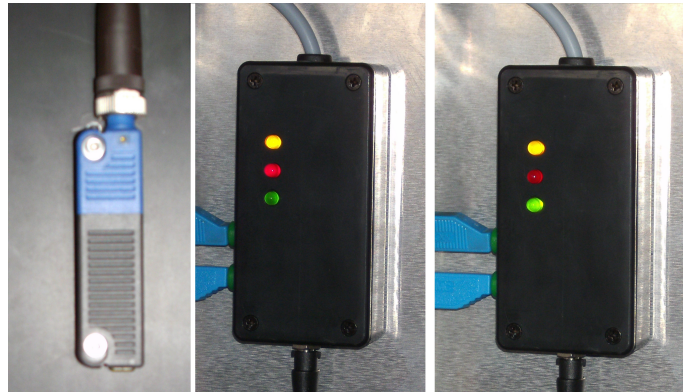


Figure 5.5: Links: Sensor, der registriert, wenn die Dunkelbox geöffnet wird. Mitte und rechts: Interlock, der den Laserbetrieb beim Öffnen der Dunkelbox unterbricht; die gelbe LED zeigt an, dass der Sensor aktiv ist, die rote/grüne LED symbolisiert, dass der Laser freigegeben/gesperrt ist.

Aus sicherheitstechnischen Gründen wurde der Remote-Interlock-Connector (zu sehen in Abbildung 5.5) des Treibers mit der Öffnung der Dunkelbox verbunden, sodass sich der Laser automatisch abschaltet, sollte während des Laserbetriebes die Box geöffnet werden. Das Laserlicht wird vom Laser über Lichtwellenleiter, wie in Abbildung 5.6 zu sehen, in die Dunkelbox zum Laserkopf geführt, wo es durch eine Mikrofokusoptik nochmals gebündelt und ausgesendet wird. Die Mikrofokusoptik stammt von der Firma Schäfer+Firchhoff und legt den Brennpunkt des Lasers auf 26,7 mm mit einer Spotgröße von 10,3  $\mu\text{m}$  fest.

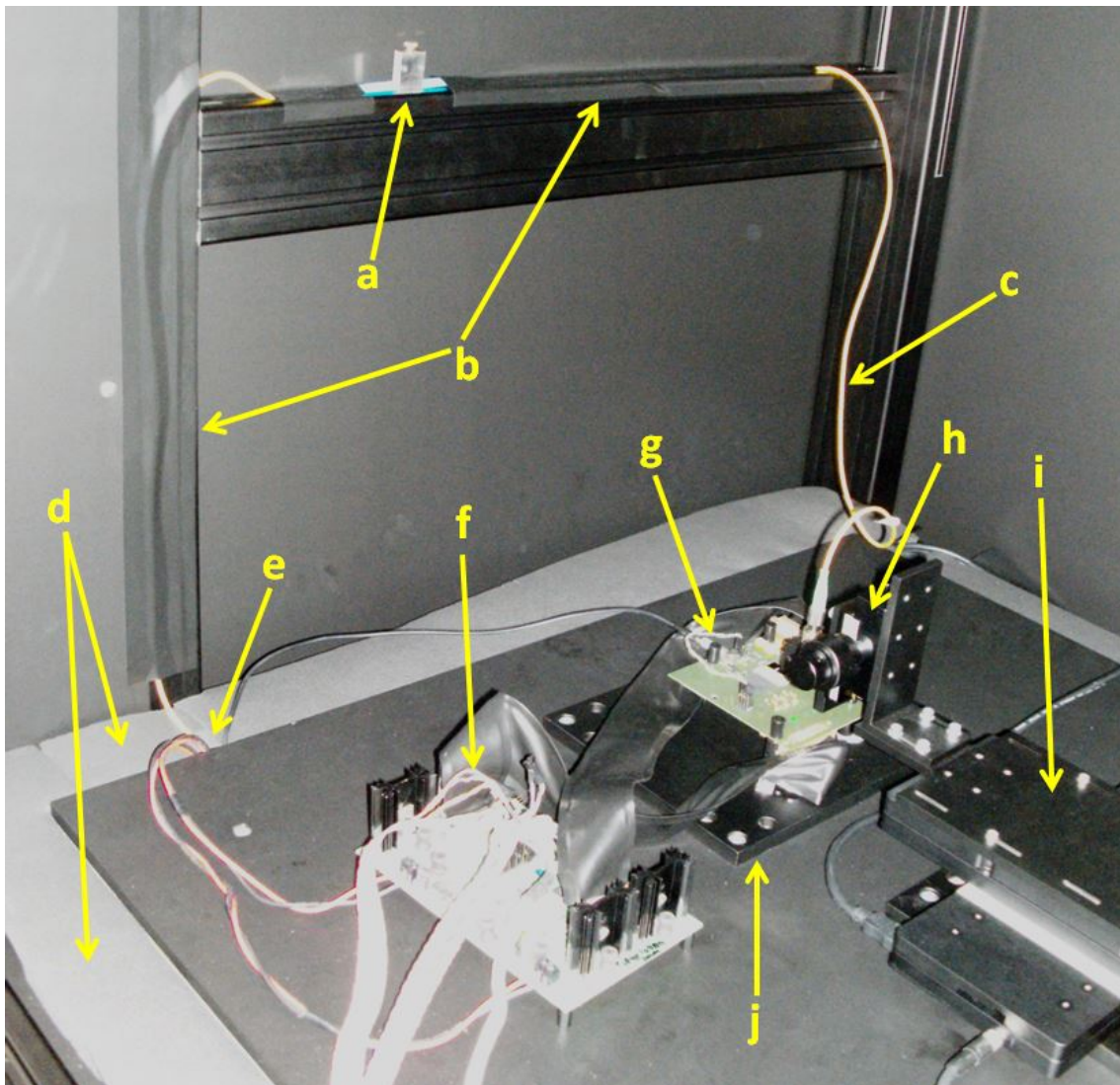


Figure 5.6: Aufnahme des Inneren der Laserbox mit eingebautem Abschwächer im Lichtleiter des Lasers: a) Abschwächer, b) mit schwarzem Tape abgeklebte Bereiche des Lichtleiters zu 1. Halterungszwecken und 2. Reduzierung reflektierender Oberflächen, c) Lichtleiter, d) Gummischaumstoff zum Abdichten, e) Zuführung einiger Kabel und des Lichtwellenleiters, f) Supplyboard des Sensorboards, g) Sensorboard, h) Koordinatentisch zur Höhenverstellung, i) xy-Tisch mit Montageplatte, j) Montageplatte des Sensorboards.

Die Intensität des Lasers kann am Treiber beliebig verändert werden. Es ist aufgefallen, dass bei einer Intensitätseinstellung von etwa 28% oder weniger die Laser-

schwelle erreicht ist, ab der der Laser abrupt inaktiv ist. Zusätzlich besteht in diesem kleinen Einstellungsbereich kein linearer Zusammenhang zwischen Intensitätseinstellung und tatsächlich gemessener Laserintensität. Deswegen wurde ein einstellbarer Abschwächer, gezeigt in Abbildung 5.6, in den Lichtleiter eingebaut, sodass der Lasertreiber bei höheren und damit linearen Intensitäten betrieben werden kann, trotzdem aber Laserlicht mit geringer Intensität auf den Sensor trifft.

## 5.5 TTL-Interface

Das TTL-Interface, zu sehen in Abbildung 5.7, ist von der Firma Deditec und wird benötigt, um ein logisches Spannungssignal von einem USB-Port abzuleiten. Zu diesen Zweck wurde ein Programm geschrieben, welches das TTL-Interface bedient. Für die Anbindung des Programms an das System, sorgt eine Programmierschnittstelle, kurz API (application programming interface), welche als Software von Deditec mitgeliefert wurde. Vor dem Einsatz des TTL-Moduls muss also die sogenannte DELIB Treiberbibliothek installiert werden. Die aktuellste Version der Software kann jederzeit auf der Herstellerseite heruntergeladen werden.

Das Signal, welches mit Hilfe des TTL-Moduls vom USB-Port abgegriffen werden kann, dient als Triggersignal für den verwendeten Laser. Für jede steigende Signalflanke, die der Lasertreiber empfängt, wird ein Laserpuls ausgesendet. Die jeweilige Spannung für die Logiksignale liefert der USB-Port. Durch eine Steckbrückenverbindung auf dem TTL-Interface kann entweder eine 5 V oder 3 V Spannung als Ausgangssignal eingestellt werden. Sollte eine andere Ausgangsspannung benötigt werden, muss diese an dafür vorgesehene Input-Pins angelegt werden. Die jeweiligen Pins des Interfaces können entweder als Input- oder Output-Pin benutzt werden, um logische Signale anzulegen oder abzugreifen.

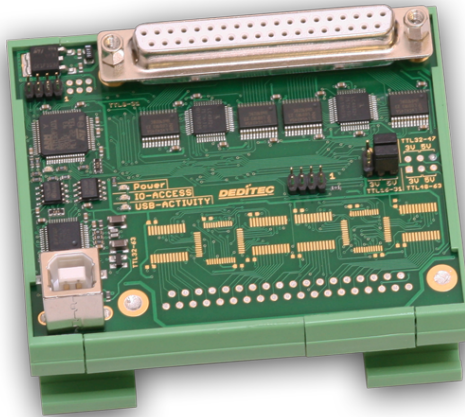


Figure 5.7: 32 Bit TTL-Interface der Firma Deditec [27].

Die maximale Frequenz, mit der an einem Pin zwischen High- und Low-Signal gewechselt werden kann, hängt von der CPU-Geschwindigkeit des programmstuernden Rechners ab und liegt bei etwa 2 kHz, was empirisch bestimmt wurde. Da diese Frequenz für Messungen eher zu klein ist, wurde das Signal an den Gate-Eingang gelegt (siehe Kapitel 5.4), während für das Triggersignal ein Funktionsgenerator verwendet wurde.

## 5.6 Verwendete Silizium-Streifendetektoren

Mittels der Laser-Teststation wurde ein doppelseitiger Silizium-Streifen-Sensor vermessen, der von ITC-irst (Center for Scientific and Technological Research) stammt. Der Sensor hat beidseitig orthogonale Streifen und verfügt über eine AC-Kopplung sowie punch-through biasing. Desweiteren sind, wie für doppelseitige Streifendetektoren üblich, auf der p-Seite eines n-Substrates  $p^+$ -Streifen implantiert, auf der n-Seite sind es  $n^+$ -Streifen. Die kapazitive Kopplung wurde mittels einer dünnen Oxidschicht realisiert. Um eine potentielle Akkumulationsschicht zu verhindern, befinden sich zwischen den  $n^+$ -Streifen p-stops. Weitere Details des Sensors finden sich in Tabelle 1. Ein Foto des Sensors ist in Abbildung 5.8 gezeigt.

Sensorbreite	:	2,082 cm
Sensordlänge	:	2,082 cm
Sensordicke	:	300 $\mu\text{m}$
Breite aktiver Bereich	:	1,92 cm
Länge aktiver Bereich	:	1,92 cm
Streifenabstand p-Seite	:	50 $\mu\text{m}$
Streifenabstand n-Seite	:	50 $\mu\text{m}$
Stereowinkel	:	90°
Anzahl Guardringe	:	1
Streifen pro Seite	:	385
Typische Depletionsspannung	:	35-60 V

Table 1: Sensordaten

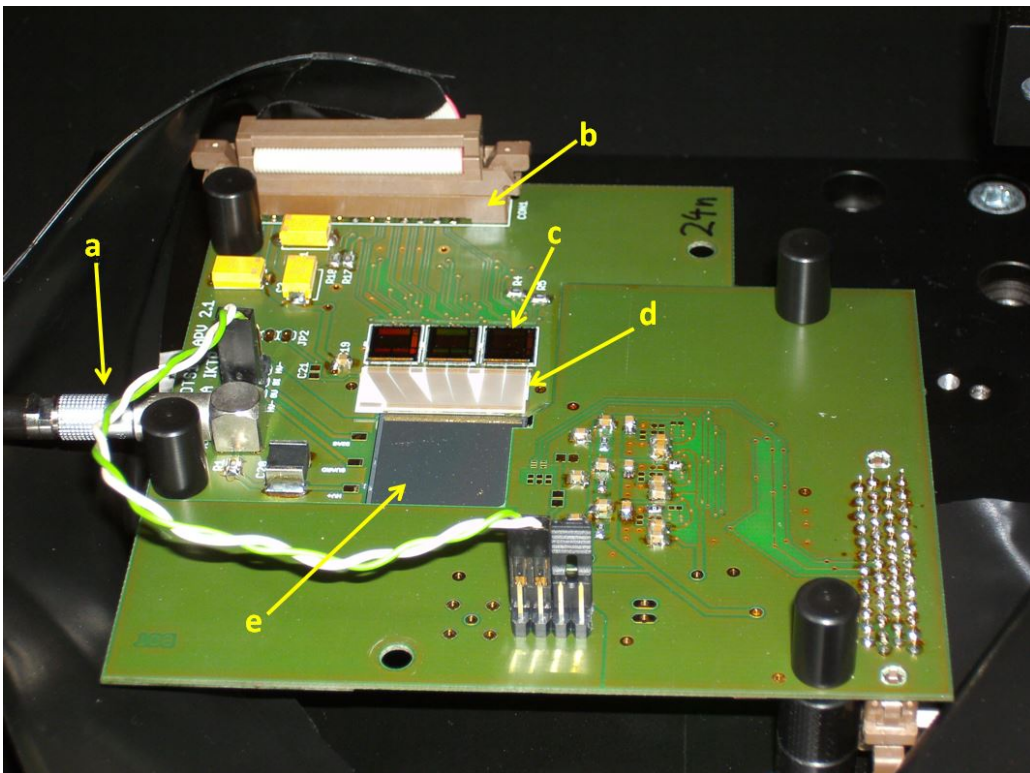


Figure 5.8: Foto des eingebauten ITC-irst Sensors; a) Hochspannungsanschluss, b) High-Density-Connector, c) APV25 Frontend-Chip, d) Pitchadapter, e) doppel-seitiger Siliziumstreifensensor.



Der auf dem Sensorboard verbaute Frontend ist der APV25. Auf einer Fläche von  $7,1 \text{ mm} \cdot 8,1 \text{ mm}$  befinden sich 128 Kanäle, von denen jeder aus einem Vorverstärker, Pulsformer und analogem Multiplexer besteht. Der High-Density-Connector (siehe Abbildung 5.8 b)) verbindet das Sensorboard mit dem Supplyboard und ermöglicht die Spannungsversorgung sowie die Kommunikation und Datenauslese [28].

## 5.7 Laser-Box

Die verwendete lichtdichte Laser-Box für den Laserteststand wurde von der universitätsinternen Werkstatt entworfen und gebaut. Das komplette Innere der Box ist mit schwarzer, nicht-reflektierender Folie überzogen, um durch Reflexion verursachte Störsignale so gut wie möglich zu vermeiden. Der xy-Tisch und der Sensor sind innerhalb der Box auf einer Tischplatte verschraubt. Unterhalb des Tisches stehen die nötigen Kontrollgeräte, wie Lasertreiber, Spannungsversorgung und Frequenzgenerator. Die jeweiligen Verbindungen zu Tisch und Laser werden unter der Tischplatte in die Dunkelbox geführt. Die Öffnungen, durch die die Verbindungen laufen, wurden mit schwarzem Gummischaumstoff abgedichtet, um Lichteinflüsse zu vermeiden. Da die Kontrollgeräte nicht innerhalb des lichtdichten Bereiches stehen, kann während des Betriebes jederzeit der jeweilige Gerätestatus überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Eine Aufnahme des unteren Teils der Laserbox mit den verwendeten Geräten ist in Abbildung 5.9 gezeigt.

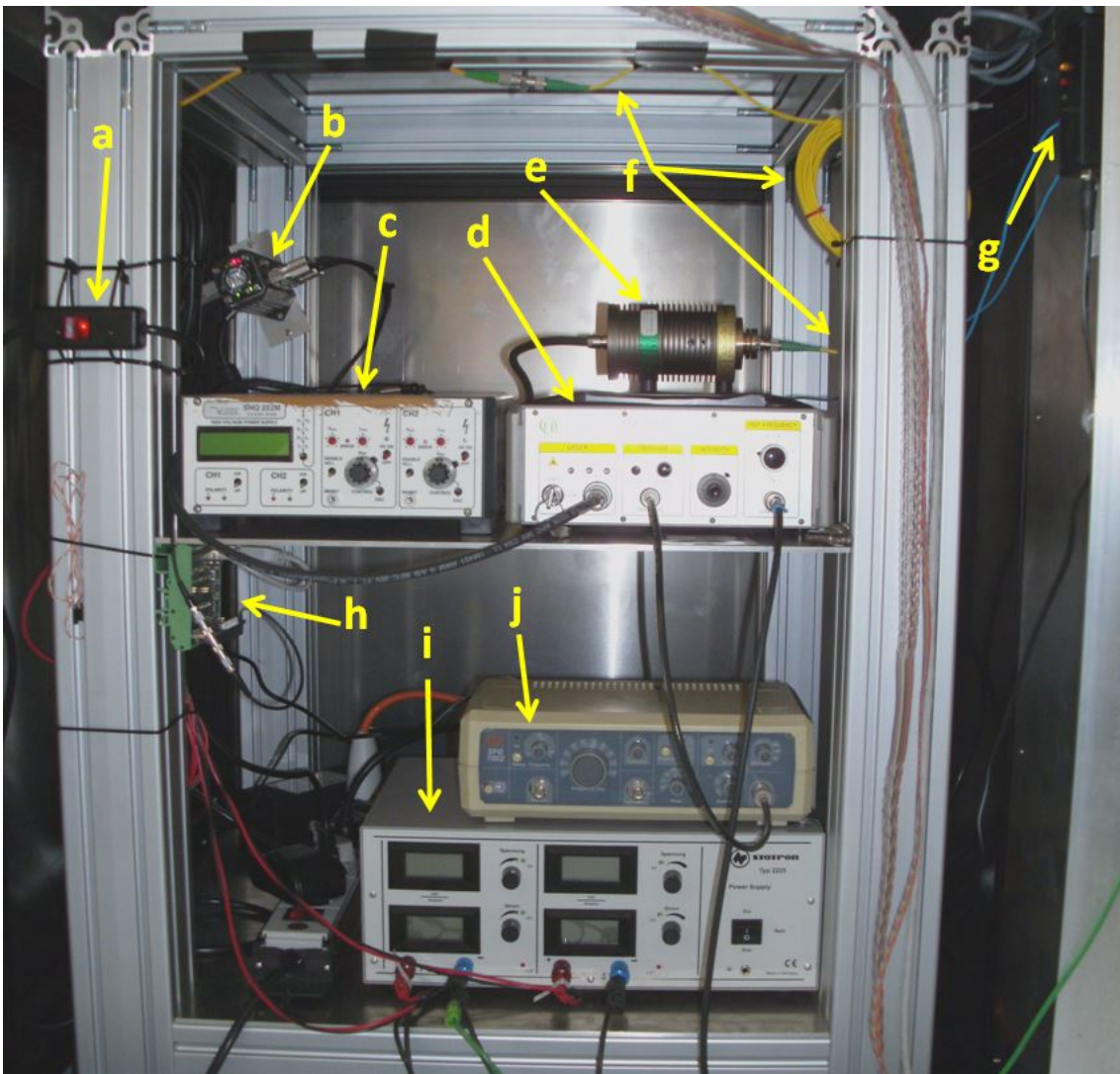


Figure 5.9: Unterer Teil der Laserbox mit den jeweiligen Kontrollgeräten: a) Hydra-Controller-Powerschalter, b) Hydra-Controller, c) Hochspannungsversorgung, d) Lasertreiber, e) Laser, f) Laser-Lichtleiter, g) Interlock für den Lasertreiber, h) TTL-Modul, i) Niederspannungsversorgung, j) Frequenzgenerator.

Abbildung 5.10 zeigt einen Gesamtüberblick des Inneren des lichtdichten Bereichs der Dunkelbox. Der xy-Tisch und das Sensorboard wurden fest verschraubt, während das Supplyboard ohne spezielle Befestigung in der Box untergebracht wurde. Alle Leitungen und Kabel wurden unterhalb der Montageplatte in den abgebildeten Bereich hineingeführt. Der zum Abdichten verwendete Gummischaumstoff ist elastisch und wurde mit etwas Druck unter die Montageplatte geklemmt; lediglich für den

Laser-Lichtleiter wurde ein kleiner Spalt frei gelassen, um jeglichen mechanischen Stress für den empfindlichen Lichtleiter zu vermeiden.

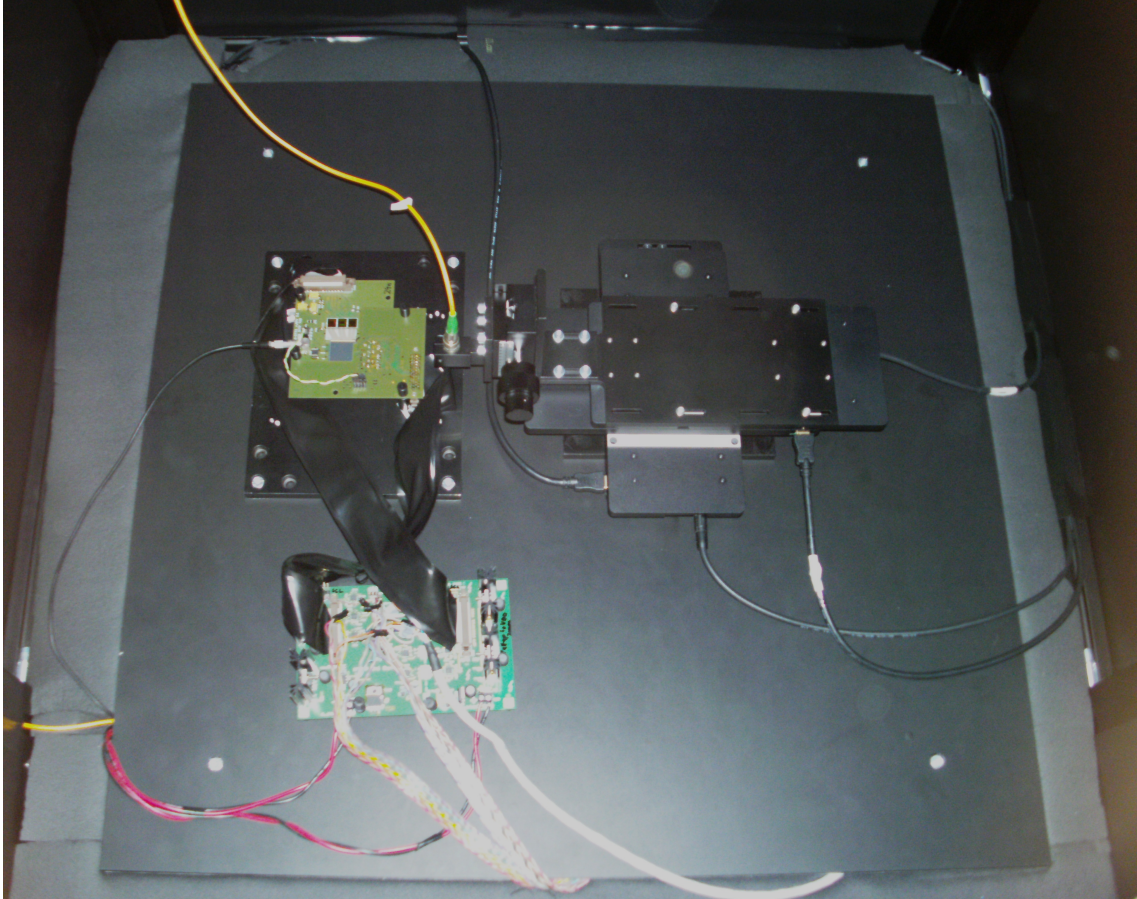


Figure 5.10: Gesamtübersicht des oberen Teils der Laserbox mit Sensor, Supplyboard, Laserkopf und xy-Tisch.



## 6 Steuerungsprogramm

Eine der Aufgaben dieser Thesis war die Entwicklung eines zusammenhängenden Programms zur Ansteuerung des für die Teststation verwendeten xy-Tisches und des TTL-Moduls. Den größten Teil des Programms hat dabei die Ansteuerung des xy-Tisches in Anspruch genommen. Abbildung 6.1 zeigt eine Gesamtübersicht der programmierten Bedienoberfläche. Sie ermöglicht umfangreiche Bewegungsabläufe für den xy-Tisch und das Einstellen wichtiger Parameter, wie zum Beispiel die Geschwindigkeit oder Beschleunigung. Aktueller Status und Position des Tisches werden dem Benutzer durchgehend vom Programm mitgeteilt. Desweiteren hat der Benutzer die Möglichkeit die 32 Pins des TTL-Moduls zu bedienen. Relevante Informationen über die einzelnen Pins, wie Status oder eingehende/ausgehende Signale werden stets angezeigt.

Erstellung und Bedienung des Programms sind im Anhang A gezeigt ist.

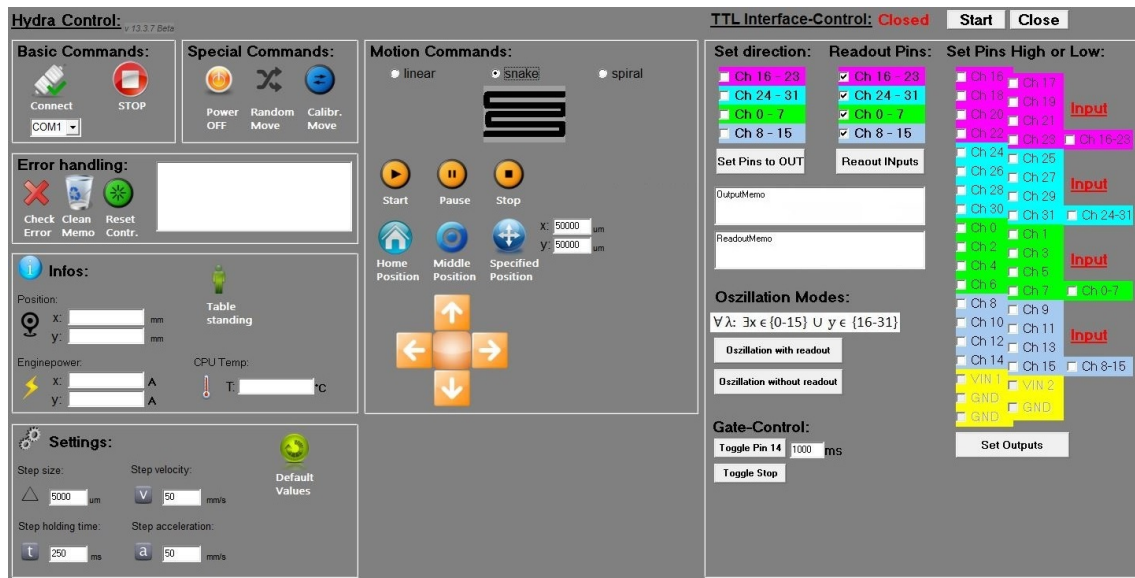


Figure 6.1: Gesamtübersicht der programmierten Bedienoberfläche zur Ansteuerung des xy-Tisches sowie des TTL-Moduls.



## 7 Messungen

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Messungen sowie deren Ergebnisse vorgestellt. Die ersten Messungen wurden an dem verwendeten Laser durchgeführt, um seine Funktionstauglichkeit einzuschätzen. Abschließend wurde nach Fertigstellung des Laserteststands eine Messung durchgeführt, die das erfolgreiche Zusammenspiel aller verwendeter Geräte deutlich macht.

### 7.1 Laser-Testmessungen

Bei den ersten durchgeführten Versuchen sollte der Laser und dessen Funktionen getestet werden. Da sich die Laserwellenlänge mit 1060 nm nicht mehr im sichtbaren Spektrum befindet, wurde zur Visualisierung ein MPPC (multi-pixel photon counter) verwendet. Der MPPC stammt von der Firma HAMAMATSU und ist aus zahlreichen, parallel geschalteten Avalanche-Photodioden (APD) mit einem Pixel-pitch von 25  $\mu\text{m}$  aufgebaut. Die effektiv sensitive Fläche beträgt 1  $\text{mm}^2$ . Der Aufbau der ersten Testreihen ist in Abbildung 7.1 gezeigt.

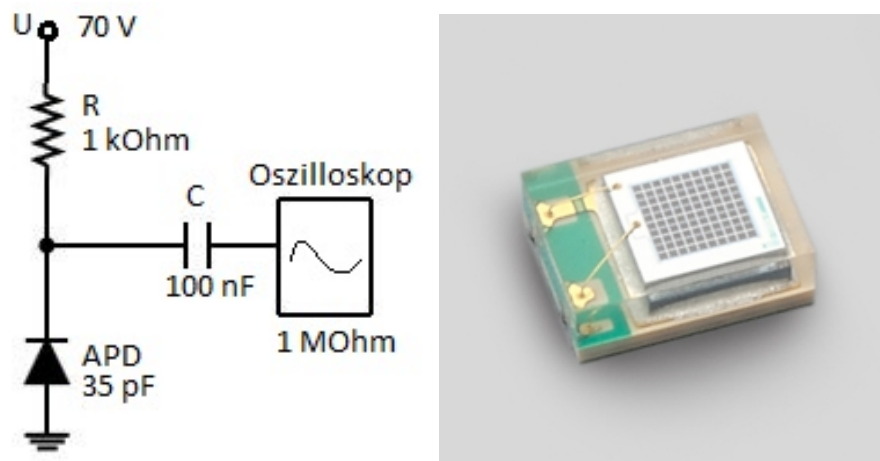


Figure 7.1: Links: Schaltung zur Realisierung der ersten Messungen; rechts: Abbildung des verwendeten MPPCs [29].

Schon die ersten Versuche zeigten, dass der Laser im geringen Leistungsbereich nicht zuverlässig arbeitet. Wie in Kapitel 5.4 bereits angesprochen, ist die Laserschwelle

bei einer Intensitätseinstellung von etwa 28% erreicht. In Abbildung 7.2 ist eine Messung bei einer eingestellten Laserintensität von 28% (also die kleinstmögliche) gezeigt. Wie man sieht, liegt das gemessene Signal noch deutlich über dem Untergrundrauschen. Da der fertige Teststand Sensoren charakterisieren soll, die auch sehr geringe Strahlungsleistungen bis hin zu einzelnen Photonen vermessen können, ist eine geringere Leistungseinstellung des Lasers wünschenswert. Zusätzlich wurde in den Messungen deutlich, dass bei den beschriebenen Einstellungsbereichen kein linearer Zusammenhang zwischen eingestellter Intensität und tatsächlich gemessener Laserintensität besteht, was für künftige Messreihen eine ungünstige Voraussetzung ist. Um den linearen Zusammenhang beizubehalten, wurde eine höhere Intensitätseinstellung gewählt; dabei zeigte sich, dass schon im mittleren Einstellungsbe-  
reich deutlich mehr Ladungsträger im Sensor erzeugt werden, als durch ionisierende Teilchen, doch eben solche Teilchen sollen künftig simuliert werden. Um diese Probleme zu beheben, wurde der in Kapitel 5.4 bereits besprochene, einstellbare Abschwächer in den Lichtleiter eingebaut. So kann der Lasertreiber bei höheren und somit linearen Leistungseinstellungen betrieben werden, während der Sensor Laserlicht mit nur geringer Intensität empfängt.

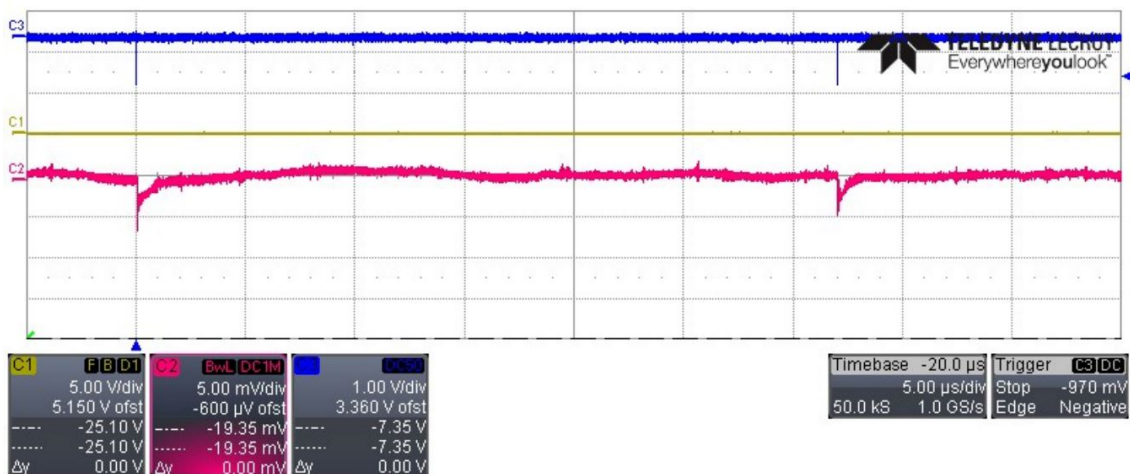


Figure 7.2: Messung des Lasersignals bei kleinster Leistungseinstellung, die noch ein Lasersignal aussendet. Die drei Signale sind dabei C3 = Sync-Output, C1 = Gatesignal (hier nicht verwendet) und C2 = Lasersignal.



Der Lasertreiber kann sowohl über ein internes, als auch über ein extern an den Triggereingang angeschlossenes Oszillatorsignal gepulst werden. Wird ein externes Signal verwendet, ist darauf zu achten, dass das Triggerlevel entsprechend angepasst wird. Je nach "Qualität" des externen Signals kann der Lasertreiber ein einzelnes Signal auch als mehrere interpretieren und deshalb bei jedem Trigger mehrfach feuern. Eine entsprechende Messung, die das verdeutlicht, ist in Abbildung 7.3 gezeigt. Bei dieser Messreihe wurden bei gleichbleibendem externen Triggersignal das Triggerlevel verändert, sodass je nach Einstellung einer, zwei oder drei Pulse abgegeben wurden.

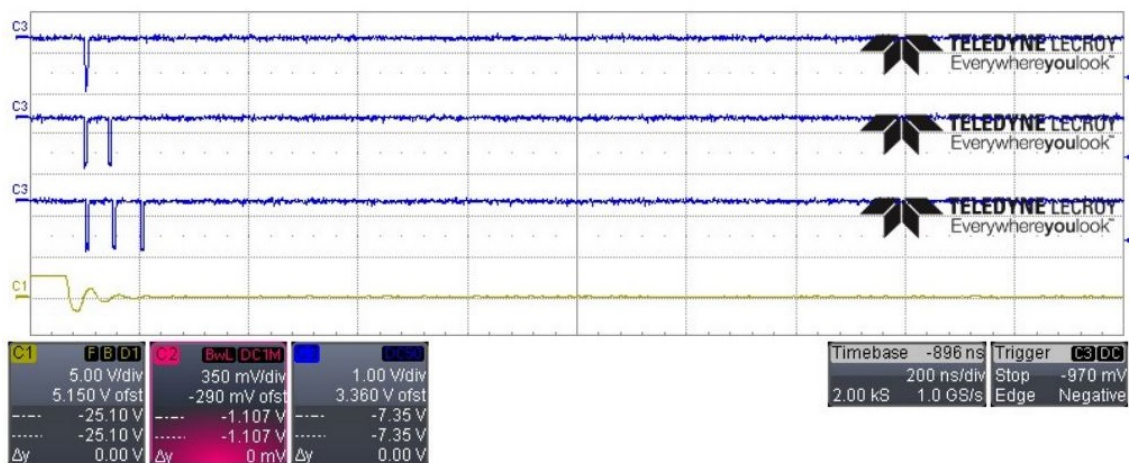


Figure 7.3: Vergleich der Sync-Output-Signale (C3) für verschiedene Triggerlevel-Einstellungen bei gleichbleibendem Triggersignal (C1), welches vom TTL-Modul generiert wurde.

Wie in Kapitel 5.4 bereits angesprochen, ermöglicht der Gateeingang des Lasertreibers weitergehende Anwendungen des gepulsten Betriebes. An den Gateeingang wird ein logisches Signal angelegt. Liegt eine logische "1" an, feuert der Lasertreiber mit der Frequenz, die intern oder extern vorgegeben wird. Bei einer logischen "0" am Gateeingang wird das Triggersignal vernachlässigt und der Laser bleibt inaktiv. Tests dieser Funktion haben ergeben, dass auch dann, wenn durch eine "0" am Gateeingang der Laser nicht feuert, vom Treiber dennoch das Triggersignal am Synchronisations-Output ausgegeben wird, was in Abbildung 7.4 gezeigt ist. Man

sieht, dass nur dann ein Laserpuls registriert wird, wenn ein entsprechendes Gatesignal anliegt, wobei der Synchronisations-Output durchgehend Pulse ausgibt. Da beim fertigen Aufbau des Laser-Teststandes, der Synchronisations-Ausgang als Triggersignal für das Auslesen des Sensorboards benutzt wird, muss eben dieses Verhalten des Treibers beachtet werden.

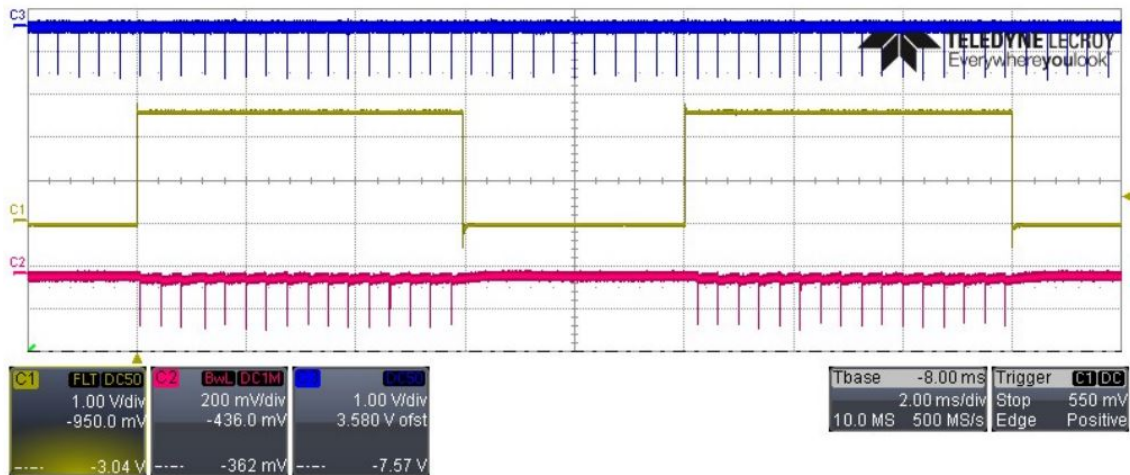


Figure 7.4: Messung des Lasersignals mit Hilfe einer Diode, bei angelegtem Gate-Signal. Die drei Signale sind dabei C3 = Sync-Output, C1 = Gatesignal und C2 = Lasersignal

Außerdem muss beim Triggern der Sensorauslese durch den Lasertreiber berücksichtigt werden, dass zwischen dem empfangenen und ausgegebenem Triggersignal des Lasertreibers eine Zeitdifferenz besteht. Diese wurde gemessen und ist in Abbildung 7.5 dargestellt. Man erkennt, dass knapp 50 ns nachdem der Lasertreiber das Triggersignal empfangen hat, am Synchronisations-Ausgang der entsprechende Puls ausgegeben wird. Bis vom MPPC der Laserpuls registriert wird, vergehen etwa weitere 50 ns.

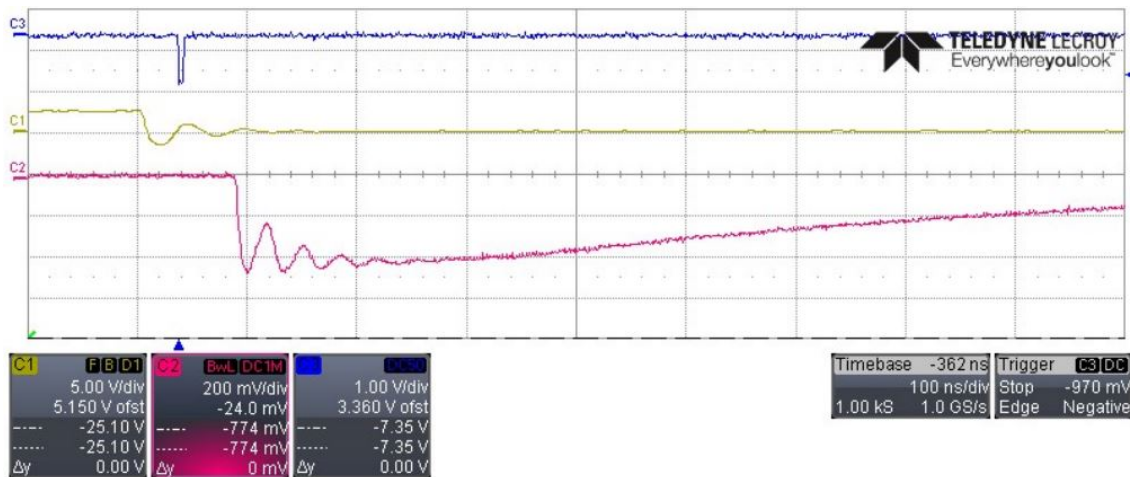


Figure 7.5: Zeitdifferenz zwischen Lasertrigger C1, Sensortrigger C3 und Pulsregistrierung C2 durch den MPPC.

## 7.2 Messungen mit fertigem Aufbau

Nachdem das Steuerungsprogramm fertig geschrieben und der Laser-Teststand mit den zugehörigen Geräten aufgebaut war, wurde erstmals ein Sensorboard vermessen. Teile der aufgenommenen Daten sind in Abbildung 7.6 gezeigt. Dargestellt ist die aktive Sensorfläche. Die farblichen Abstufungen sind dabei ein Maß für die Häufigkeit von registrierten Ereignissen, wobei die Ereignisrate von Blau zu Grün ansteigt. Die Fenster rechts und unterhalb des gezeigten aktiven Bereiches geben die registrierten Ereignisse jedes der 384 senkrechten und waagerechten Streifen an. Der xy-Tisch sollte während der Messung (durchgeführt mit einer Pulsfrequenz von 100 Hz) eine Spiralbewegung ausführen, was, wie man an den Daten deutlich erkennen kann, auch geglückt ist.

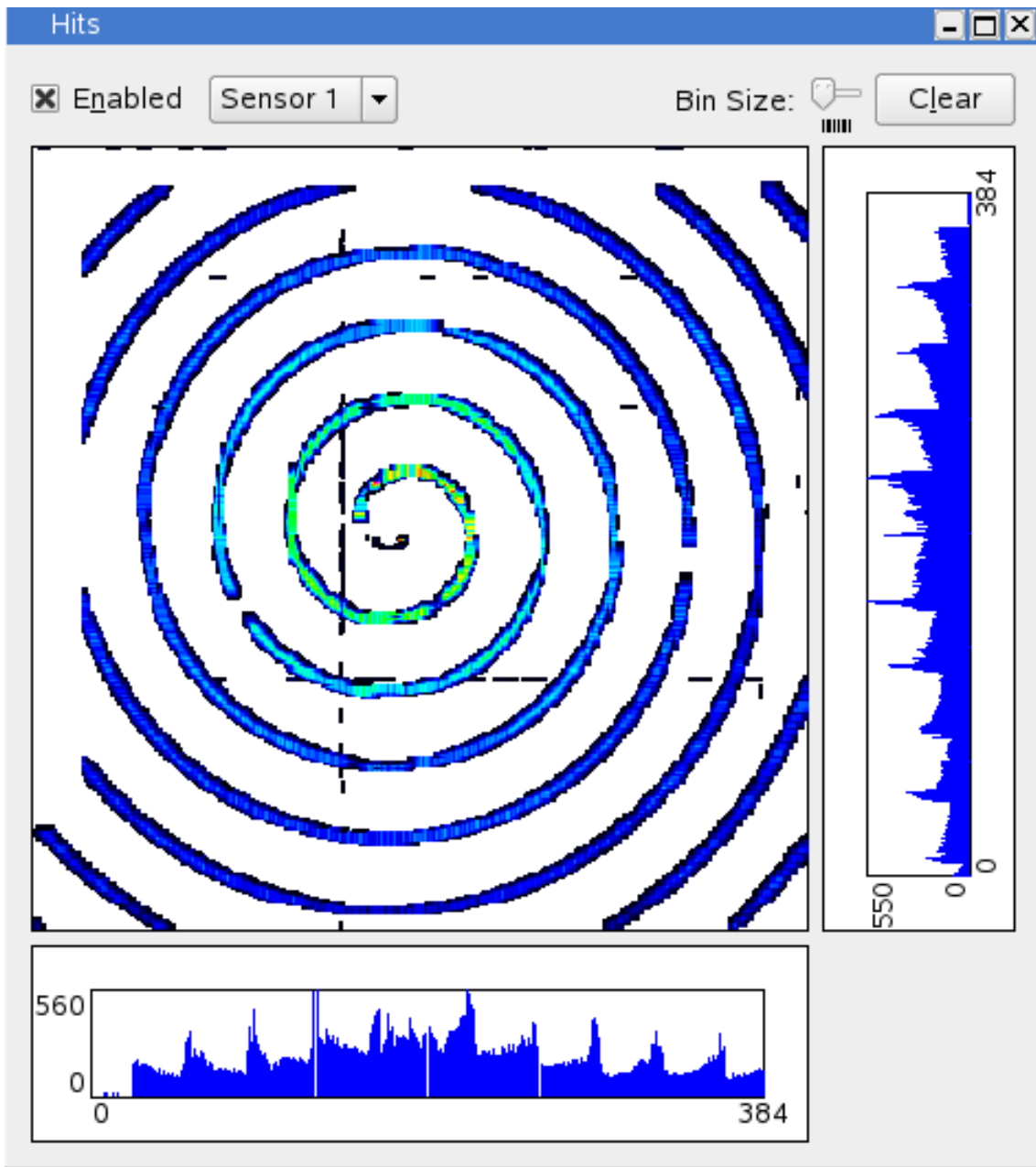


Figure 7.6: Erste durchgeführte Messung nach Fertigstellung des Laser-Teststands. Die vom Programm vorgegebene Spiralbewegung des Tisches wurde erfolgreich erfasst.

In einer anschließenden Messreihe (durchgeführt mit einer Pulsfrequenz von 100 Hz) wurde der Laserkopf in  $5\text{ }\mu\text{m}$ -Schritten in x-Richtung über den Sensor gefahren. Dabei wurde anhand der Signalstärken der einzelnen Auslestreifen die Bewegung

des Tisches am Programm verfolgt. Da es sich um einen doppelseitigen Streifensensor handelt, dessen Auslestreifen von p- und n-Seite senkrecht zueinander stehen, konnte die Bewegung nur auf den Streifen der n-Seite registriert werden, da diese senkrecht zur Bewegungsrichtung standen. Weil die Bewegung des Tisches parallel zu den p-Streifen war, haben dort immer die gleichen Streifen das Signal registriert. Für 5 verschiedene Koordinaten des Tisches, die jeweils etwa  $20\ \mu\text{m}$  auseinander standen, wurden die gemessenen Intensitäten der n-Streifen gegen die Kanalnummern geplottet (die Kanalnummern entsprechen den Streifennummern). Die einzelnen Plots befinden sich im Anhang A.3. In Abbildung 7.7 wurden dann die Intensitäten aller 5 Koordinaten gemeinsam gegen die Kanalnummern aufgetragen. Durch die Datenpunkte jeder der 5 Koordinaten wurde ein Gaußfit gelegt; die Fitparameter können im Anhang A.4 eingesehen werden. Vergleicht man in Abbildung 7.7 die Gaußkurven mit den Kanalnummern, fällt auf, dass das Signal (welches die Ladungsverteilung der Streifen pro Position der Laserpulse wiedergibt) etwa um 1,5 Auslestreifen gewandert ist (Start ca. bei Kanalnummer 181,5 bis zu Kanalnummer 183). Der exakte (von Steuerungsprogramm vorgegebene) Verfahrensweg des Tisches von der ersten ausgewählten Koordinate bis zur letzten betrug exakt  $75\ \mu\text{m}$ . Mit einem Streifen-Pitch von  $50\ \mu\text{m}$  (siehe Kapitel 5.6) sollte das Signal also über etwa 1,5 Streifen gewandert sein, was anhand der Messdaten auch bestätigt werden kann.

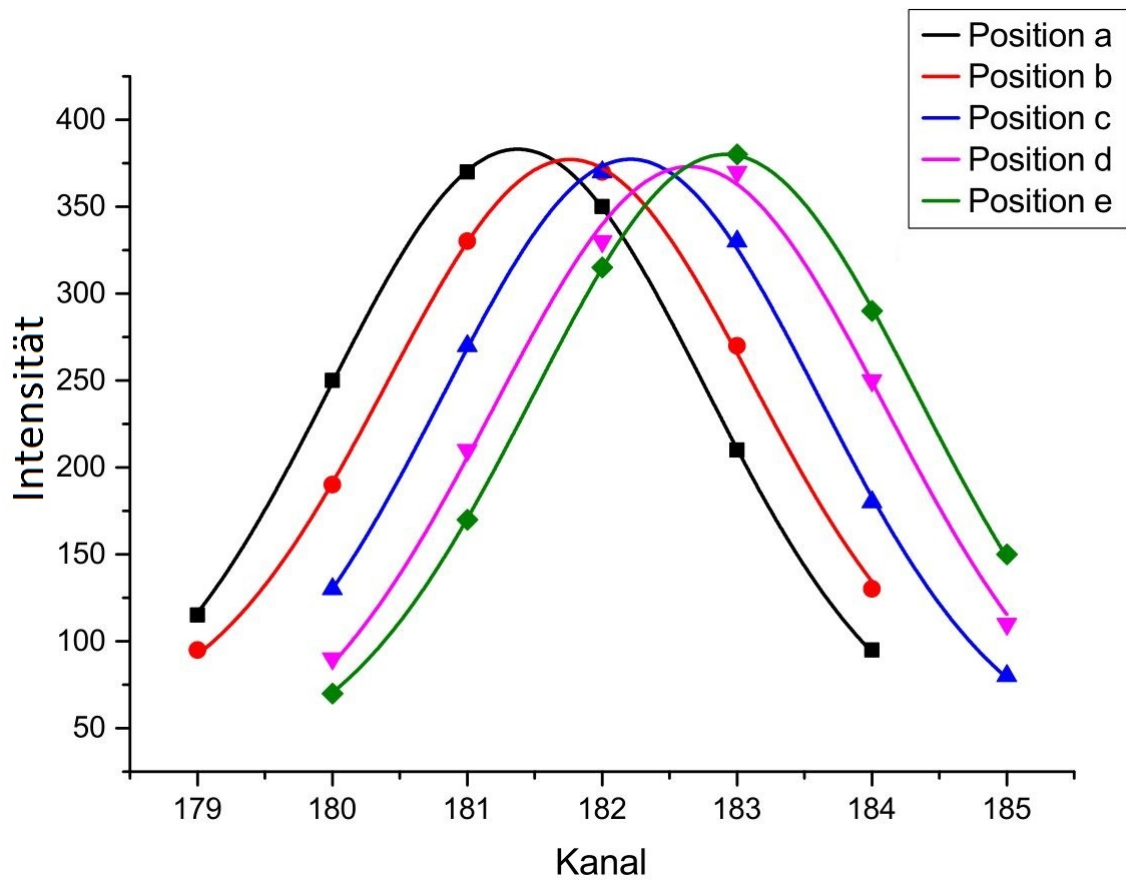


Figure 7.7: Die Intensitäten der 5 Koordinaten gegen die Kanalnummern geplottet. Die einzelnen Positionen entsprechen folgenden Tischkoordinaten in mm: Position a = (87,015|51,000); Position b = (87,030|52,000); Position c = (87,055|52,000); Position d = (87,075|52,000); Position e = (87,090|52,000).

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Masterthesis wurde ein Infrarot-Laser-Teststand zum Vermessen von Silizium-Streifen-Detektoren entwickelt.

Der verwendete Infrarot-Laser wurde ausführlich getestet und mittels Mikrofokus-Optik und Abschwächer für die vorgesehenen Aufgaben optimiert. Das nötige Triggersignal liefert ein externer Funktionsgenerator, während der Gateeingang des Lasertreibers vom TTL-Modul angesteuert wird.

Die Positionierung des Laserkopfes über den Streifen-Detektor übernimmt der xy-Tisch, der speziell wegen seines flachen Aufbaus und seiner sehr guten Positioniergenauigkeit, für diese Anwendung ausgewählt wurde.

Angesteuert werden Tisch und TTL-Modul über ein selbst geschriebenes Programm. Erstellung und Optimierung des Programms waren Hauptbestandteil dieser Thesis. Der gesamte, teils aufwändige Kommunikationsmechanismus zwischen Programm und Tisch bzw. TTL-Modul wurde in eigenen Programmklassen zu vereinfachten Befehlesfunktionen zusammengefasst. Mit Hilfe der kommentierten Klassen lassen sich künftige Änderungen oder gar Neuerstellungen des Programms leicht bewerkstelligen, da lediglich die Funktionen aufgerufen werden müssen, die alles Weitere automatisch abwickeln.

Für das Steuerungsprogramm wurde eine Bedienoberfläche erstellt, die alle nötigen Kommandos von Tisch und TTL-Interface vereint und eine intuitive Handhabung ermöglicht.

Nach der Fertigstellung des Programms und Abschluss der Tests aller verwendeten Geräte und Komponenten, wurde die Hardware in die Laser-Box eingebaut. Sensor und Supplyboard wurden gemeinsam mit xy-Tisch und Laserkopf in den lichtdichten Bereich eingebaut. Es wurde darauf geachtet, reflektierende Oberflächen auf ein Minimum zu reduzieren, um den Einfluss von Reflexionen auf die Messungen zu vermeiden. Zusätzlich wurde der Zulauf für die Strom- und Datenverbindungen gesondert mit schwarzem Gummischaumstoff abgedichtet, um jegliches Eindringen von Licht zu verhindern.

Abschließende Tests des fertigen Teststands haben dessen Funktionstauglichkeit

bestätigt, sodass künftigen Messungen von Silizium-Streifen-Detektoren nichts mehr im Wege steht.



## 9 Danksagung

In erster Linie möchte ich mich bei Prof. Dr. Kai-Thomas Brinkmann für die Möglichkeit der Bearbeitung dieses spannenden Projektes bedanken.

Desweiteren gilt mein Dank der fantastischen Arbeitsgruppe derer ich Teil werden durfte.

Besonders Bedanke ich mich bei:

Dr. Hans-Georg Zaunick, für die Betreuung meiner Arbeit, sowie für die kompetente Beratung und Hilfsbereitschaft bei jeder meiner Fragen und Probleme,

Robert Schnell, für seine nützliche Hilfestellung und Einführung in die Bedienung verschiedenster Geräte,

René Schubert, der zur Lösung hardwaretechnischer Probleme stets beigetragen hat,

und Andreas Pitka, der stets hilfsbereit zu Diensten stand.

Besonderer Dank gilt auch meinen Eltern, sowie meiner Freundin Helen Rahn, für ihrer vielfältigen Unterstützung und Geduld.



## A Anhang

### A.1 Tischsteuerung

#### A.1.1 Der Quellcode

Die Datenübertragung vom Programm zum xy-Tisch erfolgt mittels RS232 Interface. Die gewünschten Befehle werden als Daten-String an den Hydra-Controller geschickt, der diese entsprechend interpretiert und ausführt. Je nach Befehl wird ein erwarteter Antwort-String zurückgeschickt.

Jede Kommunikation des Programms mit dem Hydra-Controller findet über geschriebene Programm-Funktionen statt. Jede vom Controller bzw. vom Tisch ausführbare Aktion wird durch eine eigene Funktion aufgerufen. In dem Quellcode sind zwei Hauptfunktionen enthalten, die für die komplette Datenübertragung (entweder Lesen oder Schreiben) verantwortlich sind. Diese Hauptfunktionen werden vom Programm und seiner Benutzeroberfläche durch Unterfunktionen aufgerufen, die den gewünschten Befehl enthalten. Zum besseren Verständnis werden im Folgenden die zwei Hauptfunktionen, sowie auch zwei Unterfunktionen an einem Beispiel verdeutlicht.

#### **Schreib-Befehle:**

Abbildung A.1 zeigt die sogenannte "WriteCommand"-Funktion; einen Ausschnitt des Codes, der für die Übertragung der "Schreib-Befehle" an den Controller verantwortlich ist. Die "Schreib-Befehle" sind Unterfunktionen, welche die Funktion "WriteCommand" aufrufen und ihr die zu übertragenden Daten übermitteln. "WriteCommand" befüllt einen String der Reihe nach mit den entsprechenden Daten, die aus drei Teilen bestehen. An erster Stelle steht der Parameter, welcher die genauen Daten (zum Beispiel eine Position oder Geschwindigkeit) des Befehls enthält. An zweiter Stelle folgt die Adresse, die eine der beiden Tisch-Achsen anspricht und an dritter Stelle steht das Kommando, das ausgeführt werden soll. Ist der String vollständig, wird er an den Controller geschickt und die Unterfunktion erhält eine interne (für den Benutzer also nicht sichtbare) Erfolgsmeldung. Der String kann nur übermittelt werden, wenn auch eine Verbindung zum Controller vorhanden ist, deswegen überprüft das "WriteCommand", noch bevor der String generiert wird,

ob eine Verbindung besteht. Ist das nicht der Fall, erhält die Unterfunktion eine interne Fehlermeldung.

```
bool Hydra::WriteCommand(float parameter, int address, const AnsiString& commando)
{
    if (connected==false) return false;
    else
    {
        AnsiString str="";
        str+=FloatToStr(parameter)+" "+IntToStr(address)+" "+commando+" \r\n";
        err=RS232_SendBuf(fComPort, str.c_str(), str.Length());
        Sleep(25);
        return true;
    }
}
```

Figure A.1: Codefragment, welches die Schreib-Befehle ausführt.

Ein Antwortstring wird bei der Funktion "WriteCommand" nicht erwartet. Sie ist nur zuständig für Befehle (also Unterfunktionen), wie zum Beispiel das Setzen von Geschwindigkeiten oder Zielkoordinaten, die keinen Rückgabewert benötigen.

#### **Unterfunktion der Schreib-Befehle:**

Abbildung A.2 zeigt ein Beispiel eines solchen Befehls, der wie alle Befehle durch eine Unterfunktion definiert wird. Um dem Controller zum Beispiel eine Zielkoordinate zu übermitteln, die von der x-Achse angefahren werden soll, benutzt man die Unterfunktion "set\_coord\_x". Sie wird mit dem gewünschten Parameter (in diesem Fall die Koordinate) aufgerufen und prüft als erstes, ob der Wert des Parameters in den durch den Fahrbereich des Tisches vorgegebenen Grenzen (also zwischen 0 mm und 100 mm) liegt. Liegt der Wert innerhalb des geforderten Rahmens, ruft "set\_coord\_x" die Hauptfunktion "WriteCommand" auf. Ihr wird die Koordinate als Parameter, "1" als Adresse (also die x-Achse) und "nm" als Kommando (nm befiehlt das Anfahren einer Zielkoordinate) übergeben. Wie oben beschrieben wandelt die Hauptfunktion sämtliche Daten in einen String um und schickt diesen an den Controller. Nach der Datenübermittlung erwartet die Unterfunktion eine Erfolgsmeldung der Hauptfunktion. Trifft diese Erfolgsmeldung nicht ein, oder befindet sich die Zielkoordinate nicht im vorgegebenen Rahmen, schickt die Unterfunktion

eine interne Fehlermeldung an das Programm, welches dem Benutzer dann einen Hinweis zukommen lässt.

```
bool Hydra::set_coord_x(double Coordinate)
{
    if (Coordinate >= 0. && Coordinate <= 100.)
    {
        bool success = WriteCommand(Coordinate,1,"nm");
        if (success) return true;
        else return false;
    }
    else return false;
}
```

Figure A.2: Codefragment, welches die Zielkoordinate in x-Richtung setzt.

### **Lese-Befehle:**

Ein Code-Abschnitt mit einer weiteren Hauptfunktion, welche auch Daten an den Controller schicken soll, ist in Abbildung A.3 gezeigt. Es handelt sich um die sogenannte "ReadCommand"-Funktion, die im Gegensatz zur "WriteCommand"-Funktion auch einen Antwort-String vom Controller erwartet. Das "ReadCommand" wird von Unterfunktionen ("Lese-Befehlen") aufgerufen, welche Daten über den xy-Tisch ausgeben sollen. Genau wie beim "WriteCommand" werden beim "ReadCommand" die Anweisungen als String an den Controller geschickt. Nun besteht dieser String aber nur noch aus zwei Teilen, zum einen aus der Adresse und zum anderen aus dem Kommando. Ein Parameter ist hier nicht vorhanden.

Nach dem Senden des Befehl-Strings empfängt das "ReadCommand" die Antwortdaten, die nacheinander in einen Antwort-String geschrieben werden. War das Senden und Empfangen der Daten erfolgreich, übermittelt die Hauptfunktion eine Erfolgsmeldung samt Antwort-String an die Unterfunktion. Ein Beispiel einer solchen Unterfunktion ist in Abbildung A.4 gezeigt.

```
bool Hydra::ReadCommand(int address, const AnsiString& commando, AnsiString& answer)
{
    if (connected==false) return false;
    else
    {
        char buf[255];
        int size = 0;
        AnsiString str="";

        str+=IntToStr(address)+" "+commando+" \r\n";
        err=RS232_SendBuf(fComPort, str.c_str(), str.Length());
        Sleep(25);

        size=RS232_PollComport(fComPort, buf, 100);
        str="";
        for (int i=0; i<size; i++)
        {
            if (buf[i]!=0x0d && buf[i]!=0x0a) str+=buf[i];
        }

        answer=str;
        return true;
    }
}
```

Figure A.3: Codefragment, welches die Lese-Befehle ausführt.

### Unterfunktion der Lese-Befehle:

Aufgabe der "get\_pos\_x"-Funktion, die in Abbildung A.4 gezeigt wird, ist die Rückgabe der aktuellen Position der x-Achse. Dazu ruft diese Unterfunktion das "ReadCommand" auf und übermittelt einen zweiteiligen Datensatz, bestehend aus der Adresse "1" und dem Kommando "np". Genau wie beim "WriteCommand" wandelt das "ReadCommand" den Datensatz in einen String um, den es an den Controller schickt. Anschließend erhält das "get\_pos\_x" einen Antwortstring (in diesem Fall die aktuelle Position der x-Achse), sowie eine Erfolgsmeldung. Bevor die Unterfunktion den Antwortstring an das Programm weiterleitet, überprüft sie, ob auch ein Datensatz im String enthalten ist, oder ob es sich um einen leeren String handelt. Liegt ein leerer String vor, ist ein Fehler unterlaufen, denn der Controller muss bei einer Anfrage des "ReadCommand" immer eine Antwort liefern, in der auch Daten enthalten sind. Mögliche Fehlerursachen könnten zum Beispiel der Verlust der Verbindung zum Controller sein. Wird durch die Unterfunktion ein Fehler registriert, leitet sie diesen an das Programm weiter, welches automatisch die Schritte

für einen Controller-Reset einleitet. Wenn kein Fehler vorliegt und der Antwortstring einen Datensatz enthält, wird dieser vom "get\_pos\_x" an das Programm weitergeleitet und auf der Bedienoberfläche als Achsenposition dargestellt.

```
bool Hydra::get_pos_x(double& pos_x, bool& empty_str)
{
    AnsiString answer = "";
    bool success = ReadCommand(1, "qp", answer);
    if(success)
    {
        if (answer.Length()==0) empty_str=true;
        else empty_str=false;

        pos_x = (StrToFloat(answer));
        return true;
    }
    return false;
}
```

Figure A.4: Codefragment, welches die x-Koordinate zurückgibt.

So wie die zwei oben beschriebenen Unterfunktionen, die je eine der zwei Hauptfunktionen aufrufen, funktionieren alle anderen Unterfunktionen analog. Sämtliche Unterfunktionen werden entweder durch Interaktionen mit der Benutzeroberfläche ausgeführt, oder laufen automatisch im Hintergrund ab.

### A.1.2 Die Bedienoberfläche

Abbildung 6.1 zeigt den Teil des Programms, der für die Ansteuerung und Datenauswertung des xy-Tisches verantwortlich ist. Die Bedienoberfläche wurde aus Übersichtsgründen in verschiedene zusammenhängende Sektoren unterteilt, den Basic Commands, den Special Commands, das Error handling, die Infos, sowie die Settings und die Motion Commands, die im Folgenden noch genauer vorgestellt werden.



Figure A.5: Übersicht der programmierten Bedienoberfläche zur Ansteuerung des xy-Tisches.

### ***Basic Commands:***

Die "Basic Commands" beinhalten die grundlegendsten Befehle, wie das Aufbauen oder Trennen einer Verbindung des Computers (bzw. des Ansteuerungsprogramms) mit dem xy-Tisch (bzw. dem Hydra Controller der den Tisch ansteuert) und einen Notfall-Stopp-Schalter, der den xy-Tisch jedwede Bewegung augenblicklich abbrechen lässt (sofern eine Verbindung zum steuernden Computer besteht).

Der erste Schritt zum Ansteuern des Tisches ist das Aufbauen einer Verbindung. Dazu wählt man im Reiter unterhalb des "Connect"-Buttons (siehe Abbildung A.6



links), den COM-Port-Anschluss aus, über den die Verbindung laufen soll. Ist kein COM-Port-Anschluss vorhanden, so kann ein USB-COM-Port-Adapter verwendet werden, in diesem Fall muss in dem besagten Reiter der jeweilige USB-Port ausgewählt werden. Ist die Auswahl getroffen, wird mittels Betätigen des "Connect"-Buttons die Verbindung aufgebaut.

Nach jedem Verbindungsaufbau wird geprüft, ob der Hydra-Controller auch angeschlossen und die Verbindung geglückt ist. Dazu wird die erwartete Signalerückgabe des Controllers analysiert; ist kein Signal vorhanden, also der Antwort-String leer, besteht keine Verbindung zum Controller und das Programm gibt eine Fehlermeldung aus.



Figure A.6: Bedienoberfläche der Basic Commands; zuständig für das Aufbauen (links) und Trennen (rechts) der Verbindung, sowie das Notfall-Anhalten des Tisches.

War die Verbindung erfolgreich wechselt der "Connect"-Button zu einem "Disconnect"-Button und ermöglicht fortan das Trennen der Verbindung.

***Special Commands:***

Die "Special Commands" haben drei Funktionen. Die erste veranlasst über den "Power OFF"-Button das Abschalten der Tischmotoren (siehe Abbildung A.7 links). Sind die Motoren abgeschaltet, lässt sich der xy-Tisch manuell in der Ebene bewegen, was zum Beispiel für Montagearbeiten von Vorteil ist. Nach dem Abschalten der Motoren wird der "Power OFF"-Button zum "Power ON"-Button (siehe Abbildung A.7 rechts), der das Wiedereinschalten der Motoren ermöglicht.

Durch Betätigen des "Random Move"-Buttons führt der xy-Tisch zufällige Bewe-

gungen aus, bis diese vom Benutzer abgebrochen werden. Die Geschwindigkeit der Zufallsbewegungen wird durch den Benutzer vorgegeben.

Die letzte Funktion der "Special Commands" ist die Aktivierung einer Justierbewegung der x- und y-Achsen durch Betätigen des "Calibration Move"-Buttons.



Figure A.7: Bedienoberfläche der Special Commands; zuständig für Ein- (links) und Ausschalten (rechts) der Motorsteuerung, sowie das Einleiten einer Zufallsbewegung und einer Kalibrationsbewegung.

***Error handling:***

Der nächste Teil der Bedienoberfläche ist das "Error handling", was in Abbildung A.8 veranschaulicht ist. Dieser Sektor verarbeitet und gibt Fehlercodes aus, die vom Controller gesendet werden. Durch Betätigen des "Check Error"-Buttons wird eine Fehleranalyse durchgeführt und das Ergebnis in einem Fenster dem Benutzer gezeigt. Neben den Fehlercodes zeigt die Analyse auch an, ob die Motoren der Achsen aktiviert oder deaktiviert sind.

Durch den "Clean Memo"-Button werden sämtliche Nachrichten aus dem Fenster (Memo genannt) wieder entfernt.

Je nach Art des Fehlers wird ein automatischer Controller-Reset eingeleitet, es ist jedoch auch möglich über den "Reset Controller"-Button einen manuellen Neustart durchzuführen. Der Controller benötigt anschließend etwa 45 Sekunden, bis er wieder einsatzbereit ist. Aus diesem Grund beginnt nach jedem erfolgten Reset ein Countdown, der 45 Sekunden lang runter zählt und sämtliche Funktionen der Benutzeroberfläche außer Kraft setzt. Dies ist nötig, da das Senden von Befehlen

an den Controller, während dieser neu startet, zu massiven Systemfehlern führt, die einen weiteren Reset erzwingen. Ist der Controller nach der vergangenen Zeit wieder einsatzbereit, fährt der Tisch automatisch in seine Mittelposition (x: 50 mm; y: 50 mm) und alle Funktionen sind wieder freigegeben. Wegen der nicht zu vernachlässigenden Wartezeit während eines Neustarts, wird vor jeder Durchführung des Resets dem Benutzer die Möglichkeit gegeben, den Neustart zu verweigern, um zum Beispiel ein fälschliches Drücken des "Reset Controller"-Buttons zu berichtigen.

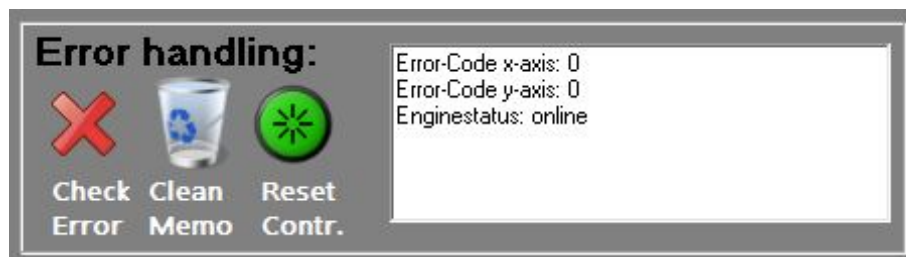


Figure A.8: Bedienoberfläche des Error-Handlings; zuständig für Aufrufen potentieller Fehlermeldungen, sowie das manuelle Durchführen eines Controller-Resets.

### **Infos:**

Mit der Sektion "Infos" aus Abbildung A.9, kann der Benutzer alle relevanten Informationen über den aktuellen Zustand des xy-Tisches im Auge behalten. Im 500 ms-Intervall wird automatisch die momentane Tischposition mit einer Auflösung von  $0,05\ \mu\text{m}$  ausgegeben. Diese Angabe ist auch dann aktiv, wenn die Motoren des Tisches ausgeschaltet sind, sodass man den Tisch beispielsweise per Hand auf eine beliebige Position schieben und diese exakt ablesen kann.

Unterhalb der Positionsanzeige wird der aktuelle Strombedarf der Motoren angegeben. Je größer die Beschleunigung und die Geschwindigkeit des Tisches sind, desto mehr Strom ziehen die Motoren. Auch wenn eine Kraft der Tischbewegung entgegenwirkt, zum Beispiel durch steife Verkabelungen verursacht, ist der Strombedarf erhöht. Soll der Tisch eine bestimmte Position halten, werden die Motoren mit einem Haltestrom versorgt, damit sich die Tischplatten nicht bewegen. Durch Kontrollieren des Strombedarfs kann abgeschätzt werden, ob eine äußere Kraft auf die Tischplatten

einwirkt. Um ein Erreichen des Maximalstroms von 10 A (dies ist der Standardwert und kann, wenn nötig auch angepasst werden) zu vermeiden, sollten zum Beispiel bei Montagearbeiten die Motoren ausgeschaltet werden.

In einer weiteren Kontrollanzeige wird die Temperatur der Controller-CPU überwacht.

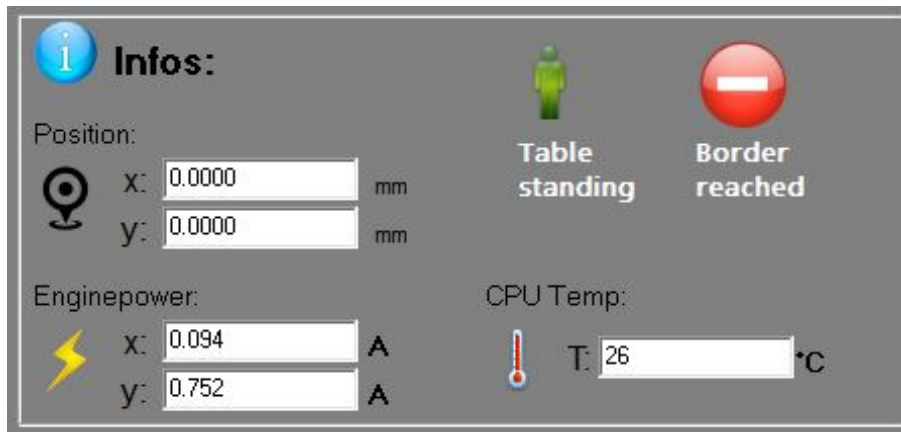


Figure A.9: Bedienoberfläche, die alle relevanten Informationen über den xy-Tisch enthält; darunter die Position der Achsen, die Motorenströme, sowie die Temperatur der Controller-CPU. Über ein "Ampelmännchen" sowie passendem Text wird angegeben, ob der Tisch eine Bewegung ausführt oder nicht.

Da sich der Tisch in einer Dunkelbox befindet, die während des Betriebes geschlossen ist, kann nicht immer eingesehen werden, ob ein vorgegebenes Bewegungsmanöver bereits beendet ist. Da der Tisch sehr kleine Geschwindigkeiten (beginnend bei 100 nm/s) ermöglicht, ist unter gegebenen Umständen auch bei geöffneter Box eine Bewegung des Tisches mit bloßem Auge nicht mehr erkennbar. Aus diesem Grund wird dem Benutzer immer angezeigt, ob sich der Tisch momentan bewegt. Realisiert wurde das durch ein "Ampelmännchen" mit zugehörigem Text. Steht der Tisch still, erscheint ein grünes Männchen mit dem Text "*Table standing*", was symbolisiert, dass der Tisch seinen Bewegungsauftrag beendet hat und einen neuen ausführen kann. Ist der Tisch in Bewegung, erscheint ein rotes Männchen mit dem Text "*Table moving*". Das Programm wurde so gestaltet, dass keine neuen Bewegungsbefehle geschickt werden können, solange der vorherige Auftrag noch im Gange ist (dazu mehr im unteren Absatz *Motion Commands*).

Erreicht eine der Tischplatten den Rand des Fahrweges, erscheint zusätzlich ein Warnsymbol mit der Nachricht "*Border reached*", sodass man augenblicklich erkennt, wenn der Tisch eine Grenze erreicht hat, auch ohne die Positionsangabe unentwegt zu kontrollieren.

***Settings:***

In der durch Abbildung A.10 veranschaulichten Sektion der "Settings" können alle wichtigen Einstellungen für den erfolgreichen Gebrauch des xy-Tisches vorgenommen werden. Unter "Step size" kann man die gewünschte Schrittweite einer Bewegung einstellen. Sowohl eine direkte Bewegungsanweisung, wie auch eine automatisierte Bewegungsabfolge (mehr dazu im Absatz *Motion Commands*) führt dann einen bzw. mehrere Schritte dieser Entfernung aus.

Eine weitere Einstellung, die bei den automatisierten Bewegungsabläufen einen Einfluss hat, ist die Haltezeit ("Step holding time"). Sie bestimmt, wie lange der xy-Tisch auf einer erreichten Position verweilt, bevor er sein Bewegungsmuster fortsetzt. Jede Eingabe der "Settings" wird überprüft. So kann keine Haltezeit eingestellt werden, die unterhalb von 150 ms liegt, da das Programm innerhalb einer so kurzen Zeit nicht alle Daten senden, empfangen und verarbeiten kann. Als Maximalwert wurden willkürlich 30000 ms gewählt, da keine Messung abzusehen war, die einen solchen Wert überschreiten würde. Wird ein Wert eingegeben, der außerhalb dieser Grenzen liegt, bekommt der Benutzer einen Warnhinweis und die Schrittweite wird automatisch auf einen gewählten Standardwert (in diesem Fall wären das 250 ms) gesetzt.

Mittels der "Step velocity" kann die Geschwindigkeit des Tisches eingestellt werden. Auch hier wird die Eingabe kontrolliert. Die durch den Tisch vorgegebenen Parameter einer Mindestgeschwindigkeit von 100 nm/s bis zur Maximalgeschwindigkeit von 500 mm/s müssen eingehalten werden; ansonsten wird nach einer Fehlermeldung der festgelegte Standardwert von 50 mm/s automatisch eingestellt.

Die "Step acceleration" legt die Beschleunigung fest, mit welcher der Tisch auf die vorgegebene Geschwindigkeit beschleunigt, bzw. zum Stillstand hin abbremst. Für die Beschleunigung liegen die Grenzen bei  $1 \mu\text{m/s}^2$  für das Minimum und bei

10000 mm/s<sup>2</sup> für das Maximum. Gibt man einen Wert außerhalb dieses Bereiches an, wird nach einer Fehlermeldung automatisch ein Standardwert von 50 mm/s<sup>2</sup> eingesetzt.

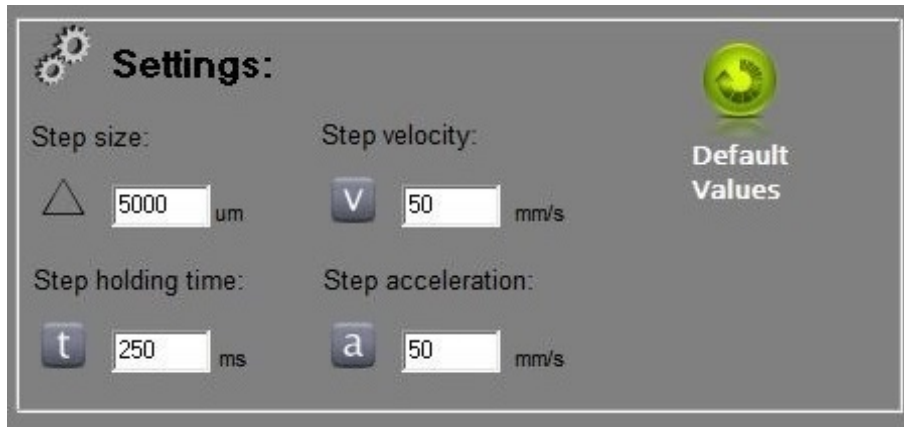


Figure A.10: Bedienoberfläche, die die wichtigsten Parameter des Tisches einstellen lässt. Dazu zählen Schrittweite, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Haltezeit.

Wie die jeweiligen Werte auf ihre Zulässigkeit geprüft werden, ist im Anhang A.1.1 anhand eines Beispiels gezeigt. Nach der Fehlermeldung und dem automatischen Einsetzen eines Standardwertes können natürlich alle Werte der Einstellungen wieder nach Belieben erneut geändert werden.

Um gleichzeitig alle Einstellungen innerhalb der "Settings" auf ihren festgelegten Standardwert zu setzen, betätigt man den "Default Values"-Button.

Bei jedem Programmstart werden dem Hydra-Controller genau diese Standardwerte übermittelt.

### ***Motion Commands:***

Die Sektion "Motion Commands" beinhaltet alles, was den Tisch gezielte Bewegungen ausführen lässt. Wie im oberen Teil der Abbildung A.11 zu sehen ist, wurden drei verschiedene feste Bewegungsabläufe vorprogrammiert; eine lineare Bewegung von links nach rechts ("linear"), eine schlangenförmige Bewegung von links oben nach rechts unten ("snake") und eine Spirale, die sich im Uhrzeigersinn von innen nach außen bewegt ("spiral").

Soll der Tisch eines dieser Bewegungsschemata ausführen, muss das Gewünschte ausgewählt und anschließend der "Start"-Button gedrückt werden. Der Tisch beginnt immer von der aktuellen Position.

Wählt man den linearen Verlauf, so fährt der Tisch mit der in Sektion *Settings* eingegebenen Beschleunigung und Geschwindigkeit um die vorgeschriebene Schrittwerte nach rechts. Nach jedem Schritt verweilt der Tisch um die Dauer der Haltezeit, bevor der nächste Schritt folgt. Erreicht der Tisch die rechte Grenze des Fahrbereichs, ist die Bewegungsabfolge beendet.

Die schlangenförmige Bewegung ist im Prinzip eine Erweiterung der linearen. Beim Erreichen der rechten Tischgrenze folgt ein Schritt nach unten und anschließend bewegt sich der Tisch wieder nach links. Diese Abfolge wird so lange wiederholt, bis die untere rechte Grenze des Verfahrbereiches erreicht ist.

Wird in den *Motion Commands* die Spiralbewegung ausgewählt, hat der Benutzer die Möglichkeit einen Parameter ("*decreasing factor*") zu bestimmen, der den Zuwachs des Spiralradius beeinflusst. Sobald der Tisch den Rand erreicht hat, ist die Schleife beendet.

Solange die automatischen Bewegungsabläufe aktiv sind, kann vom Benutzer kein neuer Bewegungsbefehl geschickt werden. Mit Hilfe des "Pause"-Buttons kann der Bewegungsablauf angehalten und nach Belieben wieder fortgesetzt werden. Auch während dieser Pause-Funktion können keine weiteren Bewegungsbefehle geschickt werden.

Um Bewegungsabläufe vorzeitig abubrechen, muss man den "Stop"-Button betätigen. Dadurch bricht das Bewegungsschema ab und der Tisch kann neue Fahrweisungen entgegen nehmen.

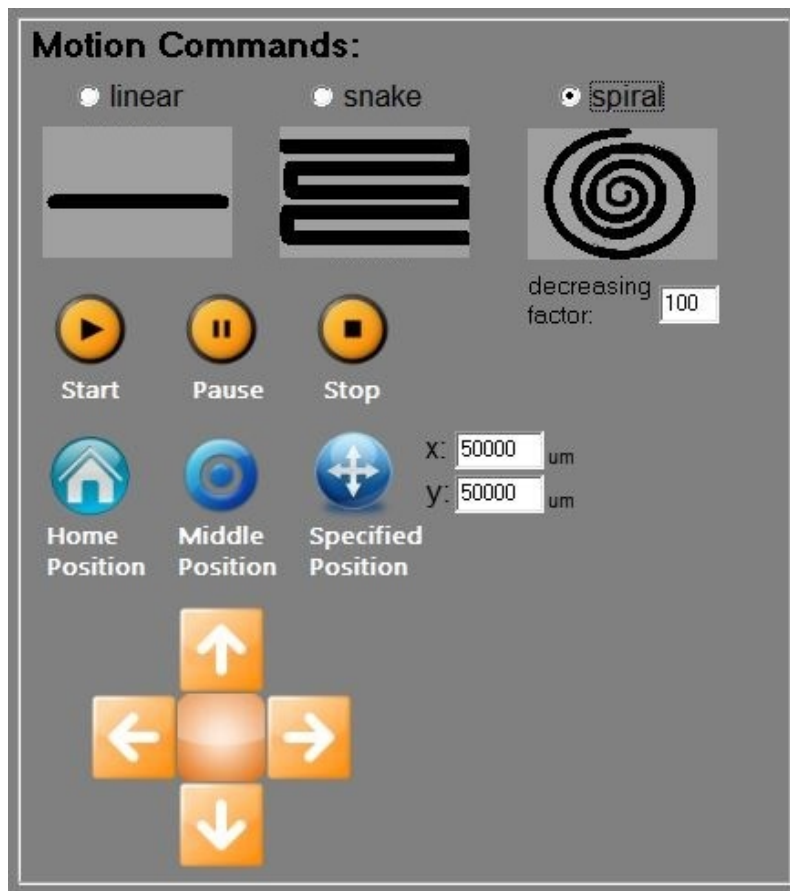


Figure A.11: Bedienoberfläche, die einzelne Bewegungen oder ganze Bewegungsabläufe ermöglicht.

Für nicht-automatisierte Bewegungsabläufe stehen die Knöpfe in der unteren Hälfte der *Motion Commands* zur Verfügung. Über die "Pfeil"-Buttons (hoch, runter, links, rechts) kann der Tisch um eine in den *Settings* definierte Schrittweite in die jeweilige Richtung geschickt werden.

Desweiteren wurden besondere Koordinaten, wie die Ursprungsposition (x: 0 mm; y: 0 mm) und die Mittelposition (x: 50 mm; y: 50 mm) auf eigenen Buttons (dem "Home Position"-Button und dem "Middle Position"-Button) verankert, damit diese Ziele leichter angefahren werden können.

Soll eine andere Position vom Tisch direkt angefahren werden, können die entsprechenden Koordinaten innerhalb der *Motion Commands* in ein Textfeld eingegeben werden. Durch anschließendes Betätigen des "Specified Position"-Buttons bewegt



sich der Tisch zu den angegebenen Koordinaten.

## A.2 TTL-Interface-Steuerung

### A.2.1 Der Quellcode

Die Kommunikation mit dem TTL-Interface erfolgt über eine USB-Schnittstelle. Die nötigen Befehle werden durch aufgerufene Programm-Funktionen an das Interface geleitet, welches diese dann ausführt.

Die drei wichtigsten Hauptfunktionen, die ähnlich wie beim Quellcode des xy-Tisches, durch Unterfunktionen aufgerufen werden, sprechen die Pins des TTL-Interfaces an bzw. legen deren momentane Aufgabe fest. Als erstes müssen die Pins entweder als Input-oder Output- Pins definiert werden. Anschließend kann von den Output-Pins ein High- oder Low-Signal ausgegeben werden, und die Input-Pins können ein angelegtes Signal auslesen. Im Folgenden wird zuerst auf die drei wichtigsten Hauptfunktionen und ihre zugehörigen Unterfunktionen eingegangen.

#### **Ein- und Ausgangs-Pins definieren:**

Abbildung A.12 zeigt den Teil des Codes, der die Pins als Input- bzw. Output-Pins deklariert. Diese Hauptfunktion wird durch eine Unterfunktion aufgerufen und erhält von ihr die Variable "Block". Der vom Hersteller vorgegebene Befehl, welcher die Pins setzt, ist das "DapiSpecialCommand([...], Block, 0)", wobei der Teil "[...]" bedeutet, dass aus Übersichtsgründen der Befehl an dieser Stelle gekürzt wurde. Dieses Kommando teilt alle 32 ansprechbaren Pins des TTL-Moduls in 4 Blöcke zu je 8 Pins auf. Also enthält Block 1 die Pins 0-7, Block 2 die Pins 8-15, Block 3 die Pins 16-23 und Block 4 die Pins 24-31. Um das zu verdeutlichen, sind in Abbildung A.18 rechts die 4 Blöcke mit den zugehörigen Pins farblich zusammenhängend dargestellt.

Das heißt, dass die Variable "Block" einen 4-Bit-Wert enthält, welcher die 4 Blöcke und damit deren jeweilige 8 Pins adressiert und als Input- oder Output-Pins definiert. Enthält die Variable "Block" zum Beispiel den Wert "**0110**", wird dem Block 1 der Wert "**0**", Block 2 der Wert "**1**", Block 3 der Wert "**1**" und Block 4 der Wert "**0**" zugewiesen, was ebenso für die jeweiligen 8 Pins innerhalb jedes Blockes gilt. Der

Wert "1" setzt die Pins dabei auf "Output", der Wert "0" auf "Input". Damit wären also die Pins 0-7 und 24-31 als Input-Pins und die Pins 8-15 und 16-23 als Output-Pins deklariert.

```
bool UsbTtlInterface::SetInputOutput(int Block)
{
    if (handle==0) return false;
    DapiSpecialCommand(handle, DAPI_SPECIAL_CMD_SET_DIR_DX_8, 0, Block, 0);
    return true;
}
```

Figure A.12: Codefragment, welches die Pins auf Input oder Output setzt.

Ähnlich wie bei der Datenübertragung zum Hydra-Controller, kann der Befehl zum TTL-Interface nur dann erfolgreich geschickt werden, wenn eine Verbindung vom Rechner zum TTL-Modul besteht. Deswegen überprüft die "SetInputOutput"-Funktion vor dem Senden des Befehls den Verbindungsstatus mittels einer if-Abfrage. Ist eine Verbindung vorhanden, wird der Befehl gesendet und die Hauptfunktion schickt eine Erfolgsmeldung an die Unterfunktion, von der sie aufgerufen wurde.

#### **Unterfunktion der Eingangs-/Ausgangs-Definierung:**

Die in Abbildung A.13 dargestellte Unterfunktion "SetToOutClick" hat die Aufgabe, den 4-Bit-Wert der Variable "Block" zu generieren und mit diesem die Hauptfunktion "SetInputOutput" aufzurufen. Welcher Block auf "0" oder "1" gesetzt wird, entscheidet der Benutzer mittels Markieren sogenannter Checkboxen auf der Bedienoberfläche (dazu mehr in Anhang A.2.2).

Wie am Codefragment der Abbildung A.13 zu erkennen ist, gibt es vier Checkboxen, denen jeweils ein Block an Pins und ein dazu passender 4-Bit-Wert (in Hexadezimalschreibweise) für den Aufbau der Variable zugewiesen wurde. Nacheinander überprüft die Unterfunktion, welche der Checkboxen vom Benutzer ausgewählt wurden. Die Werte der markierten Checkboxen werden aufaddiert und bilden die Variable "Block".

```
void __fastcall TForm1::SetToOutClick(TObject *Sender)
{
//     [...]
    int Block = 0;

    if (CheckBox_set_direction_0_7->Checked)
    {
        Block = Block + 0x1;
//     [...]
    }
//     [...]
    if (CheckBox_set_direction_8_15->Checked)
    {
        Block = Block + 0x2;
//     [...]
    }
    if (CheckBox_set_direction_16_23->Checked)
    {
        Block = Block + 0x4;
//     [...]
    }
//     [...]
    if (CheckBox_set_direction_24_31->Checked)
    {
        Block = Block + 0x8;
//     [...]
    }
//     [...]
    bool success = usb.SetInputOutput(Block);
//     [...]
}
```

Figure A.13: Codefragment, welches die Pins auswählt, die auf Input oder Output gesetzt werden sollen. Aus Übersichtsgründen wurden Teile des Codes entfernt was durch "[...]" symbolisiert ist.

### **High-/Low-Signal der Ausgangs-Pins definieren:**

Um die Ausgangs-Pins ein High- oder Low-Signal ausgeben zu lassen, ist die Hauptfunktion "SetHighLow" zuständig. Nach erfolgreicher Verifizierung einer bestehenden Verbindung, wird der eigentliche Befehl "DapiDOSet32([...], Bitmap)" gesendet. Dieses Kommando teilt die Pins nicht in Blöcke ein, sondern betrachtet alle separat.

Die Variable "Bitmap" ist also ein 32-Bit-Wert, der jeden Pin einzeln adressiert.

```
bool UsbTtlInterface::SetHighLow(int Bitmap)
{
    if (handle==0) return false;
    DapiDOSet32(handle, 0, Bitmap);
    return true;
}
```

Figure A.14: Codefragment, welches die ausgewählten Output-Pins auf High-Out oder Low-Out setzt.

Hat die Funktion "SetHighLow" den entsprechenden Befehl gesendet und damit die ausgewählten Pins auf "1" oder "0" gesetzt, wird an die Unterfunktion eine Erfolgsmeldung geschickt.

#### **Unterfunktion der High-/Low-Signal Definierung:**

Damit die Unterfunktion die Variable "Bitmap" an die Hauptfunktion übergeben kann, muss der entsprechende Wert der Variablen zunächst konstruiert werden, was in Abbildung A.15 veranschaulicht ist. Über Checkboxes (siehe Anhang A.2.2) kann der Benutzer auswählen welche Output-Pins eine "1" oder "0" ausgeben sollen. Die Funktion "SetHighButtonClick" überprüft der Reihe nach, welche Checkboxes aktiviert sind und ordnet dann der Variable "Bitmap" den entsprechenden Wert zu. Um das zu tun, muss der jeweiligen Checkbox vorerst die richtige Wertigkeit zugesprochen werden. Das wird mittels einer Hilfsvariablen "var" realisiert. Die Hilfsvariable wird auf den Wert "1" gesetzt, der anschließend, entsprechen der angestrebten Wertigkeit, bitweise verschoben wird.

Soll zum Beispiel Pin 2 (das wäre der dritte Pin, da die Nummerierung bei 0 beginnt) auf "1" gesetzt werden, wird die Hilfsvariable aus Checkbox\_2 erst auf den Wert 1 gesetzt, der dann bitweise um 2 Stellen nach links verschoben und somit zu "100<sub>2</sub>" bzw. "4<sub>16</sub>" wird.

Anschließend wird dieser Wert auf die Variable "Bitmap" aufaddiert, die sich so aus allen Hilfsvariablen der jeweiligen markierten Checkboxes zusammensetzt und das

32-Bitmuster enthält, nachwelchem die Pins gesetzt werden sollen.

```
void __fastcall TForm1::SetHighButtonClick(TObject *Sender)
{
// [...]
  unsigned long Bitmap = 0;
  unsigned long var = 0;
  if (CheckBox_0->Checked)
  {
    var = 1 << 0;
    Bitmap = Bitmap + var;
  }
// [...]
  if (CheckBox_29->Checked)
  {
    var = 1 << 29;
    Bitmap = Bitmap + var;
  }
  if (CheckBox_30->Checked)
  {
    var = 1 << 30;
    Bitmap = Bitmap + var;
  }
  if (CheckBox_31->Checked)
  {
    var = 1 << 31;
    Bitmap = Bitmap + var;
  }
  bool success = usb.SetHighLow(Bitmap);
// [...]
}
```

Figure A.15: Codefragment, welches die Output-Pins auswählt, die auf High-Out oder Low-Out gesetzt werden. Das "[...]" steht für Stellen im Code, die aus Übersichtsgründen hier weggelassen wurden.

Danach wird die Hauptfunktion aufgerufen und ihr der Wert "Bitmap" übermittelt.

### **Eingangs-Pins auslesen:**

Die dritte Hauptfunktion "Read\_X\_Inputs" liest die Eingangs-Pins aus und gibt an, welches Signal jeweils an ihnen anliegt. Zum Auslesen der Pins gibt es, wie in

Abbildung A.16 zu sehen, drei geringfügig unterschiedliche Befehle. Wie im obigen Absatz "**Ein- und Ausgangs-Pins definieren**" teilen die drei Befehle die Pins in 4 Blöcke zu jeweils 8 Pins auf. Das erste der drei Kommandos ist "DapiDIGet8([...], StartPin)", welches genau einen Block bzw. 8 Pins ausliest. Welche 8 Pins dabei ausgewählt werden, wird vom Benutzer bestimmt und durch die Nummer des Blockes festgelegt. Die anderen zwei Kommandos "DapiDIGet16([...], StartPin)" und "DapiDIGet32([...], StartPin)" funktionieren analog, mit dem Unterschied, dass sie 16 bzw. 32 Pins auslesen.

Beim Aufrufen der "Read\_X\_Inputs"-Funktion müssen ihr also die Anzahl und Nummern der auszulesenden Pins übermittelt werden. Die Anzahl ("RangeX") bestimmt dann, welches der drei Kommandos aufgeführt wird und die Variable "StartPin" bestimmt den Pin, ab dem ausgelesen werden soll. Um Fehler zu vermeiden, wurde das Programm so geschrieben, dass ein Auslesen von Ausgangs-Pins nicht möglich ist (dazu mehr in Anhang A.2.2).

Sobald das Kommando zum Auslesen der Pins übermittelt wurde, speichert die Hauptfunktion die Antwort als Bitmuster unter der Variable "Bitmask" ab. Dabei ist zu beachten, dass die "DapiDIGet[...]"-Kommandos die Nummern der ausgelesenen Pins umdefinieren. Der Pin bei dem die Auslese beginnt, wird fortan als "Pin 0" bezeichnet und die folgenden entsprechend mit fortlaufenden Nummern belegt. Werden beispielsweise Pins 16-23 ausgelesen, erhalten sie in der übermittelten Antwort die Nummern 0-7.

In der Praxis erwies sich diese Vorgehensweise als irreführend, weswegen die Pinnummern nach dem Erhalt der Antwort wieder an ihre ursprünglichen Bezeichnungen angepasst wurden. Das wurde realisiert, indem das Bitmuster der Antwort bitweise um den ursprünglichen Wert des Startpins nach links verschoben wurde. Die angepasste Antwort wird anschließend als Variable "Bitmap" an die Unterfunktion übermittelt und dem Benutzer ausgegeben.

```
bool UsbTtlInterface::Read_X_Inputs(int RangeX, int StartPin, unsigned long& Bitmap)
{
    if (handle==0) return false;
    unsigned long Bitmask;

    if (RangeX==8)
    {
        Bitmask = DapiDIGet8(handle, StartPin);
        Bitmap = (Bitmask << StartPin);
        return true;
    }
    if (RangeX==16)
    {
        Bitmask = DapiDIGet16(handle, StartPin);
        Bitmap = (Bitmask << StartPin);
        return true;
    }
    if (RangeX==32)
    {
        Bitmask = DapiDIGet32(handle, StartPin);
        Bitmap = (Bitmask << StartPin);
        return true;
    }
    return false;
}
```

Figure A.16: Codefragment, welches die ausgewählten Input-Pins ausliest.

### Unterfunktion der Pin-Auslese:

Die Unterfunktion "ReadButtonClick", die in Abbildung A.17 zu sehen ist, übergibt der Hauptfunktion die nötigen Parameter, um die vom Benutzer ausgewählten Pins auszulesen. Es hat sich in diesem Beispiel als effektiver herausgestellt, immer das Kommando zu benutzen, welches 8 Pins ausliest und dieses gegebenenfalls mehrfach anzuwenden und auf den Gebrauch der Kommandos, die 16 bzw. 32 Pins auslesen, zu verzichten. Über vom Benutzer markierte Checkboxen (mehr dazu in Absatz A.2.2) werden die Auslese-Pins mittels if-Bedingung ausgewählt. Anschließend werden die nötigen Parameter von Pinanzahl und Startpin an die Hauptfunktion übergeben. Nach erfolgreichem Aufrufen der Hauptfunktion erhält die Unterfunktion eine oder entsprechen der Anzahl auszulesender Pins auch mehrere Antwort-Bitmuster, die zusammengesetzt und schließlich auf der Bedienoberfläche dargestellt werden.

```
void __fastcall TForm1::ReadButtonClick(TObject *Sender)
{
// [...]
    unsigned long Bitmap = 0;
    if (CheckBox_read_16_23->Checked)
    {
        unsigned long var = 0;
        bool success3 = usb.Read_X_Inputs(8, 16, var);
        if (success3) Bitmap = Bitmap + var;
// [...]
    }
    if (CheckBox_read_24_31->Checked)
    {
        unsigned long var = 0;
        bool success4 = usb.Read_X_Inputs(8, 24, var);
        if (success4) Bitmap = Bitmap + var;
// [...]
    }
    if (CheckBox_read_0_7->Checked)
    {
        unsigned long var = 0;
        bool success1 = usb.Read_X_Inputs(8, 0, var);
        if (success1) Bitmap = Bitmap + var;
// [...]
    }
    if (CheckBox_read_8_15->Checked)
    {
        unsigned long var = 0;
        bool success2 = usb.Read_X_Inputs(8, 8, var);
        if (success2) Bitmap = Bitmap + var;
    }
// [...]
}
```

Figure A.17: Codefragment, welches die Input-Pins auswählt, die ausgelesen werden sollen. Das "[...]" steht für Stellen im Code, die aus Übersichtsgründen hier weggelassen wurden.

## A.2.2 Die Bedienoberfläche

Abbildung A.18 zeigt den zweiten Teil der Bedienoberfläche, der für die Ansteuerung und Datenauswertung des TTL-Interfaces zuständig ist. Genau wie beim Hydra-Controller muss auch mit dem TTL-Interface zunächst eine Verbindung aufgebaut



werden. Dies wird durch den "Start"-Button ermöglicht, der sich im oberen Teil der Bedienoberfläche befindet. Mit dem daneben befindlichen "Close"-Button, kann das Programm beendet werden. Der Verbindungsstatus wird dem Benutzer ebenfalls in diesem Bereich angegeben.

Ist eine Verbindung aufgebaut sollte zuerst unter der Region "***Set direction***" bestimmt werden, welche Pins als Eingangs- und Ausgangs-Pins deklariert werden. Die in den Checkboxen markierten Pins werden nach Betätigen des "Set Pins to OUT"-Butten als Ausgangs-Pins festgelegt.

Anschließend können unter "***Readout Pins***" die Pins markiert werden, die ausgelesen werden sollen. Wie in Abbildung A.18 zu erkennen ist, sind bei den "***Readout Pins***" die Checkboxen ausgegraut, deren Pins bereits als Ausgangs-Pins definiert wurden; diese können also nicht zum Auslesen benutzt werden, solange sie im Bereich der "***Set direction***" noch markiert sind. Das Bitmuster, welches angibt, an welchen Pins ein Signal anliegt, wird in einem Textfenster als "Read value" sowohl in binärer als auch hexadezimaler Schreibweise ausgegeben.

Um die Output-Pins ein Signal ausgeben zu lassen, müssen sie entsprechend im Bereich "***Set Pins High or Low***" markiert werden. Programmiertechnisch wurde auch hier darauf geachtet, dass nur "sinnvolle" Markierungen gesetzt werden können. Wie die Abbildung zeigt, sind die als Eingangs-Pin definieren Bereiche ausgegraut und können nicht zur Ausgabe eines Signals ausgewählt werden. Zusätzlich wird dem Benutzer durch einen roten Schriftzug rechts neben den Checkboxen deutlich gemacht, welche Pins ausgewählt werden können. Wenn ein auf "high" stehender Ausgangs-Pin anschließend als Eingangs-Pin umdefiniert werden sollte, wird die Markierung im Bereich "***Set Pins High or Low***" automatisch entfernt und die entsprechende Checkbox ausgegraut. So wie die Pins auf dem TTL-Modul angeordnet sind, sind sie auch auf der Bedienoberfläche dargestellt und zusätzlich farblich zusammenhängend hervorgehoben. In einem Textfenster werden als "Set value" die Bitmuster dargestellt, die erkennen lassen, welcher Ausgangs-Pin ein "high-" oder "low"-Signal ausgibt.

Der Bereich der "***Oszillation Modes***" war ursprünglich dafür vorgesehen, den Lasertreiber mit einem Triggersignal zu versorgen. Wegen der zu geringen maxi-

mal möglichen Frequenz wurde diese Idee jedoch wieder verworfen und ein separater Funktionsgenerator verwendet. Für verschiedene Testmöglichkeiten der Funktionalität des Programms wurde dieser Bereich auf der Bedienoberfläche beibehalten. Durch Betätigen des "Oszillation with readout"-Buttons definiert das Interface die erste Hälfte der Pins (also die Pins 0-15) als Ausgangs-Pins, die restlichen als Eingangs-Pins. Wie in dem Fenster direkt über dem Button mathematisch dargestellt, muss mindestens ein Input-Pin mit einem der Output-Pins verbunden werden. Ist diese Bedingung erfüllt, geben die Output-Pins ein high-Signal aus; sobald das Signal an einem der Input-Pins registriert wird, werden die Output-Pins wieder auf low-Signal geschaltet und der Prozess beginnt von neuem. Der darunter liegende Button "Oszillation without readout" lässt die Output-Pins ohne weitere Bedingung beliebig oft zwischen high- und low-Signal hin und her wechseln. Dadurch wird die vom TTL-Modul maximal mögliche Frequenz von etwa 2 kHz generiert. Der letzte Bereich ***Gate-Control*** lässt Pin 14 mit einer vom Benutzer einstellbaren Frequenz, zwischen einem high- und low-Signal wechseln. Dieses Signal wird an den Gate-Eingang des Lasertreibers angeschlossen. Da der Gate-Eingang eine wesentlich langsamere Frequenz als das Triggersignal benötigt, sollte die geringe vom TTL-Interface lieferbare Frequenz für die meisten Anwendungen ausreichend sein.

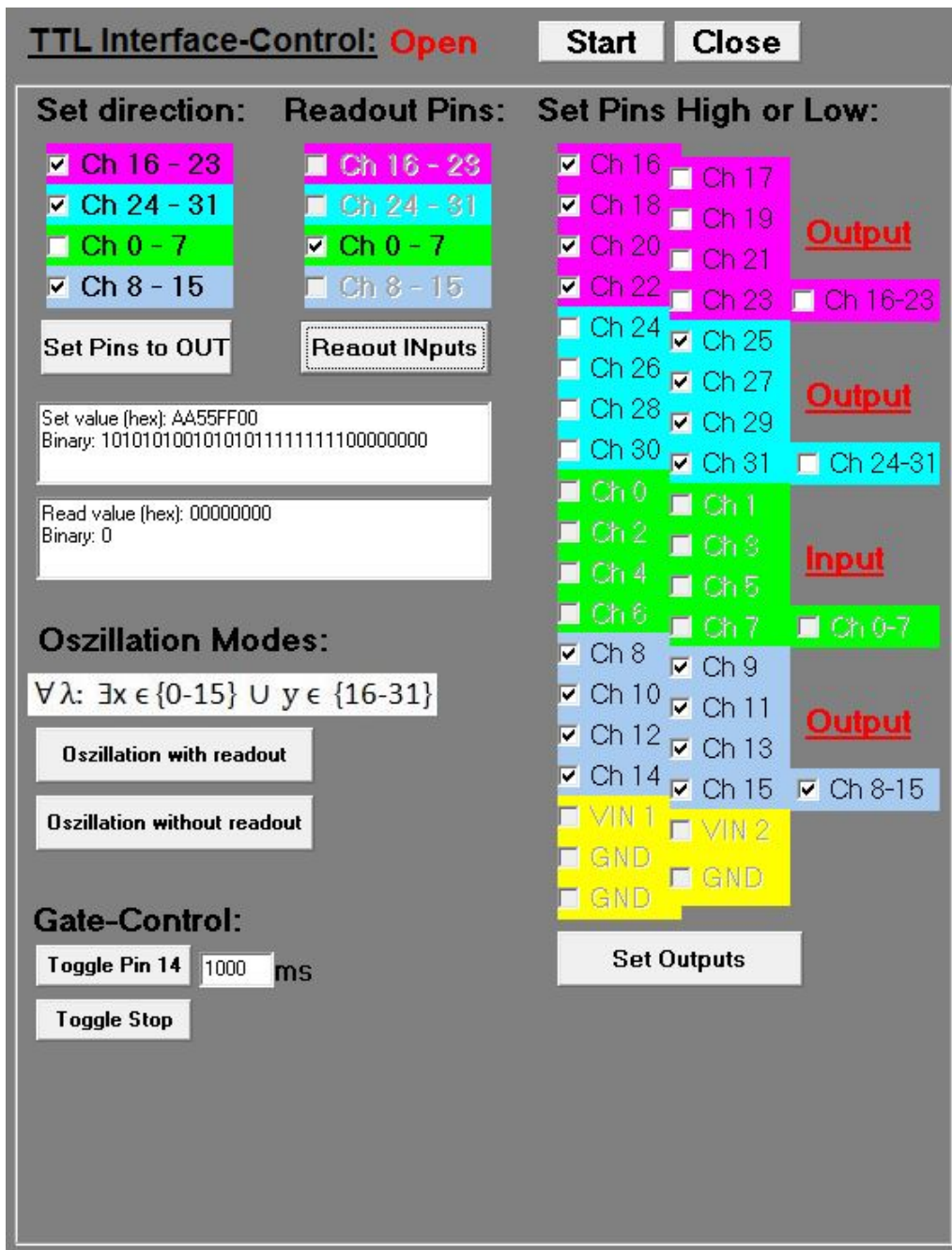


Figure A.18: Übersicht der Bedienoberfläche zur Ansteuerung des TTL-Moduls

### A.3 Messdaten

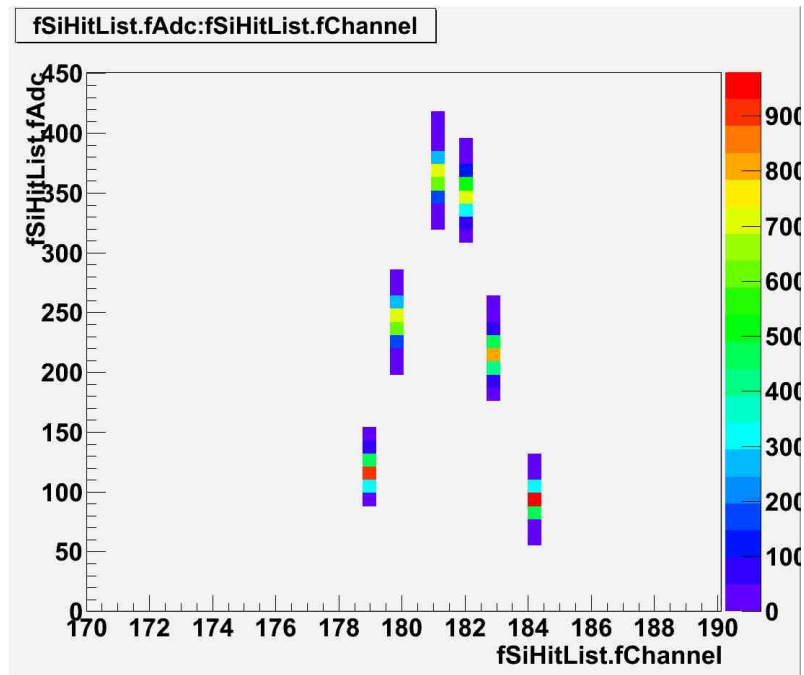


Figure A.19: Plot der Intensität gegen die Kanalnummer für Tischposition a.

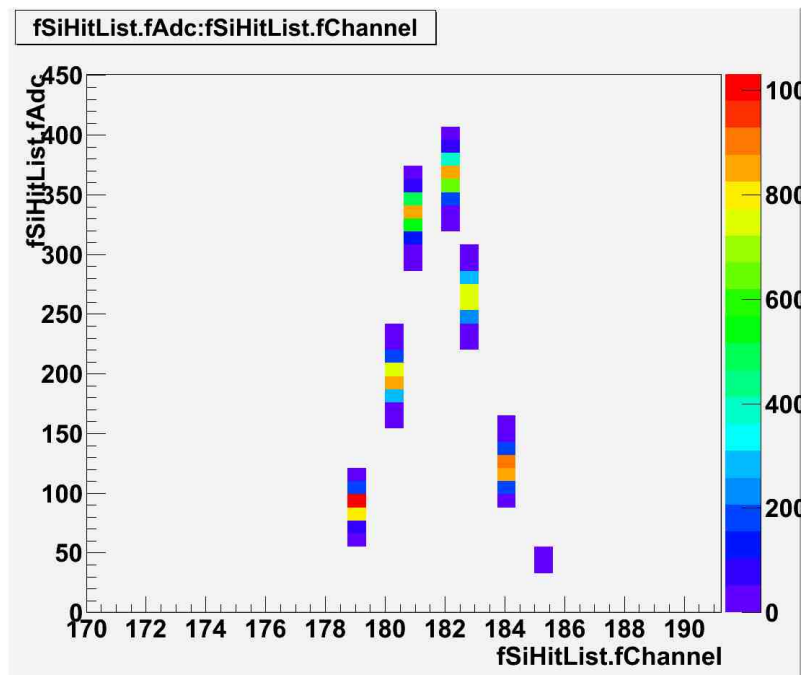


Figure A.20: Plot der Intensität gegen die Kanalnummer für Tischposition b.

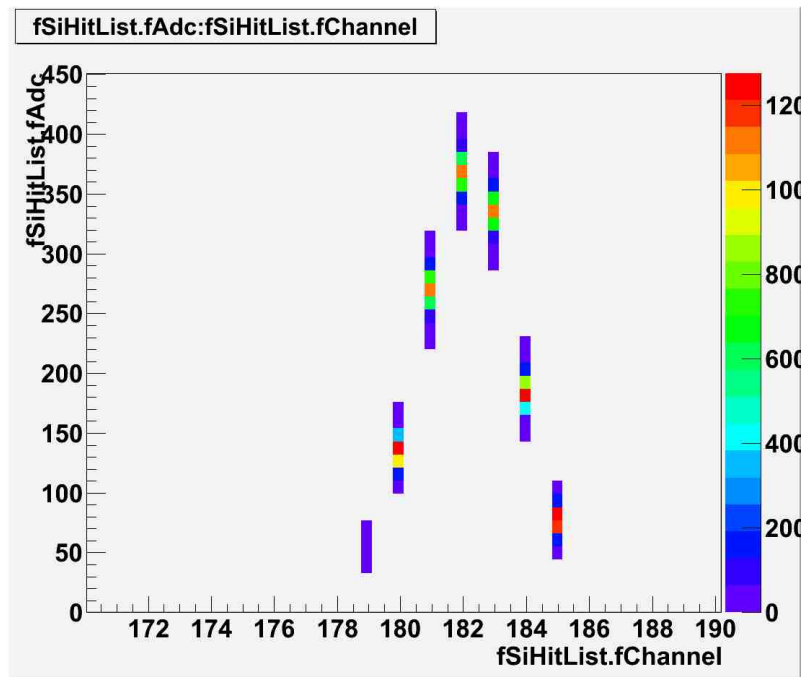


Figure A.21: Plot der Intensität gegen die Kanalnummer für Tischposition c.

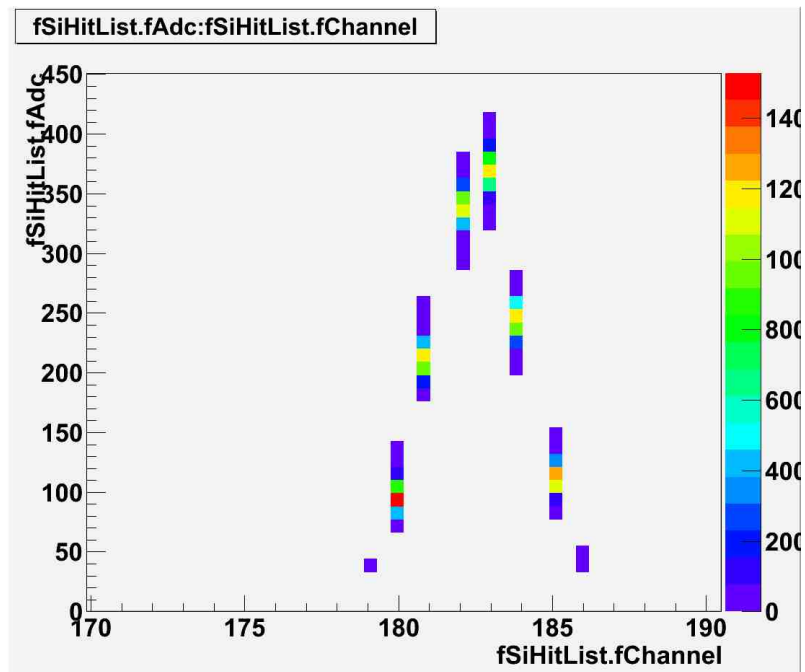


Figure A.22: Plot der Intensität gegen die Kanalnummer für Tischposition d.

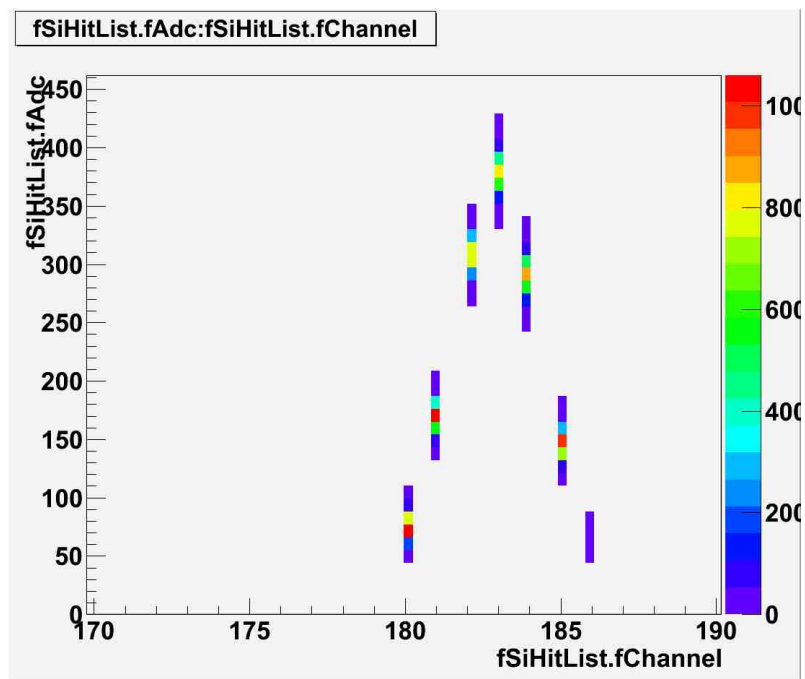


Figure A.23: Plot der Intensität gegen die Kanalnummer für Tischposition e.

### A.4 Fitparameter

	A	B	C	D	E1	E2
1	Modell	Gauss				
2	Gleichung	$y=y_0 + (A/(w * \sqrt{\pi/2})) * \exp(-2*((x-xc)/w)^2)$				
3	Chi-Quadr Reduziert	3.07064	26.03767	20.59705	100.28567	2.95756
4	Kor. R-Quadrat	0.99977	0.99787	0.99844	0.99221	0.99979
5			Wert	Standardfehler		
6	Laserposition a	y0	35.70362	5.07568		
7		xc	181.37398	0.00639		
8		w	2.77837	0.04476		
9		A	1209.59387	34.15453		
10		Sigma	1.38919	0.02238		
11		Halbwertsbreite	3.27128	0.0527		
12		Höhe	347.36767	4.58131		
13	Laserposition b	y0	51.73714	12.24907		
14		xc	181.76141	0.01969		
15		w	2.70525	0.11744		
16		A	1103.19349	81.35487		
17		Sigma	1.35263	0.05872		
18		Halbwertsbreite	3.18519	0.13828		
19		Höhe	325.37475	11.16447		
20	Laserposition c	y0	33.56466	11.54796		
21		xc	182.21087	0.01689		
22		w	2.77445	0.10459		
23		A	1195.14124	77.9011		
24		Sigma	1.38723	0.05229		
25		Halbwertsbreite	3.26667	0.12314		
26		Höhe	343.70185	10.53768		
27	Laserposition d	y0	19.62221	33.92516		
28		xc	182.64869	0.03706		
29		w	2.91057	0.29136		
30		A	1289.28243	234.7589		
31		Sigma	1.45529	0.14568		
32		Halbwertsbreite	3.42694	0.34305		
33		Höhe	353.43492	30.79693		
34	Laserposition e	y0	26.18003	4.24041		
35		xc	182.91544	0.00642		
36		w	2.85989	0.0379		
37		A	1268.50108	29.27447		
38		Sigma	1.42995	0.01895		
39		Halbwertsbreite	3.36726	0.04462		
40		Höhe	353.90064	3.90954		

Figure A.24: Tabelle aller wichtigen Parameter für die Gaußfits der Datenpunkte der 5 Tischpositionen.





## References

- [1] Universität Hamburg. (15.10.2014).  
*<http://www.emmynoethercms.uni-hamburg.de/en/research.html>*
- [2] GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung. (20.09.2014).  
*[https://www.gsi.de/start/fair/forschung\\_an\\_fair.htm](https://www.gsi.de/start/fair/forschung_an_fair.htm)*
- [3] Welt der Physik. (13.08.2014).  
*[www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/experimente/teilchenbeschleuniger/fair/fair-ueberlick/](http://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/experimente/teilchenbeschleuniger/fair/fair-ueberlick/)*
- [4] The PANDA Collaboration. (2009).  
*Physics Performance Report for: PANDA.*
- [5] FAIR Homepage. (20.09.2014).  
*[www.fair-center.de/index.php?id=1&L=1](http://www.fair-center.de/index.php?id=1&L=1)*
- [6] Prof. Dr. Brinkmann. (2013/2014).  
*Hadron and Nuclear Physics. Vorlesung, II Physikalische Institut, Justus-Liebig-Universität Gießen*
- [7] Zimmermann, Iris. (März 2011).  
*Studien zum Bau eines Prototyps für die Rückwärtsendkappe des elektromagnetischen Kalorimeters des PANDA-Experiments.*  
Diplomarbeit, Institut für Kernphysik, Johannes-Gutenberg Universität Mainz
- [8] Schnell, Robert; et. al. (2013).  
*The Micro-Vertex Detector of the PANDA Experiment. Proceedings of Science*
- [9] The PANDA Collaboration. (2005).  
*Technical Progress Report for: PANDA.*
- [10] GSI-Homepage (12.10.2014).  
*<http://www-panda.gsi.de/>*

- [11] DPG-Tagung Mainz. (2012).  
*The cluster-jet target for the PANDA experiment*
- [12] The PANDA Collaboration. (2012).  
*Technical Design Report for: PANDA Internal Targets*
- [13] The PANDA Collaboration. (2011).  
*Technical Design Report for the: PANDA Micro Vertex Detector*
- [14] The PANDA Collaboration. (2012).  
*Technical Design Report for the: PANDA Straw Tube Tracker*
- [15] Schwiening, Jochen. (2011).  
*The DIRC detectors for the PANDA experiment at FAIR*. Präsentation.
- [16] The PANDA Collaboration. (2008).  
*Technical Design Report for: PANDA Electromagnetic Calorimeter (EMC)*
- [17] The PANDA Collaboration. (2009).  
*Technical Design Report for the: PANDA Solenoid and Dipole Spectrometer Magnets*
- [18] Leo, W.R. (1987).  
*Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag
- [19] Krammer, Manfred. (02.09.2014).  
*Halbleiterdetektoren - Detektoren in der Hochenergiephysik*. Vorlesung, Institut für Hochenergiephysik der ÖAW, Wien
- [20] Hartmann, Frank. (2009).  
*Evolution of Silicon Sensor Technology in Particle Physics*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag
- [21] List, Benno. (2007).  
*Detektoren für die Teilchenphysik*. Vorlesung, Universität Hamburg

- [22] The ROSE Collaboration. (1999).  
*3rd RD48 STATUS REPORT - R&D On Silicon for future Experiments*
- [23] ITK Kassen Homepage. (02.09.2014).  
*[www.itknet.de/index.php?/Flatseries.html](http://www.itknet.de/index.php?/Flatseries.html)*
- [24] ITK Kassen. (2013).  
*Hydra Hardware Manual*. Manual
- [25] MiSUMi India. (2014). Produktkatalog.
- [26] PicoQuant Homepage. (02.09.2014).  
*[www.picoquant.com/products/category/picosecond-pulsed-driver/pdl-800-d-picosecond-pulsed-diode-laser-driver-with-cw-capability](http://www.picoquant.com/products/category/picosecond-pulsed-driver/pdl-800-d-picosecond-pulsed-diode-laser-driver-with-cw-capability)*
- [27] Deditec Homepage. (15.10.2014).  
*<http://www.deditec.de/de/module/prod/usb-ttl-io-module/usb-ttl-32.html>*
- [28] Schnell, Robert. (2009).  
*Untersuchungen zu First-Level-Datenauslesestrukturen für den Siliziumstreifendetektor im Mikro-Vertex-Detektor von PANDA*. Diplomarbeit, Institut für Kern- und Teilchenphysik, Universität Dresden
- [29] HAMAMATSU. (2014).  
*MPPC multi-pixel photon counter - S12571-025, -050, -100C/P*. Datasheet

---

## List of Figures

2.1	Das Standardmodell der Teilchenphysik [1] . . . . .	10
3.1	FAIR Forschungseinrichtung [5] . . . . .	14
3.2	Vergleich von Charmonium- mit Positronium-Spektrum [6] . . . . .	16
3.3	Schematische Darstellung des PANDA-Detektors [8] . . . . .	18
3.4	PANDA-Targetspektrometer [9] . . . . .	19
3.5	PANDA-Vorwärtsspektrometer [9] . . . . .	20
3.6	PANDA-Target [10] . . . . .	21
3.7	Schematische Darstellung des Mikro-Vertex-Detektors [13] . . . . .	23
3.8	Verwendete Streifendetektoren beim MVD [13] . . . . .	24
3.9	Links: einzelne Straw Tube Tracker; rechts: Zentraler Tracker [14] . . . . .	25
3.10	Layout der Straw Tube Tracker in xy-Ansicht [14] . . . . .	26
3.11	Schematische Darstellung des DIRC-Detektors [15] . . . . .	27
3.12	Darstellung des Barrel- und des Vorwärtskalorimeters [16] . . . . .	28
3.13	Schematische Darstellung des Myonendetektors [10] . . . . .	29
4.1	Verlauf der Bethe-Bloch-Formel [19] . . . . .	35
4.2	Silizium Gitterstruktur [19] . . . . .	36
4.3	Bandstruktur für Isolatoren, Halbleiter und Metalle [19] . . . . .	37
4.4	Links: n-Dotierung mit Phosphor; rechts: p-Dotierung mit Bor [19] . . . . .	38
4.5	Bändermodell nach n-Dotierung mit Phosphor [19] . . . . .	38
4.6	Bändermodell nach p-Dotierung mit Bor [19] . . . . .	39
4.7	Bändermodell vor und nach Kontakt zweier unterschiedlich dotierter Halbleiter [19] . . . . .	40
4.8	PN-Übergang mit angelegter Spannung in Durchlass- und Sperrrichtung [19] . . . . .	41
4.9	Streifendetektor ohne und mit integrierter kapazitiver Kopplung [19] . . . . .	43
4.10	Links: Doppelseitiger Streifendetektor. Rechts: Akkumulationsschicht zwischen den $n^+$ -Streifen [19]. . . . .	44
4.11	Links: Aufnahme von $n^+$ -Streifen mit $p^+$ -Implantaten. Rechts: Unterbrechung der Akkumulationsschicht [19]. . . . .	45

---

LIST OF FIGURES

---

4.12	Darstellung eines Einzelereignisses (links) und zweier Hits mit zwei Ghosthits (rechts). . . . .	45
4.13	Links: Detaildarstellung einer Bump-Bond-Verbindung. Rechts: FlipChip-Pixel-detektor. [19] . . . . .	46
4.14	Links: Landauverteilung; rechts: Wahrscheinlichkeit ein hochenergetisches Elektron zu erzeugen [19] . . . . .	48
4.15	Microstripdetektor intermediate strips [19] . . . . .	50
4.16	3D Darstellng eines Silizium-Streifen-Detektors [20] . . . . .	51
4.17	Links: Frenkel-Defekt; rechts: Punktdefekt via Kernumwandlung [19] . . . . .	53
4.18	Clusterdefekt durch Primary Knock-On Atome, oder durch PKAs verursachte Kaskaden, hervorgerufen [19]. . . . .	54
4.19	Schädigung durch nicht ionisierenden Energieverlust für verschiedene Teilchen in Abhängigkeit der Teilchenenergie [20]. . . . .	55
4.20	Anstieg des Dunkelstroms bei steigender Bestrahlung. [22] . . . . .	56
4.21	Typinversion durch Bestrahlung [19] . . . . .	59
4.22	Aufbau der Depletionszone vor und nach Typ-Inversion [19]. . . . .	60
5.1	Flat Cross Stage [23] . . . . .	62
5.2	Hydra CM - 2 axis controller [24] . . . . .	63
5.3	Verwendeter Koordinatentisch zur Höhenverstellung [25] . . . . .	64
5.4	Verwendeter Infrarot-Laser mit zugehörigem Treiber [26]. . . . .	65
5.5	Interlocksensor zum Unterbrechen des Laserbetriebes . . . . .	66
5.6	Foto des Inneren der Dunkelbox . . . . .	67
5.7	32 Bit TTL-Interface der Firma Deditec [27]. . . . .	69
5.8	Foto des eingebauten ITC-irst Sensors . . . . .	70
5.9	Unterer Teil der Laserbox mit Kontrollgeräten. . . . .	72
5.10	Oberer Teil der Laserbox mit Aufbau . . . . .	73
6.1	Gesamtübersicht der programmierten Bedienoberfläche zur Ansteuerung des xy-Tisches sowie des TTL-Moduls. . . . .	75
7.1	Links: Schaltung zur Realisierung der ersten Messungen; rechts: Abbildung des verwendeten MPPCs [29]. . . . .	77
7.2	Messung des Lasersignals bei kleinster Leistungseinstellung . . . . .	78

---

LIST OF FIGURES

---

7.3	Vergleich der Sync-Output-Signale bei verschiedenen Triggerleveln . . .	79
7.4	Messungen des Lasersignals bei Gebrauch des Gateeingangs . . . . .	80
7.5	Messung der Zeitspanne von Triggersignal bis zur Signalregistrierung	81
7.6	Erste durchgeführte Messung nach Fertigstellung des Laser-Teststands	82
7.7	Plots der Intensitäten gegen die Kanalnummern . . . . .	84
A.1	Codefragment, welches die Schreib-Befehle ausführt. . . . .	90
A.2	Codefragment, welches die Zielkoordinate in x-Richtung setzt. . . . .	91
A.3	Codefragment, welches die Lese-Befehle ausführt. . . . .	92
A.4	Codefragment, welches die x-Koordinate zurückgibt. . . . .	93
A.5	Übersicht der programmierten Bedienoberfläche zur Ansteuerung des xy-Tisches. . . . .	94
A.6	Bedienoberfläche der Basic Commands . . . . .	95
A.7	Bedienoberfläche der Special Commands . . . . .	96
A.8	Bedienoberfläche des Error-Handlings . . . . .	97
A.9	Bedienoberfläche aller relevanten Informationen . . . . .	98
A.10	Bedienoberfläche der Settings . . . . .	100
A.11	Bedienoberfläche der Motion Commands . . . . .	102
A.12	Codefragment, welches die Pins auf Input oder Output setzt. . . . .	104
A.13	Codefragment, zum Auswählen der auf In-/Output zu setzenden Pins	105
A.14	Codefragment zur Ausgabe von high-/low-Signalen . . . . .	106
A.15	Codefragment zur Auswahl der high-/low-Signal ausgebenden Pins . .	107
A.16	Codefragment, welches die ausgewählten Input-Pins ausliest. . . . .	109
A.17	Codefragment zur Auswahl der auszulesenden Pins . . . . .	110
A.18	Übersicht der Bedienoberfläche zur Ansteuerung des TTL-Moduls . .	113
A.19	Plot der Intensität gegen die Kanalnummer für Tischposition a. . . .	114
A.20	Plot der Intensität gegen die Kanalnummer für Tischposition b. . . .	114
A.21	Plot der Intensität gegen die Kanalnummer für Tischposition c. . . .	115
A.22	Plot der Intensität gegen die Kanalnummer für Tischposition d. . . .	115
A.23	Plot der Intensität gegen die Kanalnummer für Tischposition e. . . .	116
A.24	Tabelle aller wichtigen Parameter für die Gaußfits der Datenpunkte der 5 Tischpositionen. . . . .	117

## Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, die vorgelegte Thesis selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt zu haben, die ich in der Thesis angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Thesis erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der ‚Satzung der Justus-Liebig-Universität zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis‘ niedergelegt sind, eingehalten. Gemäß § 25 Abs. 6 der Allgemeinen Bestimmungen für modularisierte Studiengänge dulde ich eine Überprüfung der Thesis mittels Anti-Plagiatssoftware.

---

Datum

---

Unterschrift