

Untersuchungen zur Qualität der optischen Datenübertragungsstrecke für den ATLAS-Pixel-Detektor

Diplomarbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Physiker

dem Fachbereich Physik der
Universität Siegen

vorgelegt von
Peter Schade

November 2005

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Physikalische Ziele des ATLAS-Experiments	2
1.2	Der ATLAS-Detektor	4
2	Grundlagen der optischen Datenübertragung	11
2.1	Aufbau einer optischen Datenübertragungsstrecke	11
2.2	Optische Sender und Empfänger aus Halbleitermaterialien	12
2.3	Optische Fasern als Lichtleiter	19
2.4	Gründe für und gegen die optische Datenübertragung	22
3	Die optische Datenübertragungsstrecke des ATLAS-Pixel-Detektors	23
3.1	Komponenten der Datenübertragungsstrecke	23
3.2	Design der Optoboards	29
3.3	Qualitätsanforderungen an die Optoboards	31
3.4	Implementierung der Datenübertragungsstrecke in den ATLAS-Detektor . .	33
4	Das Optoboard-Testsystem	35
4.1	Funktionen des Optoboard-Testsystems	35
4.2	Automatisierung der Messprozeduren	45
5	Eigenschaften des Optoboard-Testsystems	53
5.1	Qualität der optischen Ausgangssignale des Testsystems	53
5.2	Empfangsschwellen der DRX-Empfangeinheit	61
5.3	Systematik der Bitfehler-Schwellenmessung	66
5.4	Messungen der Eigenschaften der VCSEL-Signale eines Optoboards	75
6	Untersuchung der Qualität von Optoboards aus der Produktion	77
6.1	Qualitätsuntersuchungen am Optoboard BeO2097	77
6.2	Optoboard-Betrieb bei verschiedenen Betriebstemperaturen	89
7	Zusammenfassung und Ausblick	99
A	Verwendete Abkürzungen	102
B	Technische Details der Optoboards und des Optoboard-Testsystems	103
B.1	Belegung des 80-Pin Steckers der Messkarten	103
B.2	Kenndaten des temperaturabhängigen Widerstands auf den Optoboards . .	106
B.3	Betriebsparameter der Steuerkarte	106

C	Programme zur Automatisierung der Messprozeduren	107
C.1	Elementare Steuerprogramme des Testsystems	107
C.2	Dokumentation der Messprogramme	111
D	Ergebnisse der Untersuchung weiterer Optoboards	120
D.1	Ergebnisse der Qualitätsuntersuchungen der DORICs	120
D.2	Ergebnisse der Untersuchungen der VCSEL	123

1 Einführung

Der Proton-Proton-Speicherring LHC (Large Hadron Collider) wird am europäischen Forschungszentrum für Teilchenphysik CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) im Jahre 2007 in Betrieb gehen. In diesem Speicherring werden Protonen mit einer Energie von maximal 7 TeV auf gegenläufigen Bahnen gespeichert und in den Detektoren vierer Experimente zur Kollision gebracht. In den Wechselwirkungspunkten steht eine Schwerpunktsenergie von 14 TeV zur Verfügung.

ATLAS (A Torodial LHC Aparatus) ist eines dieser vier Experimente und wird in diesem ersten Kapitel dieser Arbeit genauer behandelt.

Der ATLAS-Pixel-Detektor ist der innerste Teil des ATLAS-Detektors und die dem Wechselwirkungspunkt am nächsten liegende Detektorkomponente. Eine optische Datenübertragungsstrecke ist für die Auslese der Daten des Pixel-Detektors sowie die Übertragung von Steuersignalen in den Pixel-Detektor vorgesehen. Diese Datenübertragungsstrecke wird im Zentrum dieser Arbeit stehen.

In Kapitel 2 werden grundlegende Elemente optischer Datenübertragungssysteme erläutert, um damit in Kapitel 3 diese optische Datenübertragungsstrecke vorzustellen.

Die detektorseitigen Komponenten der Datenübertragungsstrecke wurden von der Universität Siegen in Zusammenarbeit mit der Ohio State University für den Betrieb im Bereich der hohen Strahlung, die während des LHC-Betriebs im Pixel-Detektor herrschen wird, entwickelt. Sie befinden sich im Detektor auf speziellen Keramischen Platinen. An den beiden genannten Universitäten findet im Jahre 2005 die Fertigung dieser Einheiten statt. Die fertig gestellten Einheiten durchlaufen standardisierte Testprozeduren, die ihren korrekten Betrieb im ATLAS-Detektor sicherstellen sollen. Zur Durchführung dieser Qualitätsuntersuchungen wurde in Siegen ein elektronisches, automatisiertes Testsystem entwickelt. Dieses Testsystem ist in Kapitel 4 dokumentiert.

Für die korrekte Durchführung der Qualitätskontrollen wurden Untersuchungen der Eigenschaften des Testsystems vorgenommen, die in Kapitel 5 vorgestellt werden.

Zwischen April und November 2005 werden an der Universität Siegen 100 der detektorseitigen Einheiten der Datenübertragungsstrecke gefertigt. Ergebnisse der Qualitätsuntersuchungen an einiger dieser Einheiten werden in Kapitel 6 vorgestellt.

Abschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse in Kapitel 7 zusammengefasst.

1.1 Physikalische Ziele des ATLAS-Experiments

Das ATLAS-Experiment [ATDe1][ATDe2] soll grundlegende Messungen zur Elementarteilchenphysik durchführen und neue Erkenntnisse zur Higgs-Physik, Top- und Bottom-Physik und der Physik jenseits des Standardmodells (s.u.) liefern.

Die maximale Schwerpunktsenergie, die in Proton-Proton-Kollisionen im Wechselwirkungspunkt des ATLAS-Detektors erreichbar sein wird, übertrifft die aller vorangegangenen Experimente dieser Art. Das erlaubt die Überprüfung der Vorhersagen des Standardmodells, der Theorie zur Beschreibung der Elementarteilchen und ihrer Wechselwirkungen.

Das Standardmodell

Das Standardmodell beschreibt alle bisher (2005) nachgewiesenen elementaren Bestandteile der Materie. Diese unterteilen sich in Leptonen und Quarks, die Fermionen, d.h. Teilchen mit halbzahligen Spin, sind. Die Kräfte, die zwischen den Elementarteilchen wirken, erklärt das Standardmodell durch Austauscheteilchen. Die Austauscheteilchen sind Bosonen, d.h. Teilchen mit ganzzahligem Spin.

- Leptonen

Das Elektron e , das Myon μ und das Tau τ und ihre jeweiligen Neutrinos werden im Standardmodell als Leptonen bezeichnet. Die ersten drei genannten (e , μ und τ) tragen jeweils eine Elementarladung. Im Gegensatz dazu sind die Neutrinos ungeladen. Zu jedem der drei geladenen Leptonen existiert jeweils ein Antilepton mit positiver Elementarladung, denen analog ein Antineutrino zugeordnet wird. Insgesamt existieren damit sechs Leptonen und sechs Antileptonen.

$$\underbrace{\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}}_{\text{Leptonen}} \quad \underbrace{\begin{pmatrix} \bar{e} \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{\mu} \\ \bar{\nu}_\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{\tau} \\ \bar{\nu}_\tau \end{pmatrix}}_{\text{Antileptonen}}$$

- Quarks

Neben den Leptonen existieren sechs Quarks und sechs Antiquarks. In Einheiten der Elementarladung tragen das Up-, Charm- und Top-Quark (u, c, t) eine Ladung von $q_+ = \frac{2}{3}$, das Down-, Strange-, und Bottom-Quark (d, s, b) eine Ladung von $q_- = -\frac{1}{3}$. Quarks existieren nicht als freie Teilchen, sondern sind in Mesonen oder Baryonen, zusammenfassend Hadronen genannt, gebunden. Gebundene Zustände aus 3 Quarks bilden die Baryonen, zu denen z.B. die Protonen (Quarkinhalt: u, u, d) und Neutronen (Quarkinhalt: u, d, d) gehören. Gebundene Zustände aus einem Quark und einem Antiquark sind Mesonen.

$$\underbrace{\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}}_{\text{Quarks}} \quad \underbrace{\begin{pmatrix} \bar{u} \\ \bar{d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{c} \\ \bar{s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{t} \\ \bar{b} \end{pmatrix}}_{\text{Antiquarks}}$$

- Austauscheteilchen

Das Standardmodell beschreibt drei Wechselwirkungen zwischen den Elementarteilchen: die starke Kernkraft, die elektromagnetische Kraft und die schwache Kernkraft.

Jeder der Wechselwirkungen kann mindestens ein Austauscheteilchen zugeordnet werden.

Das Photon γ ist das Austauscheteilchen der elektromagnetischen Kraft, der alle geladenen Elementarteilchen unterliegen. Das Gluon g ist das Austauscheteilchen der starken Kraft, der nur die Quarks unterliegen. Gluon und Photon besitzen keine Ruhemasse. Im Gegensatz dazu hat die schwache Kraft, die auf alle Elementarteilchen wirkt, massive Austauscheteilchen, das W^{+-} , W^- und Z -Boson. Die schwache Kraft bildet keine gebundenen Zustände und ist in der Regel nur nachweisbar, wenn nicht gleichzeitig elektromagnetische oder starke Kräfte wirken. Das Standardmodell fasst die schwache und die elektromagnetische Kraft zur elektroschwachen Wechselwirkung zusammen.

Zusätzlich unterliegen alle massiven Elementarteilchen der Gravitationskraft, als dessen Austauscheteilchen das Graviton vermutet wird. Diese Kraft wird im Standardmodell nicht beschrieben, sie ist aber gegenüber der starken, elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung in Reaktionen zwischen den Elementarteilchen vernachlässigbar.

Zusätzlich zu den beschriebenen Teilchen sagt das Standardmodell die Existenz des Higgs-Bosons (siehe z.B. [Perk4]), eines weiteren massiven Bosons, voraus. Dieses konnte bisher nicht nachgewiesen werden. Es wird zur Erklärung der Ruhemassen der Leptonen, Quarks und Austauscheteilchen der schwachen Kraft benötigt. Eine untere Grenze seiner Masse wurde in Experimenten am Large Electron Positron Collider (LEP) auf $114.4 \text{ GeV}/c^2$ (95% Konfidenzniveau) [ADOL3] bestimmt.

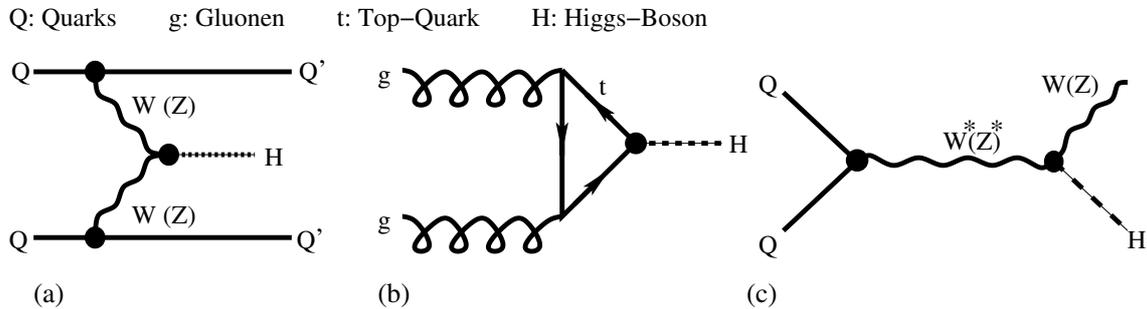


Abbildung 1.1: Higgs-Produktion in Proton-Proton-Kollisionen (nach [Perk4])

In Proton-Proton-Kollisionen könnte ein Higgs-Boson H z.B. durch W^- , oder Z -Fusion (Abb. 1.1 (a)), durch Gluon-Fusion (b), oder Bremsstrahlung eines W^- oder Z -Bosons (c) erzeugt werden. Die Identifikation eines Higgs-Bosons kann durch Nachweis seiner Zerfallsprodukte gelingen. Für kleine Higgs-Massen ($M_H = 100 \text{ GeV}/c^2$ bis $150 \text{ GeV}/c^2$) ist der favorisierte Zerfall

$$H \rightarrow \gamma\gamma.$$

Für größere Higgs-Massen ($M_H = 150 \text{ GeV}/c^2$ bis $1000 \text{ GeV}/c^2$) kann sowohl der Zerfall in geladene Leptonen (l^\pm)

$$H \rightarrow l^+l^-l^+l^-, \quad H \rightarrow l^+l^- \nu\nu,$$

oder in Quarks bzw. W^- und Z -Bosonen auftreten

$$H \rightarrow b\bar{b}, \quad H \rightarrow WW, ZZ.$$

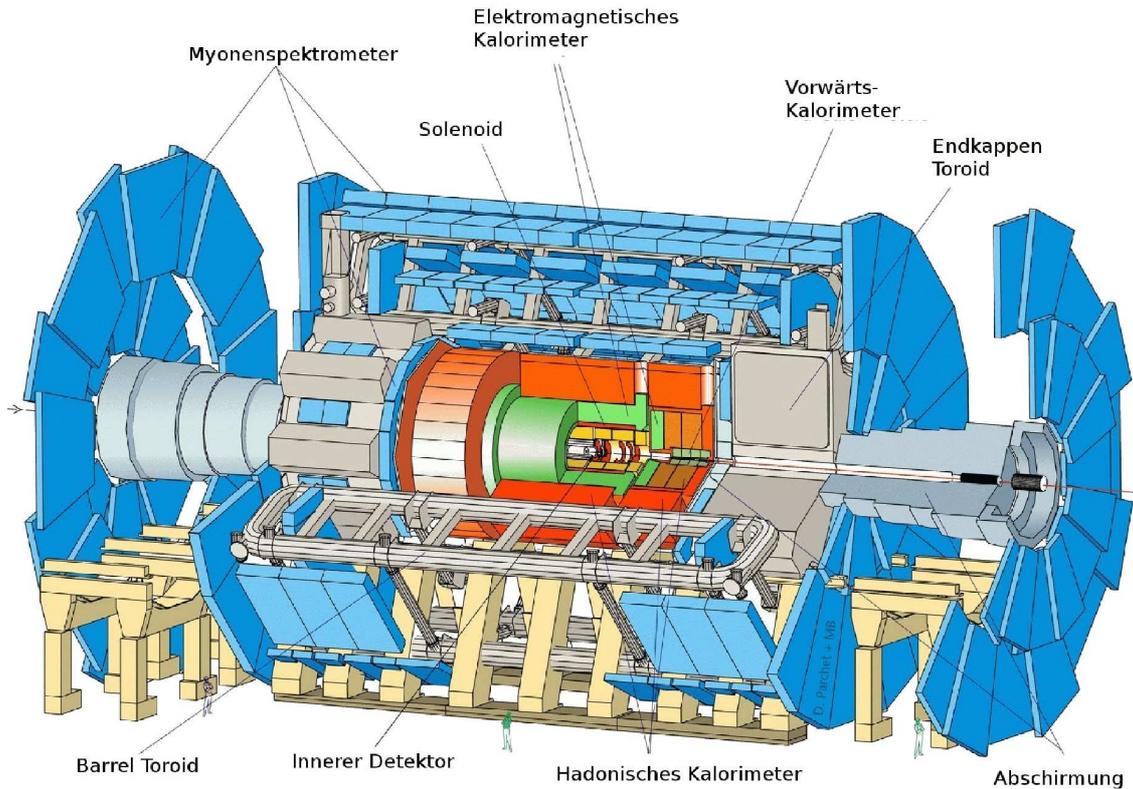


Abbildung 1.2: Komponenten des ATLAS-Detektors (schematisch) [ATDe1]

Proton-Proton-Kollisionen finden z.B. im Zentrum des ATLAS-Detektors (siehe Kapitel 1.2) statt, der Teil des ATLAS-Experiments am Proton-Proton-Speicherring LHC (Large Hadron Collider) ist. Die im LHC gespeicherten Protonen befinden sich in Paketen (Bunch) von etwa 10^{11} Teilchen. In jedem Wechselwirkungspunkt in einem von vier Experimenten (s.u.) treffen sich diese Teilchenpakete in einem zeitlichen Abstand von 25 ns. In jeder Kollision (Bunch-crossing) treten durchschnittlich 23 Wechselwirkungen zweier Protonen auf. Die erreichbare Luminosität ist $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Das ATLAS-Experiment soll die Existenz des Higgs-Bosons nachweisen und offene Fragen im Bereich der über das Standardmodell hinausgehenden Physik klären, sowie weitere präzise Messungen z.B. zur Physik der Top- und Bottom-Quarks vornehmen.

Am LHC werden neben ATLAS die Experimente Compact Myon Solenoid (CMS), A Large Ion Collider Experiment (ALICE) und Large Hadron Collider beauty experiment (LHCb) betrieben werden (siehe z.B. [CERN]).

1.2 Der ATLAS-Detektor

Der ATLAS-Detektor (A Torodial LHC Apparatus) ist der zentrale Bestandteil des ATLAS-Experiments. Er misst die Energie und Bahnen der durch die Wechselwirkungen in seinem Inneren erzeugten Teilchenstrahlen (Jets). Abbildung 1.2 zeigt den schematischen Aufbau des ATLAS-Detektors [ATDe1]. Der gesamte Detektor hat eine Länge von 44 m, einen Durchmesser von 22 m und wird im vollständig aufgebauten Zustand eine Masse von etwa 7000 t besitzen. Der Detektor hat einen zwiebelartigen Aufbau, d.h. Detektor-

elemente mit verschiedenen Aufgaben sind in Lagen um den Wechselwirkungspunkt im Zentrum des Detektors angeordnet. Die in Abbildung 1.2 bezeichneten Detektorbestandteile, der innere Detektor und die äußeren Bestandteile, die elektromagnetischen- und hadronischen Kalorimeter sowie die Myonenspektrometer, werden nachfolgend erläutert (siehe [ATDe1] und Referenzen darin).

1.2.1 Der innere Detektor

Der innere Detektor ist die Detektorkomponente in der der Wechselwirkungspunkt der Protonen liegt. Er dient der Aufnahme von Spurpunkten der Teilchenbahnen, die vom Wechselwirkungspunkt ausgehen. Diese Messpunkte erlauben die Rekonstruktion der Teilchenbahnen. Der innere Detektor besteht aus dem Pixel-Detektor, einem Silizium-Streifen-Detektor (SCT) und einem Übergangsstrahlungsdetektor (TRT) und ist in Abbildung 1.3 schematisch dargestellt.

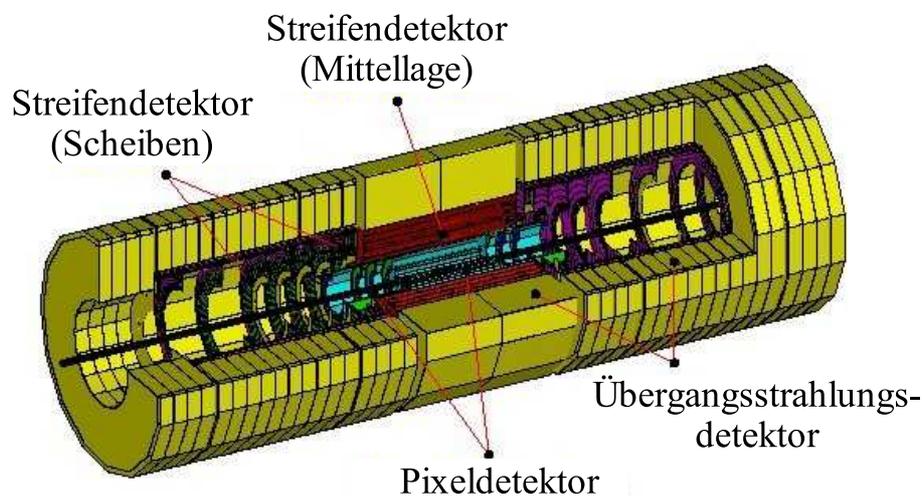


Abbildung 1.3: Der innere Detektor (schematisch) [InDe]

Der innere Detektor ist 7 m lang und hat einen Durchmesser von 2.30 m. Seine Detektoren können typischerweise 36 Spurpunkte von geladenen Teilchen ermitteln. Teilchenimpulse werden über die Messung der Radien der Teilchenbahnen im 2 T starken Magnetfeld parallel zur Strahlrichtung, welches ein supraleitendes Magnetsystem, der Solenoid, im inneren Detektor erzeugt, bestimmt.

Der Pixel-Detektor

Abbildung 1.4 zeigt schematisch den Aufbau des Pixel-Detektors. Dieser besteht aus fein segmentierten Pixel-Modulen, die in drei Lagen (Barrel, engl. für Faß) parallel um die Strahlröhre und auf drei Scheiben¹ (Disc, engl. für Scheibe) zu jeder Seite entlang der Strahlröhre angeordnet sind.

Vom Wechselwirkungspunkt im Zentrum des Pixel-Detektors aus gemessen hat die innerste Lage (B-Lage) einen Radius von etwa 5 cm, die zweite und dritte Lage folgen bei etwa 10 cm und 13 cm. Die abschließenden drei Scheiben befinden sich vom Wechselwirkungspunkt aus

¹Die Anzahl der Scheiben weicht von [ATDe1] ab, die neue Zahl der Scheiben ist [FHüg] entnommen.

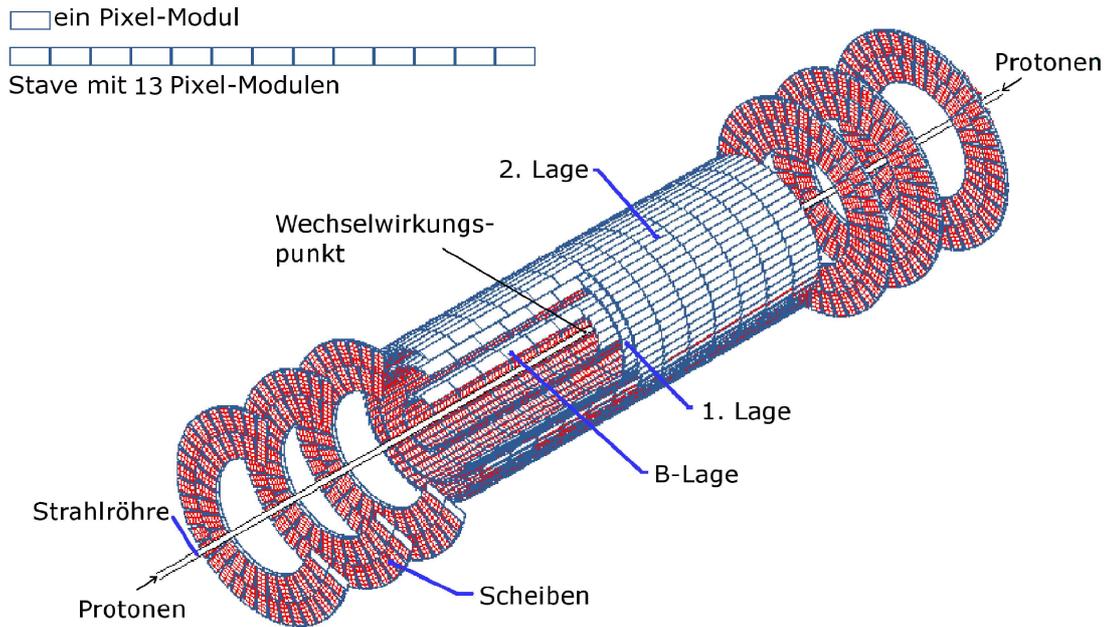


Abbildung 1.4: Der ATLAS Pixel-Detektor (schematisch nach [InDe])

gemessen bei etwa 49 cm, 61 cm und 76 cm zu beiden Seiten entlang der Strahlröhre und haben einen Radius von 11 cm bis 20 cm. Die Pixel-Module sind etwa $62 \text{ mm} \times 21 \text{ mm}$ groß. Je 13 dieser Module werden auf eine Kohlefaserstruktur (Stave, engl. für Daube) aufgebracht. Diese Staves bilden die Detektorlagen. Die B-Lage besteht aus 22 Staves, die erste Lage aus 38 und die äußere Lage benötigt 52 Staves. Mit den sechs Scheiben, auf denen jeweils 56 Pixel-Module angebracht sind, befinden sich etwa 1700 Pixel-Module im Detektor. Der Aufbau der Pixel-Module wird in Kapitel 1.2.3 erläutert.

Der Silizium-Streifen-Detektor

Der Silizium-Streifen-Detektor (SCT) soll zwischen dem Pixel-Detektor und dem Übergangsstrahlungsdetektor (TRT) vier Messpunkte einer Teilchenbahn liefern, um die Bestimmung der Teilchenbahn und des Teilchenimpulses zu präzisieren. Dazu besteht der SCT aus acht Detektorlagen um den Pixel-Detektor und neun Scheiben zu beiden Enden. Darin sind 12 cm lange Siliziumstreifen mit $80 \mu\text{m}$ Abstand angeordnet. Zwei dieser Detektorlagen werden kombiniert, indem sie unter einem Winkel von 40 mrad verbunden werden. Die dadurch entstehenden vier kombinierten Lagen sind in Radien von 30 cm, 37 cm, 45 cm und 52 cm um die Strahlröhre angeordnet und werden jeweils einen Raumpunkt mit einer Auflösung von $16 \mu\text{m}$ in der $r - \varphi$ Ebene senkrecht zur Strahlachse und $580 \mu\text{m}$ in der z -Richtung entlang der Strahlachse liefern.

Der Übergangsstrahlungsdetektor

Weiter außen folgt der Übergangsstrahlungsdetektor (TRT), der der äußerste Bestandteil des inneren Detektors ist. Ein Übergangsstrahlungsdetektor registriert Influenzladungen, die durchgehende geladene Teilchen im Detektorvolumen erzeugen (siehe z.B. [Gru93]).

Der TRT besteht aus mit Xenongas gefüllten Röhren mit Durchmesser 4 mm, in deren Mitte jeweils ein vergoldeter $30\ \mu\text{m}$ starker Draht gespannt ist, an den eine Hochspannung angelegt wird. Die etwa 50000 Röhren sind jeweils 144 cm lang und parallel zur Strahlachse angeordnet. An den Endkappen sind weitere 320000 Röhren radial angeordnet. Der Raum zwischen den Röhren ist mit einem Kunststoff ausgefüllt, in dem die Übergangsstrahlung erzeugt wird. Anhand zweier Ansprechschwellen kann zwischen direkten Treffern eines Röhrchens und Signalen, die Treffer von Übergangsstrahlungsphotonen erzeugt haben, unterschieden werden. Durch eine Driftzeitmessung wird ein Treffer mit einer Genauigkeit von $170\ \mu\text{m}$ im Raum identifiziert werden können. Der gesamte TRT hat 420000 Kanäle und kann typischerweise 36 Spurpunkte bestimmen. Die Anordnung des Übergangsstrahlungsdetektors wird durch Abbildung 1.3 verdeutlicht.

1.2.2 Die äußeren Detektorbestandteile

Zu den äußeren Detektorbestandteilen zählen die Kalorimeter, die die Energie von Teilchenstrahlen (Jets) bestimmen können und die Myonenspektrometer, die Spurpunkte durchdringender Myonen messen. Abbildung 1.5 zeigt schematisch die Anordnung der hadronischen und elektromagnetischen Kalorimeter im ATLAS-Detektor.

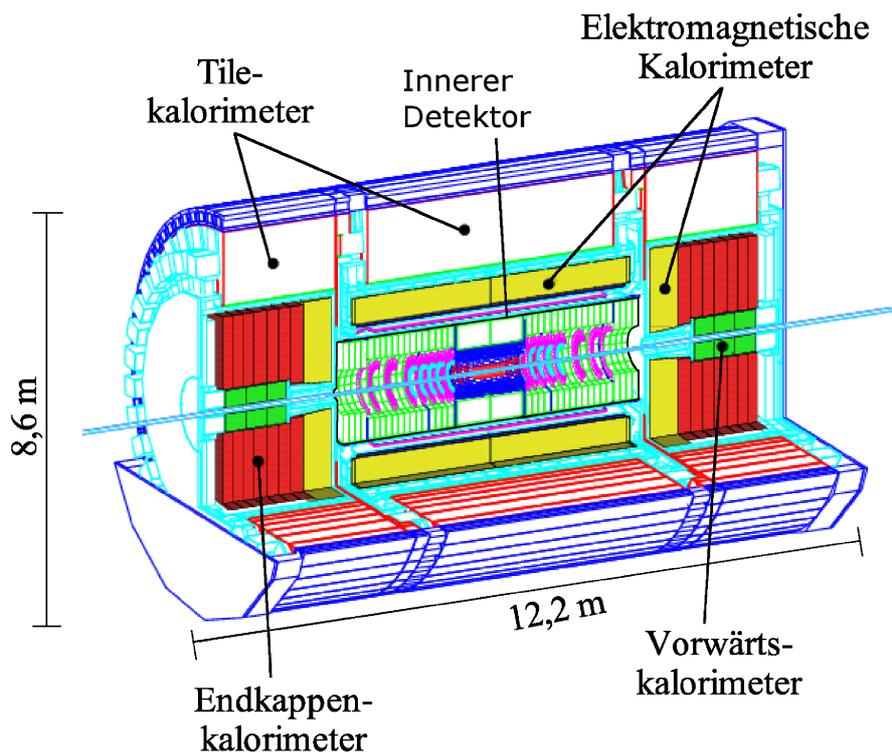


Abbildung 1.5: Die Kalorimeter des ATLAS-Detektors (schematisch nach [ATDe1])

Alle Kalorimeter sind als Sampling-Kalorimeter ausgeführt. Das bedeutet, sie bestehen jeweils aus zwei Komponenten. In einer passiven Schicht des Kalorimeters produzieren einfallende Teilchen sekundäre Teilchen, z.B. durch Bremsstrahlung oder durch Ionisation. Der entstehende Teilchenschauer mit niedrigerer Energie pro Teilchen wird idealerweise im nachfolgenden aktiven Teil des Kalorimeters absorbiert. Derart kann seine Energie und damit die Energie des einfallenden Teilchens bestimmt werden. Die Anzahl der Teilchen

im Schauer ist ein Maß für die eingefallene Energie.

Sämtliche Kalorimeter weisen eine Segmentierung auf, durch die eine weitere Ortsinformation eines einfallenden Teilchenstrahls erhalten werden kann.

Das elektromagnetische Kalorimeter

Das elektromagnetische Kalorimeter umgibt den inneren Detektor und hat die Aufgabe, Elektronen und γ -Strahlen zu absorbieren und deren Energie zu messen, stark wechselwirkende Teilchen aber ohne Energieverlust passieren zu lassen. Das passive Material des elektromagnetischen Kalorimeters ist Blei, das aktive ist flüssiges Argon. Für Elektronen und Photonen hat das elektromagnetische Kalorimeter eine Dicke von mehr als 24 Strahlungslängen². Das bedeutet, dass praktisch alle diese Teilchen absorbiert werden. Teilchenschauer, die in der Bleischicht entstehen, ionisieren das flüssige Argon. Die entstehenden Ladungen driften, durch eine Hochspannung getrieben, auf die Elektroden. Das elektromagnetische Kalorimeter hat etwa 190000 Auslesekanäle, durch die eine Ortsinformation gewonnen wird.

Die hadronischen Kalorimeter

Die Energie stark wechselwirkender Teilchen wird in den hadronischen Kalorimetern gemessen, die das elektromagnetische Kalorimeter umgeben. Die hadronischen Kalorimeter sollen alle stark wechselwirkenden Teilchen und von diesen erzeugte Schauer absorbieren, damit Messungen in den Myonenspektrometern (s.u.) nicht verfälscht werden. Die totale Dicke der hadronischen Kalorimeter beträgt für Hadronen 11 Strahlungslängen. Es gibt drei Typen hadronischer Kalorimeter (vgl. Abb 1.5):

Das Tile-Kalorimeter besteht aus drei Schichten eines 14 mm dicken Eisenabsorbers kombiniert mit einer 3 mm dicken Schicht szintillierenden Kunststoffes als aktives Material. Teilchenschauer, die im Eisen produziert werden, regen Atome im Kunststoff an, die sich unter Abgabe optischer Photonen abregen. Die Anzahl dieser Photonen ist proportional zur Anzahl der Schauerteilchen und somit zur deponierten Energie. Photonenvervielfacher registrieren die optischen Photonen und deren Anzahl. Das gesamte Tile-Kalorimeter besitzt 10000 dieser Kanäle.

Die hadronischen Endkappenkalorimeter benutzen wie das elektromagnetische Kalorimeter flüssiges Argon als aktives Material. Als passives Material dienen mehrere Lagen Kupferplatten von 25 mm Dicke oder weiter vom Wechselwirkungspunkt entfernt, 50 mm Dicke. Dazwischen befindet sich jeweils eine 8.5 mm dicke aktive Schicht.

Die Vorwärtskalorimeter müssen den höchsten Strahlendosen standhalten. Sie bestehen aus drei Schichten Kupfer und zwei Wolframlagen. Das aktive Material der Vorwärtskalorimeter ist ebenfalls flüssiges Argon in Röhren, die parallel zur Strahlröhre in die Absorber gebohrt sind. Feine Drähte in diesen Röhren liegen gegenüber dem geerdeten Absorber auf einer Hochspannung und sammeln entstehende Ladungen ein. Jede Seite des Vorwärtskalorimeters hat 3584 Kanäle.

²Die Strahlungslänge ist die Strecke, die ein einfallendes geladenes Teilchen der Energie E in einem Medium durchschnittlich zurücklegt, bis seine Energie um den Faktor e^{-1} abgenommen hat (siehe z.B. [Gru93]).

Die Myonenspektrometer

Die Myonenspektrometer sind die äußersten Detektorbestandteile. Myonen sind elektromagnetisch wechselwirkende Teilchen, werden aber nicht in den elektromagnetischen Kalorimetern absorbiert. Der Grund hierfür ist die etwa 200mal größere Masse der Myonen im Vergleich zu den Elektronen.

Der Bremsstrahlungsverlust ist proportional zur Energie, aber umgekehrt proportional zur Masse eines einfallenden Teilchens (siehe z.B. [Gru93]). Für Elektronen ist die Bremsstrahlung ein Hauptmechanismus des Energieverlusts, für Myonen dagegen Ionisation und Anregung, die durch die Bethe-Bloch Formel beschrieben wird. Myonen durchdringen das elektromagnetische und die hadronischen Kalorimeter. Ihre Energie wird nicht durch Absorption bestimmt, sondern über Messung ihres Impulses. Wie in Abbildung 1.2 zu sehen ist, liegt im Bereich der Myonenspektrometer ein ebenfalls supraleitendes Magnetsystem (Barrel-Toroid und Endkappen-Toroid). Dieses Magnetsystem erzeugt ein Magnetfeld, dessen Stärke im Zentrum des Magnetsystems bis zu 4 T beträgt. Die Myonenspektrometer messen Spurpunkte eines Myons in drei Lagen. Aus der Krümmung der Bahn im Magnetfeld kann der Impuls bestimmt werden. Diese drei Lagen liegen nahe der äußeren und inneren Grenzen und im Zentrum des Magnetfelds.

1.2.3 Funktionsweise der Pixel-Module

Ein Pixel-Modul [FHüg] ist schematisch in Abbildung 1.6 im Querschnitt gezeigt.

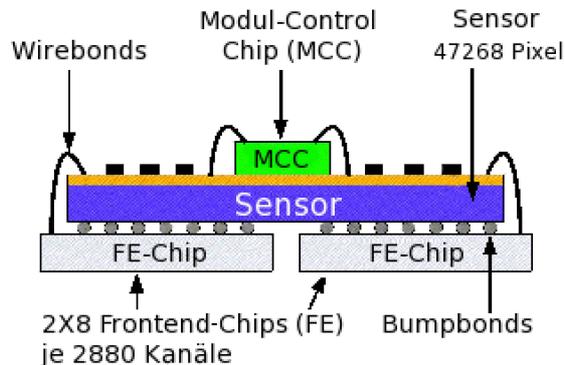


Abbildung 1.6: Pixel-Modul im Querschnitt (schematisch nach [FHüg])

Der Sensor jedes Pixel-Moduls besteht aus einem Siliziumelement, das in 47268 Pixel segmentiert ist. Jeder Pixel ist, durch einen Bumpbond, mit einem Eingang der Frontend-Chips (FE) verbunden. Etwa 5% der Pixel werden paarweise von einem Kanal eines FEs ausgelesen, deshalb hat ein Pixel-Modul insgesamt nur 46080 Kanäle. Zweideutigkeiten, die dadurch entstehen, werden in der Datennahme korrigiert. Jeder der 16 FEs unter einem Pixel-Modul besitzt 2880 Kanäle. Wirebonds verbinden die FEs mit einer speziellen flexiblen Platine (Flex), die auf das Sensorelement aufgeklebt ist. Der Module-Control-Chip (MCC) auf diesem Flex liest die 16 FEs aus.

Der MCC erhält ein 40 MHz-Taktsignal und Steuersignale über einen Empfangskanal. Über einen Auslesekanal pro Modul kann der MCC die aus den 16 FEs ausgelesenen Daten übertragen. Modulen der B-Lage stehen zwei Auslesekanäle zur Verfügung. Diese Kommunikation mit den äußeren Steuereinheiten geschieht ab dem MCC über eine kurze Strecke von etwa 1 m in differentiellen elektrischen Signalen. Der größere Teil der

Kommunikationsstrecke (etwa 100 m) ist als optische Datenübertragungsstrecke realisiert [APOE]. Die detektorseitigen Bestandteile dieser Datenübertragungsstrecke werden wird im Zentrum dieser Arbeit stehen und sind in Kapitel 3 genauer beschrieben.

2 Grundlagen der optischen Datenübertragung

In diesem Kapitel soll zunächst der Aufbau einer optischen Datenübertragungsstrecke allgemein erläutert werden. Die optische Datenübertragungsstrecke des ATLAS-Pixel-Detektors (A Torodial LHC Apparatus) nutzt als Lichtquelle einen speziellen Typ Halbleiterlaser, den Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL). Als Lichtdetektoren kommen PIN-Dioden zum Einsatz (siehe Kapitel 3). Der Aufbau und die Funktionsweisen dieser beiden Bauteile sowie der verwendeten optischen Fasern sollen hier genauer erörtert werden.

2.1 Aufbau einer optischen Datenübertragungsstrecke

Eine optische Datenübertragungsstrecke (siehe z.B. [GoAg]) besteht aus einer Sendeeinheit, die aus elektrischen Eingangssignalen optische Signale erzeugt, einem optischen Übertragungsmedium und einer Empfangseinheit, die die optischen Signale empfängt und als elektrische Signale ausgibt. In Abbildung 2.1 sind diese Bestandteile schematisch dargestellt.

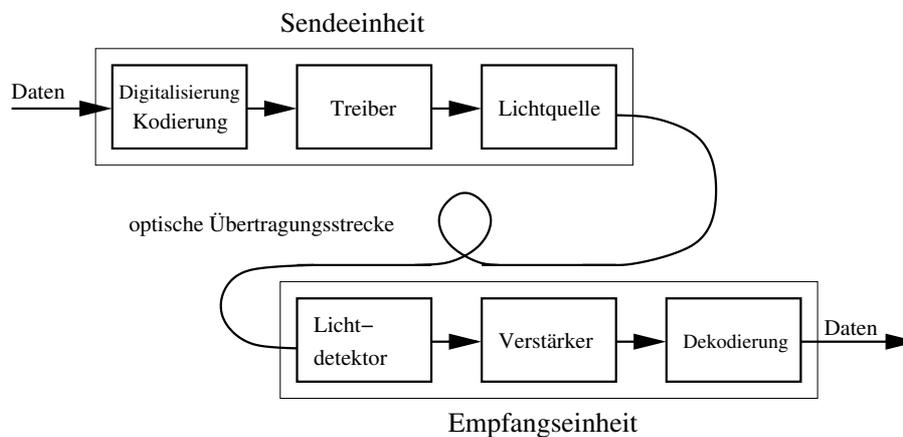


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau einer optischen Datenübertragungsstrecke (schematisch)

Man kann zwischen analoger und digitaler Übertragungstechnik unterscheiden. Im analogen Fall bestimmen die zu übertragenden Daten die Lichtintensität der Lichtquelle. Im digitalen Fall werden Daten in einer Bitfolge aus Logisch 1 (Licht eingeschaltet) und Logisch 0 (Licht ausgeschaltet) übertragen.

Digitale Daten können vor der Übertragung in der Sendeeinheit kodiert werden. Die kodierte Übertragung hat abhängig vom Kodierungsschema z.B. die Vorteile, dass die Lichtquelle nicht über längere Zeit inaktiv ist und somit stabiler arbeitet oder im Empfänger eine Taktrückgewinnung aus dem übertragenen Signal möglich ist.

Die kodierten Signale werden durch einen Treiber mit einer Lichtquelle optisch ausgegeben, laufen über optische Fasern und werden von einem Lichtdetektor empfangen und wieder in elektrische Signale umgewandelt. Ein Verstärker passt die Signalpegel für die Dekodierung an. Die dekodierten Signale werden dann weiterverarbeitet.

Die optische Datenübertragungsstrecke des ATLAS-Pixel-Detektors überträgt Daten in digitaler Form und benutzt optische Fasern als Übertragungsmedium. Dabei wird in der Übertragungsrichtung in den Detektor als Kodierungsschema die Biphas-Mark-Kodierung verwendet, die in Kapitel 3.1.1 erläutert wird.

2.2 Optische Sender und Empfänger aus Halbleitermaterialien

Im Folgenden werden zunächst kurz die Eigenschaften halbleitender Materialien (siehe z.B. [Kit]) diskutiert. Aus diesen Materialien sind die optischen Sender und Empfänger gefertigt, die anschließend in den Kapiteln 2.2.1 und 2.2.2 erläutert werden.

Eigenschaften von Halbleitermaterialien

Die möglichen Energiezustände, die Elektronen in reinen (intrinsischen) Halbleitermaterialien (z.B. Silizium oder Gallium-Arsenid) annehmen können, beschränken sich auf Zustände im Valenzband und Zustände im Leitungsband. Diese beiden Bänder sind durch eine Energielücke (oder Bandlücke) getrennt, deren Größe E_g vom Halbleitermaterial abhängt (typisch sind einige Elektronenvolt). Ein Elektron in einem Zustand des Valenzbands ist an ein Atom im Gitter des Halbleiters gebunden und kann nicht zur elektrischen Leitfähigkeit beitragen, während sich ein Elektron in einem Zustand des energetisch höher liegenden Leitungsbands durch das Gitter bewegen kann.

Die Besetzungswahrscheinlichkeit eines Zustands der Energie E durch ein Elektron ist durch die Fermifunktion $f_e(E, E_f)$ gegeben:

$$f_e(E, E_f) = \left(e^{\frac{E - E_f}{k_B \cdot T}} + 1 \right)^{-1} \quad (2.1)$$

Dabei ist k_B die Boltzmannkonstante, T die Temperatur und E_f die Fermienergie, die beim reinen Halbleiter einen Wert in der Mitte der Energielücke annimmt.

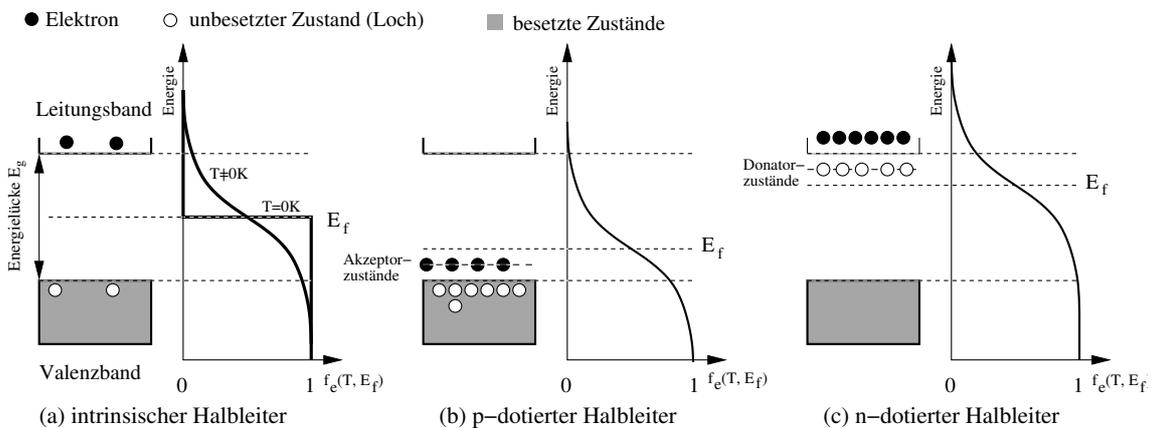


Abbildung 2.2: Energieniveaus intrinsischer-, p- und n-dotierter Halbleiter

Zusätzliche energetische Zustände in der Bandlücke entstehen durch Einbringen von Fremdatomen in den reinen Halbleiter (Dotierung). Bei p-dotierten Halbleitern befinden sich

diese (einige meV) oberhalb des Valenzbands (Akzeptorzustände). Der Wert der Fermienergie E_f rückt näher zur Energie der Valenzbandkante. Elektronen aus dem Valenzband können in die Akzeptorzustände angeregt werden, so dass unbesetzte Zustände im Valenzband (Löcher) entstehen (Abb. 2.2 (b)). Diese Löcher bewegen sich im Material und verhalten sich wie Elektronen positiver Ladung.

Im entgegengesetzten Fall, der n-Dotierung, entstehen zusätzliche Zustände (einige meV) unter der Leitungsbandkante (Donatorzustände). Der Wert der Fermienergie rückt näher zur Energie der Leitungsbandkante. Die Elektronen in den Donatorzuständen können in das Leitungsband angeregt werden (Abb. 2.2 (c)).

Die Dichte der Elektronen im Leitungsband und der Löcher im Valenzband bestimmt die Leitfähigkeit des Halbleiters. Bei starker Dotierung kann der Wert der Fermienergie unterhalb der Valenzbandkante ($p+$ -Dotierung) oder oberhalb der Leitungsbandkante ($n+$ -Dotierung) liegen.

Elektron-Loch Rekombination

Das Zurückfallen eines Elektrons aus einem Zustand des Leitungsbands in einen unbesetzten Zustand des Valenzbands (Elektron-Loch Rekombination) kann spontan oder stimuliert ablaufen (siehe z.B. [GoAg]).

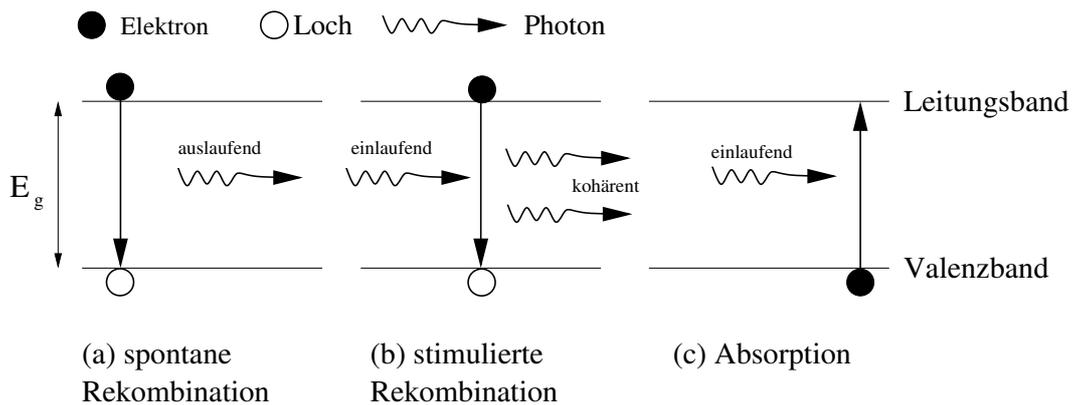


Abbildung 2.3: Elektron-Loch Rekombination und Absorption im Halbleiter

Rekombiniert das Elektron mit dem Loch spontan (Abb. 2.3 (a)), wird die freiwerdende Energie ($E \geq E_g$ pro Rekombinationsvorgang) durch Photonen in zufällige Richtung und ohne feste Phasenbeziehung emittiert. Stimulierte Rekombination, bei der die Energie E frei wird, wird durch ein einlaufendes Photon der gleichen Energie E ausgelöst. Die beiden auslaufenden Photonen gleicher Energie sind kohärent (Abb. 2.3 (b)).

Das Verhältnis der Raten von stimulierter zu spontaner Rekombination ist im thermischen Gleichgewicht

$$\frac{R_{\text{stimuliert}}}{R_{\text{spontan}}} = \left(e^{\frac{h\nu}{k_B \cdot T}} - 1 \right)^{-1}. \quad (2.2)$$

Bei Raumtemperatur ($k_B \cdot T \approx 25 \text{ meV}$ und $h\nu \approx 1 \text{ eV}$) findet praktisch nur spontane Rekombination statt ($\frac{P_{\text{stimuliert}}}{P_{\text{spontan}}} \approx 10^{-18}$).

Ein einlaufendes Photon, das eine Energie trägt, die größer als die Bandlücke E_g ist, kann ein Elektron aus einem Zustand des Valenzbands in einen Zustand des Leitungsbands anregen. Diese Absorption von Photonen erzeugt Elektron-Loch Paare (Abb. 2.3 (c)).

Übergangsschichten von p- zu n-dotierten Bereichen

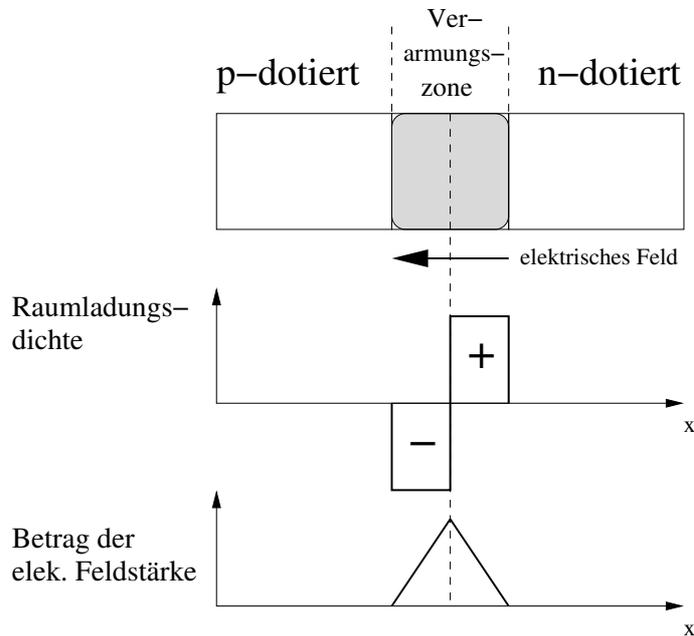


Abbildung 2.4: p-n Übergang

An der Übergangsschicht von p- zu n-dotiertem Halbleitermaterial rekombinieren die Elektronen im Leitungsband der n-dotierten Seite mit den Löchern im Valenzband der p-dotierten Seite und die Fermienergie nimmt im thermischen Gleichgewicht auf beiden Seiten den gleichen Wert an. Im Bereich dieser Rekombination entsteht eine von frei beweglichen Ladungsträgern verarmte Zone (Verarmungszone). Da die Elektronen der n-dotierten Seite auf die p-dotierte Seite übergehen, entstehen Raumladungszonen an beiden Seiten des Übergangs. Es baut sich ein elektrisches Feld auf, das weitere Rekombination verhindert (vgl. Abb. 2.4).

Durch Anlegen einer äußeren elektrischen Spannung, die das interne elektrische Feld schwächt, wird das System in einen stationären Ungleichgewichtszustand versetzt. Die Besetzungswahrscheinlichkeiten werden weiterhin durch (2.1) beschrieben, jedoch herrschen unterschiedliche Fermienergien (Quasi-Ferminiveaus) im p-dotierten Bereich E_f^{VB} und n-dotierten Bereich E_f^{LB} . Es fließt ein Strom durch den Übergang, und es findet ständig Rekombination statt (Abb. 2.5).

Die bei jedem Rekombinationsvorgang freiwerdende Energie der Größe der Bandlücke kann als Dipolstrahlung emittiert werden. Dieser Betrieb wird als Lichtquelle verwendet (s.u.). Durch Anlegen eines äußeren Felds, das das interne elektrische Feld stärkt, wird die Verarmungszone vergrößert. Elektron-Loch Paare, die durch Absorption von Photonen in der Verarmungszone gebildet werden, werden durch das elektrische Feld getrennt. Dieser Betrieb wird bei einem optischen Empfänger verwendet (s.u.).

2.2.1 Der Halbleiterlaser

Ein Laser (Light Amplification By Stimulated Emission) emittiert kohärentes Licht. Der p-n Übergang eines Halbleitermaterials kann Laserlicht emittieren, wenn er in Durchflussrichtung betrieben wird und zwei Bedingungen erfüllt sind (siehe z.B. [Mesch] oder

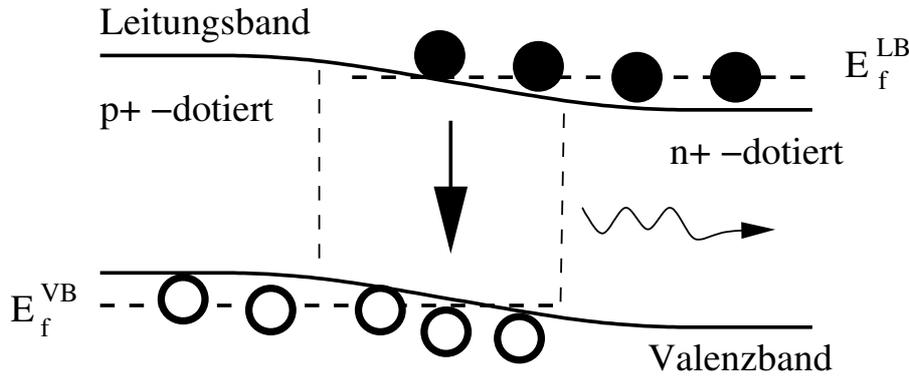


Abbildung 2.5: Elektron-Loch Rekombination am p-n Übergang

[GoAg]).

1. Es müssen Photonen in den Übergang einlaufen, die eine passende Energie haben, um eine stimulierte Emission auszulösen. Die Rate der Absorption $R_{\text{absorption}}$ dieser Photonen muss kleiner sein als die Rate der stimulierten Rekombination $R_{\text{stimuliert}}$.
2. Die Rate der stimulierten Rekombination $R_{\text{stimuliert}}$ muss die Rate der spontanen Rekombination R_{spontan} übertreffen.

Die Bedingung $R_{\text{stimuliert}} > R_{\text{absorbiert}}$ wird erreicht, wenn der Abstand der Quasi-Fermi-niveaus (s.o.) größer wird als die Bandlücke

$$E_f^{\text{LB}} - E_f^{\text{VB}} > E_g. \quad (2.3)$$

In diesem Fall liegt eine Besetzungsinversion vor. D.h., die Zahl ins Leitungsband angeregter Elektronen ist größer als die Zahl der Elektronen im Valenzband. Dieser Zustand muss durch ständige Entnahme von Elektronen aus dem Valenzband und Zufuhr ins Leitungsband (Pumpen) aufrecht erhalten werden.

Ein p+ - n+ Übergang, wie er in Abbildung 2.5 dargestellt ist, kann als Halbleiterlaser betrieben werden und wird durch Anlegen einer Spannung in Durchflußrichtung gepumpt. Durch einen modifizierten Übergang, wie in Abbildung 2.6 schematisch gezeigt, werden die Lasereigenschaften verbessert.

Die Bandlücke wird außerhalb einer Rekombinationsschicht durch Einbringen eines weiteren Fremdstoffs in das dotierte Halbleitermaterial (z.B. Aluminium in Gallium-Arsenid) vergrößert. Löcher im Valenzband und Elektronen im Leitungsband sammeln sich in der Rekombinationsschicht, wo die Inversionsbedingung erfüllt ist.

Die Rekombinationsschicht hat eine geringe räumliche Breite (kleiner als die Wellenlänge des emittierten Lichts). Die auslaufenden Photonen tragen eine Energie der Größe der Bandlücke. Diese reicht außerhalb der Rekombinationsschicht aufgrund der größeren Bandlücke nicht aus, Elektron-Loch Paare zu bilden. Daher werden die so erzeugten Photonen nicht reabsorbiert.

Um Laserbetrieb zu erreichen, muss zusätzlich zur Besetzungsinversion die Rate der stimulierten Emission die Rate der spontanen Emission übertreffen. Das Pumpen durch externe Energiezufuhr versetzt den Laser in einen stationären Ungleichgewichtszustand und das Verhältnis dieser konkurrierenden Prozesse ist nicht durch Gleichung (2.2) bestimmt.

Die Rate stimulierter Emission $R_{\text{stimuliert}}$ übertrifft die Rate spontaner Emission R_{spontan} , wenn ausreichend viele Photonen, die eine stimulierte Rekombination auslösen können,

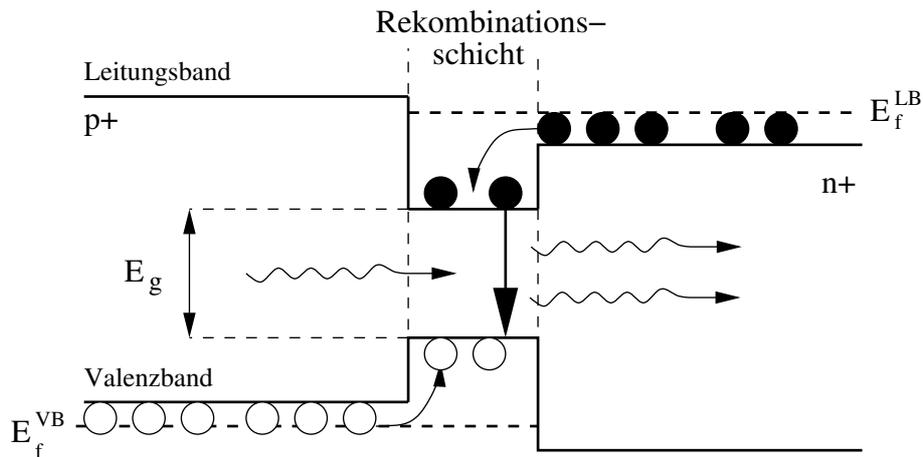


Abbildung 2.6: Bandstruktur eines Halbleiterlasers (schematisch)

in die Rekombinationsschicht einlaufen. Das kann durch die Bauform des Lasers erreicht werden und soll für den Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL) erläutert werden.

Der VCSEL

Abbildung 2.7 zeigt schematisch den Aufbau eines Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers (VCSEL). Die optische Datenübertragungsstrecke des ATLAS-Pixel-Detektors wird z.B. mit VCSEL betrieben.

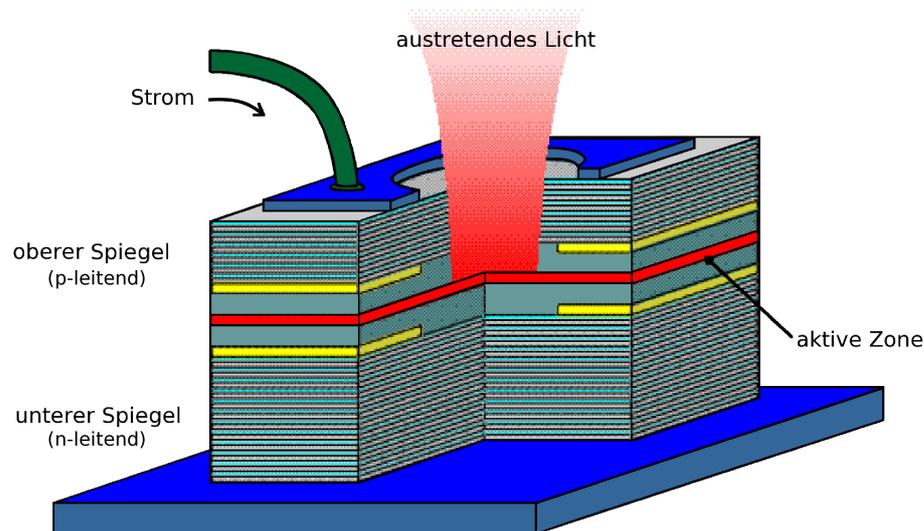


Abbildung 2.7: Aufbau eines VCSELs (schematisch nach [Nico00])

Bei einem VCSEL wird das Licht senkrecht zur Wafer¹-Ebene emittiert. Das macht es möglich, VCSEL in ein- oder zweidimensionalen Arrays anzuordnen und bereits auf dem Wafer zu testen.

Der VCSEL besteht aus einer aktiven Zone, in der sich mehrere (z.B. drei) der oben beschriebenen Rekombinationsschichten (vgl. Abb. 2.6) befinden. Zwei Distanzschichten zu

¹Wafer sind Scheiben aus Halbleitermaterialien, aus denen Chips hergestellt werden.

Spiegeln oberhalb und unterhalb der aktiven Zone sind so bemessen, dass in der gebildeten Kavität eine stehende Welle entsteht. Die Spiegel sind DBR-Spiegel (Distributed-Bragg-Reflector). Sie bestehen aus mehreren (etwa 50) Schichten, die jeweils eine Dicke von einem Viertel der Wellenlänge des Laser-Lichts und abwechselnd einen niedrigeren und höheren Brechungsindex haben. Der Spiegel unterhalb der aktiven Zone hat eine Reflektivität von fast 100%, der obere Spiegel lässt weniger als 2% der Photonen passieren.

Die Spiegel reflektieren die Photonen, die in der aktiven Zone erzeugt werden. Diese passieren die aktive Zone erneut und können weitere stimulierte Rekombinationen auslösen. Durch die hohe Reflektivität der beiden Spiegel wird die Photonendichte ausreichend erhöht, so dass die stimulierte Rekombination zum dominierenden Prozess in der aktiven Zone wird. Die durch den oberen Spiegel austretenden Photonen stehen für die optische Signalübertragung zur Verfügung.

Abbildung 2.8 zeigt die Strom-Leistung-Kennlinie eines Halbleiterlasers.

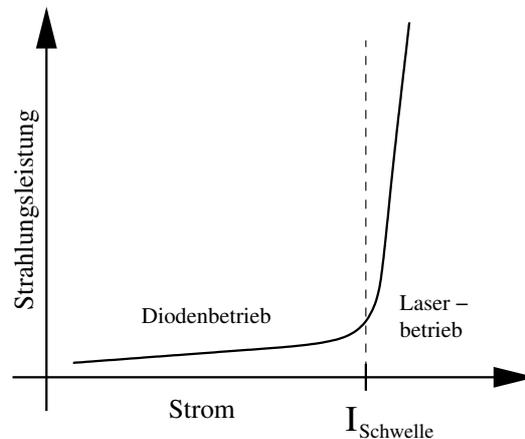


Abbildung 2.8: Strom-Leistung-Kennlinie eines Halbleiterlasers

Unterhalb eines Schwellenstroms verhält sich der Laser wie eine Halbleiterdiode. In diesem Bereich ist die Photonendichte in der Kavität zu gering, d.h. es überwiegt die spontane Rekombination und die Abstrahlcharakteristik ähnelt der einer Leuchtdiode. Wenn der Strom einen Schwellenstrom (typischerweise $I_{\text{Schwelle}} = 1 \text{ mA}$) überschreitet, setzt der Laserbetrieb ein. Dann steigt die emittierte optische Leistung etwa linear mit dem Strom durch den Laser.

Halbleiterlaser und VCSEL werden aus direkten Halbleitermaterialien (siehe z.B. [Kit]), wie z.B. Gallium-Arsenid hergestellt.

2.2.2 Halbleiterdioden als optische Empfänger

Ein optischer Empfänger wandelt optische in elektrische Signale um. Das geschieht durch die Absorption einfallender Photonen im Halbleitermaterial, wodurch Elektronen aus dem Valenzband ins Leitungsband angeregt werden. Das ist nur möglich, wenn die Energie der Photonen größer als die Bandlücke ist.

Falls die Absorption in der Verarmungszone eines p-n Übergangs stattfindet, werden die entstehenden Elektron-Loch Paare im dortigen elektrischen Feld getrennt. Wenn am p-n Übergang eine Spannung in Sperrichtung anliegt, löst ständige Absorption einen Fotostrom aus, dessen Stärke proportional zur Rate absorbierter Photonen ist.

Die dotierten Bereiche außerhalb der Verarmungszone sind elektrisch neutral und feldfrei. Werden viele Photonen, z.B. im p-dotierten Bereich außerhalb der Verarmungszone, absorbiert, können die angeregten Elektronen mit Löchern rekombinieren oder zur Verarmungszone diffundieren. Die Drift der Elektronen setzt erst dort ein, beschleunigt durch das elektrische Feld. Der Diffusionsvorgang ist im Vergleich zum Driftvorgang sehr langsam, was zur Erhöhung der Anstiegs- und Abfallzeiten des Photostroms führt.

PIN-Diode

In einer PIN-Diode wird zwischen den p- und n-dotierten Bereichen eine Schicht intrinsischen oder schwach dotierten Halbleitermaterials eingefügt.

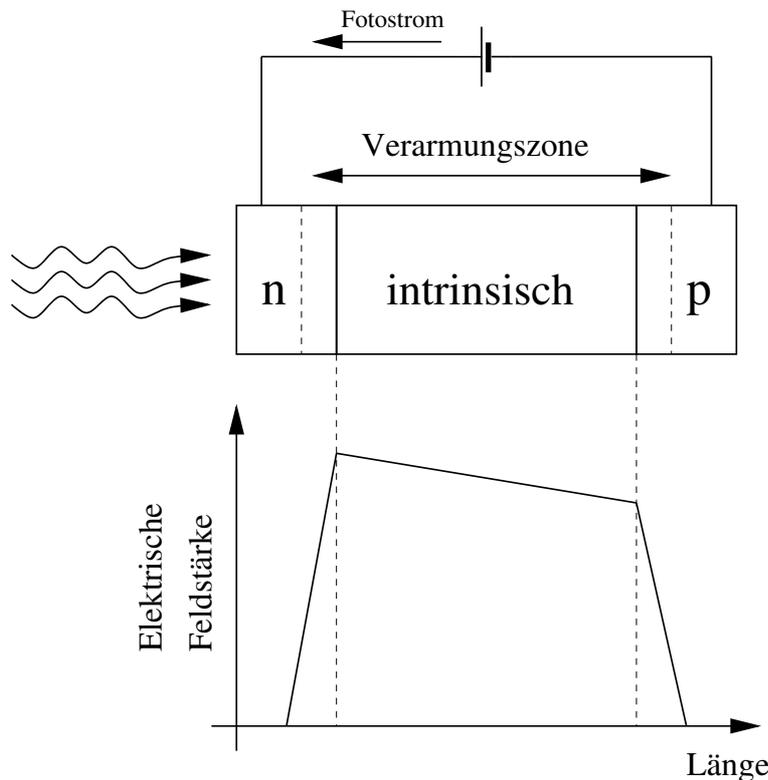


Abbildung 2.9: Dotierungsprofil einer PIN-Diode (schematisch nach [GoAg])

Abbildung 2.9 zeigt stark vereinfacht den Aufbau einer PIN-Diode und den Betrag der elektrischen Feldstärke in der Diode, wenn sie in Sperrrichtung betrieben wird. Der intrinsische Bereich hat die geringste Eigenleitfähigkeit der drei Schichten und somit den höchsten elektrischen Widerstand. Über diesen Bereich fällt ein Großteil der angelegten Spannung ab und es herrscht ein nahezu konstantes elektrisches Feld. Die Verarmungszone erstreckt sich über den gesamten intrinsischen Bereich und nimmt ein größeres Volumen als die dotierten Bereiche ein. Daher wird in ihr der Großteil der Photonen absorbiert. Die Absorption außerhalb der Verarmungszone kann weiter reduziert werden, indem die Bandlücke in diesen Bereichen vergrößert wird. Das kann analog zum Halbleiterlaser durch Zugabe zusätzlicher Materialien geschehen.

Die Breite des undotierten Bereichs bestimmt die Eigenschaften der Diode. Mit wachsender Breite steigt die totale Absorptionsrate für Photonen aber auch die Driftzeit. Typische Werte sind $20\ \mu\text{m}$ bis $50\ \mu\text{m}$ [GoAg].

2.3 Optische Fasern als Lichtleiter

Die Aufgabe einer optischen Faser (siehe z.B. [GoAg], [Mesch] oder [Jah]) ist es, optische Signale möglichst unverfälscht und verlustfrei zu übertragen. Die Dispersion in der Faser führt dazu, dass sich die Signalqualität verschlechtert. Man kann Modendispersion und chromatische Dispersion unterscheiden. Die Modendispersion ist eine Folge unterschiedlicher optischer Wege der verschiedenen Moden (s.u.) in der Faser. Sie kann durch Fasern spezieller Geometrie (Gradientenindex-Fasern) reduziert werden. Die chromatische Dispersion ist eine Folge unterschiedlicher Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Licht mit verschiedener Wellenlänge in der Faser. Sie kann durch die Verwendung der schmalbandigen Halbleiterlaser als Lichtquellen klein gehalten werden.

Optische Fasern werden meist aus Quarzglas (SiO_2) hergestellt. Unterschiedliche Brechungsindizes in der Faser können durch Dotierung mit Fremdatomen erzeugt werden. Im Folgenden sollen zwei Fasertypen, die Stufenindex- und die Gradientenindex-Faser näher betrachtet werden. Diese beiden Typen werden in der optischen Datenübertragungsstrecke des ATLAS-Pixel-Detektors verwendet (siehe Kapitel 3.4).

2.3.1 Stufenindex-Fasern

Optische Fasern einfachster Geometrie sind Stufenindex-Fasern. Ihr Brechungsindexprofil, d.h. der Wert des Brechungsindex des Fasermaterials im radialen Abstand R zur Faserachse, ist gegeben durch

$$n(R) = \begin{cases} n_1 > n_2 & \text{für } R \leq R_i \\ n_2 & \text{für } R_i < R \leq R_a. \end{cases} \quad (2.4)$$

Dabei ist R_i der Radius des Faserkerns und R_a der Radius des Mantels der Faser.

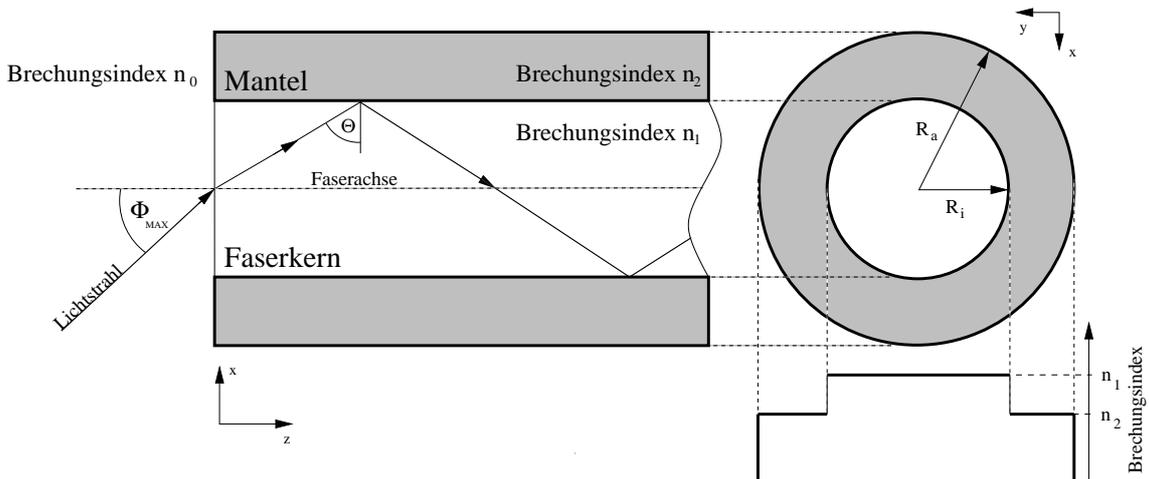


Abbildung 2.10: Profil einer Stufenindex-Faser

Abbildung 2.10 zeigt das Profil einer Stufenindex-Faser. Typische Werte für den Durchmesser des Faserkerns sind $R_i = 8 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}$ oder $85 \mu\text{m}$ und für den Durchmesser des Fasermantels $R_a = 125 \mu\text{m}$. Typische Werte für die Brechungsindizes sind $n_1 = 1,463$ und $n_2 = 1,458$ [Jah].

Strahlenoptische Beschreibung der Lichtausbreitung in der Faser

Die Lichtausbreitung in der Faser wird strahlenoptisch durch innere Totalreflexion an der Übergangsschicht vom Faserkern zum Mantel erklärt. Ein Lichtstrahl wird in der Faser geführt, wenn die Bedingung für die Totalreflexion

$$\sin \Theta \leq \frac{n_2}{n_1}.$$

erfüllt ist (Bezeichnungen gemäss Abb. 2.10).

Ein vom Vakuum ($n_0 = 1$) einfallender Lichtstrahl läuft in der Faser fort, falls der Winkel zur Faserachse nicht zu groß wird. Der maximale Winkel Φ_{\max} wird durch den Brechungsindex des Faserkerns bestimmt

$$NA = \sin \Phi_{\max} \leq n_1 \cos \Theta_{\max} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}.$$

Die Numerische Apertur der Faser NA ist ein Maß für die Fähigkeit der Faser, Licht aus verschiedenen Richtungen aufzunehmen. Für $n_1 \approx n_2$, was für Stufenindex-Fasern erfüllt ist, gilt $NA \approx \sqrt{n_1 \cdot (n_1 - n_2)}$.

Wellenoptische Beschreibung der Lichtausbreitung in der Faser

Die wellenoptische Beschreibung der Lichtausbreitung in einer Stufenindex-Faser ist durch die Wellengleichung (siehe z.B. [VoPe])

$$\Delta \vec{E} + n(\omega, \vec{r})^2 \cdot k_0^2 \vec{E} = 0 \quad (2.5)$$

bestimmt.

Die diskreten Lösungen für das elektrische Feld \vec{E} erfüllen Randbedingungen² am Übergang vom Faserkern zum Fasermantel und werden optische Moden genannt. Die Anzahl von der Faser geführter Moden hängt von ihrer Geometrie ab, d.h. vom Radius des Faserkerns und von den Brechungsindizes von Faserkern und Mantel.

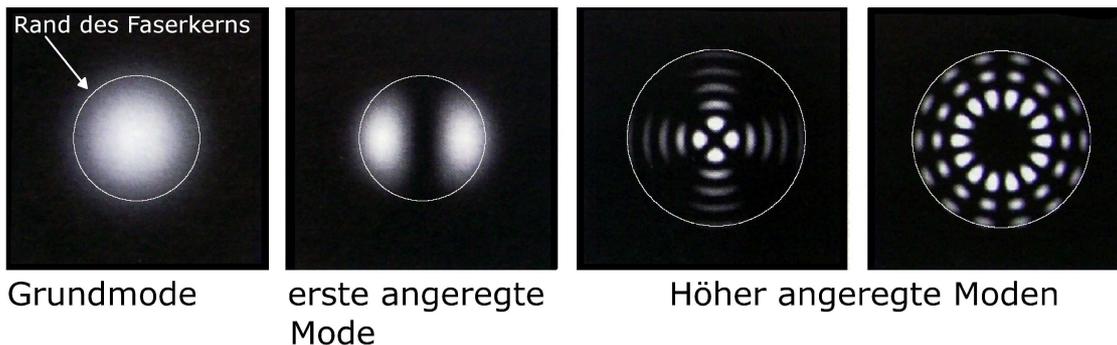


Abbildung 2.11: Intensitätsverteilungen optischer Moden der Stufenindex-Faser (nach [VoPe])

Abbildung 2.11 zeigt die Intensitätsverteilung des Lichts für verschiedene Moden einer Stufenindex-Faser. Der Rand des Faserkerns ist zusätzlich eingezeichnet. Monomode-Fasern

²Die Randbedingungen sind die Stetigkeit der Radial- und Tangentialkomponente des elektrischen und magnetischen Felds.

führen nur die Grundmode. In diesen Fasern tritt keine Modendispersion (s.u.) auf. Der Faserkern dieses Typs hat einen Durchmesser von unter $10 \mu\text{m}$. Fasern mit größerem Durchmesser führen mindestens zwei Moden.

Modendispersion

In einem vereinfachten Bild kann jede wellenoptisch beschriebene Mode mit einem Lichtstrahl, der unter ständiger Reflexion mit dem festen Winkel Θ am Übergang von Faserkern zum Mantel geführt wird, identifiziert werden.

Ein parallel zur Faserachse (vgl. Abb. 2.10) geführter Lichtstrahl legt die Strecke L in der Zeit $t_1 = \frac{L}{c}$ zurück, wobei c die Lichtgeschwindigkeit im Faserkern ist. Ein Lichtstrahl, der durch Reflexion mit maximalem Reflexionswinkel Θ_{\max} geführt wird, legt die Strecke L in der Zeit $t_2 = \frac{L \cos \Theta_{\max}}{c}$ zurück. Führt eine Faser viele optische Moden (bzw. Lichtstrahlen), so tritt eine Laufzeitdifferenz $\Delta t = t_1 - t_2$ auf, durch die die Signalfanken abgeflacht werden. Diese Modendispersion kann durch Verwendung von Monomode-Fasern verhindert, oder durch ein modifiziertes Brechungsindexprofil, wie in Gradientenindex-Fasern, verringert werden. Die Übertragungskapazität einer Faser ist durch die Modendispersion begrenzt, da bei hohen Übertragungsfrequenzen die Laufzeitdifferenz Δt die gleiche Größenordnung wie die Taktdauer haben kann.

2.3.2 Gradientenindex-Fasern

Gradientenindex-Fasern haben ein gegenüber den Stufenindex-Fasern modifiziertes Brechungsindexprofil:

$$n(R) = \begin{cases} n_1 \left[1 - \Delta \left(\frac{R}{R_a} \right)^\alpha \right] & \text{für } R \leq R_i \\ n_1(1 - \Delta) = n_2 & \text{für } R_i < R \leq R_a. \end{cases} \quad (2.6)$$

Dabei ist $\Delta = n_1 - n_2$, wobei n_1 der Brechungsindex im Zentrum und n_2 der Brechungsindex im Mantel der Faser ist (vgl. Abb. 2.12).

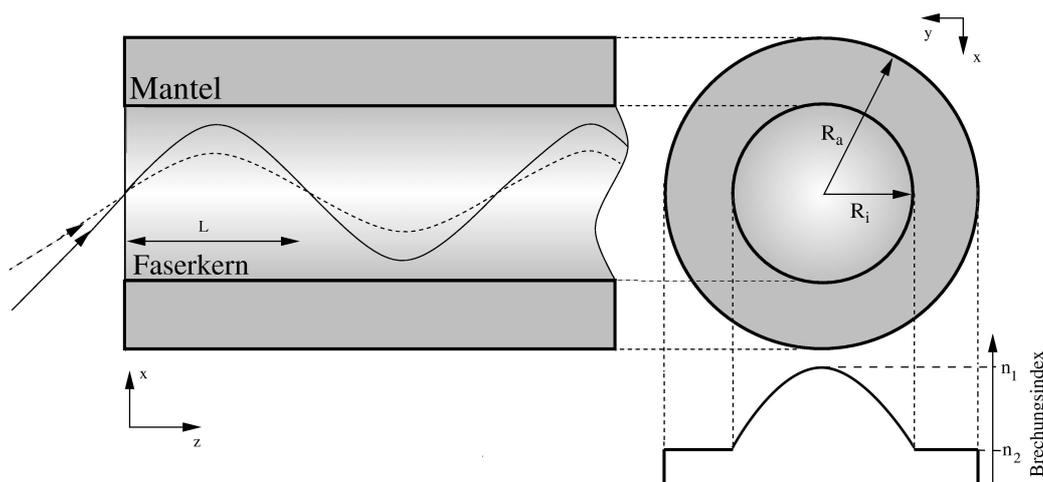


Abbildung 2.12: Profil einer Gradientenindex-Faser

Der Exponent in Gleichung (2.6) bestimmt das Brechungsindexprofil der Gradientenindex-Faser. Der Grenzfall $\alpha \rightarrow \infty$ entspricht dem Profil einer Stufenindex-Faser.

Am Eingang gleichzeitig in die Gradientenindex-Faser einlaufende Lichtstrahlen nehmen im der Faserkern verschiedene Wege (vgl. Abb. 2.12). Zur Reduktion der Laufzeitdifferenzen zwischen den Lichtstrahlen wird $\alpha = 2$ gewählt. Bei diesem Brechungsindexprofil treffen sich alle Lichtstrahlen trotz unterschiedlicher Wege periodisch in Abständen L in der Faser. Diese Eigenschaft reduziert die Modendispersion bei der Übertragung optischer Signale über große Entfernungen.

2.4 Gründe für und gegen die optische Datenübertragung

Die optische Übertragung der von den Pixel-Modulen (siehe Kapitel 1.2.3) ausgelesenen Daten hat gegenüber einer möglichen elektrischen entscheidende Vorteile. Die wesentlichen sind die folgenden (siehe z.B. [Ring]).

- Optische Signale werden durch Magnetfelder im Detektor sowie von Ladungen durchgehender Strahlung in geringerem Maße beeinflusst als elektrische.
- Übersprechen, das bedeutet die Beeinflussung der Signale eines Nachbarkanals, ist bei optischen Signalen, die in optischen Fasern laufen, sehr gering. Optische Fasern können über lange Distanzen dichter beieinander geführt werden als elektrische Leitungen, ohne das Übersprechen auftritt.
- Die Abschwächung der Signale von etwa $2 \frac{\text{dB}}{\text{km}}$ ist gegenüber den ohmschen Verlusten elektrischer Leitungen gering. Es wird zusätzlich keine Wärme erzeugt.
- Über die nichtleitenden optischen Fasern fließen keine unerwünschten Ströme. Eine Potentialdifferenz des Kontrollraums gegenüber dem Detektor beeinflusst die Signalübertragung nicht.

Die optische Datenübertragung hat gegenüber der elektrischen auch Nachteile.

- Optische Fasern sind schwerer zu handhaben als elektrische Leitungen. Beschädigungen treten bei zu kleinen Biegeradien auf, wodurch Brüche in den Leitungen entstehen, die die durchlaufenden Signale schwächen.
- Die Ein- und Auskopplung der Signale zur optischen Faser ist verlustreich, besonders, wenn die Faserenden nicht korrekt auf den Halbleiterlasern bzw. den Dioden positioniert sind.

Die Übertragung von Signalen aus dem Detektor mit geringer Fehlerrate ist wegen der Beeinflussung elektrischer Signale durch die Umgebung nur optisch möglich. Die optische Sendeeinheit im Detektor besitzt auch unter Bestrahlung eine ausreichende Leistung zur Übertragung der Messdaten.

3 Die optische Datenübertragungsstrecke des ATLAS-Pixel-Detektors

Die optische Datenübertragungsstrecke des ATLAS-Pixel-Detektors (A Torodial LHC Aparatus) umfasst beide Richtungen der Datenübertragung. In der einen Richtung werden Steuersignale und das Taktsignal für die Pixel-Module vom Kontrollraum in den Detektor übertragen, in der anderen von den Pixel-Modulen genommene Daten aus dem Detektor ausgelesen.

Im Folgenden werden die Bestandteile der detektorseitigen Sende- und Empfangseinheiten erläutert [APOE]. Ihre Lage im Detektor wird anschließend verdeutlicht.

3.1 Komponenten der Datenübertragungsstrecke

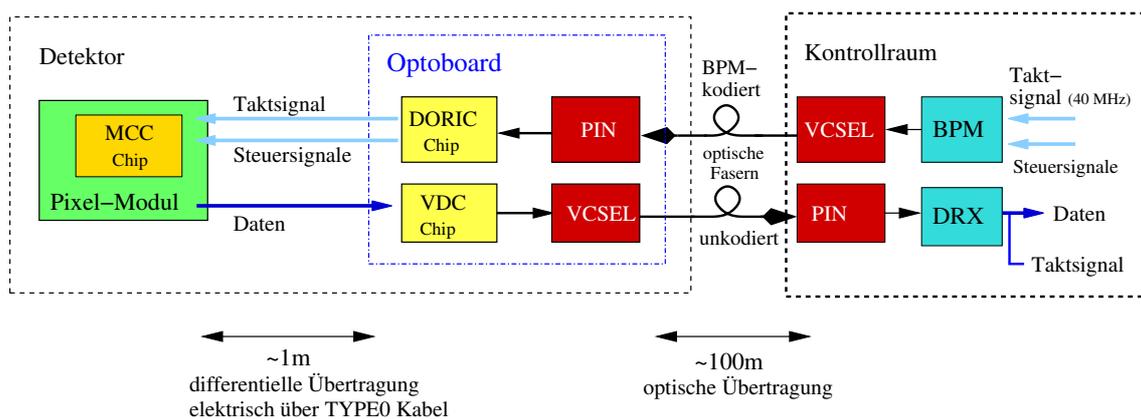


Abbildung 3.1: Komponenten der optischen Datenübertragungsstrecke des ATLAS-Pixel-Detektors

Abbildung 3.1 zeigt die Komponenten der Datenübertragungsstrecke. Im Kontrollraum werden Steuersignale mit dem entsprechenden 40 MHz-Taktsignal für die Pixel-Module im Biphase-Mark-Kodierungsschema (BPM) kodiert (s.u.). Halbleiterlaser (VCSEL) übertragen diese kodierten Signale über etwa 100 m lange optische Fasern in den Detektor. Dort enden die Fasern auf Silizium PIN-Dioden, die die optischen Signale in Stromsignale umwandeln und den Digital-Opto-Receiver-Integrated-Circuit (DORIC) Chips zuführen. Die interne Logik der DORICs rekonstruiert aus den BPM-kodierten Eingangssignalen die Steuersignale und das Taktsignal für die Pixel-Module im Detektor.

Die von den Modulen ausgelesenen Daten werden von VCSEL-Driver-Chips (VDC) in geeignete Stromsignale konvertiert, um Gallium-Arsenid-VCSEL zu betreiben. Deren Signale werden ebenso über optische Fasern, jedoch unkodiert, zur Auslese an PIN-Dioden in den Kontrollraum übertragen. Die Empfangseinheit DRX stellt einen Verstärker dar, der Schwankungen der optischen Eingangsleistung ausgleicht und die Daten ausgibt. Diese können dann mit dem Taktsignal interpretiert werden.

Die detektorseitigen Sende- und Empfangskomponenten befinden sich auf einer keramischen Platine. Diese Platine mit den Empfangs- und Sendeeinheiten wird als Opto-board bezeichnet. Die Signalübertragung zwischen den Modul-Control-Chips (MCC) der Pixel-Module und den Optoboards erfolgt in differentieller Form nach dem Low-Voltage-Differential-Signal (LVDS) Schema (s.u.). Diese Signale werden über etwa 1 m lange so genannte TYPE0-Kabel übertragen (siehe Kapitel 3.4).

Differentielle Signalübertragung im LVDS Schema

Während des Betriebs von ATLAS wird der gesamte Bereich des Pixel-Detektors hoher Strahlung ausgesetzt sein. Zur Sicherstellung der fehlerfreien elektrischen Signalübertragung zwischen den Optoboards und den Pixel-Modulen erfolgt diese differentiell im LVDS-Schema. Das LVDS-Schema ist ein Standard zur Übertragung elektrischer Signale durch differentielle Kleinsignale mit einer Amplitude von einigen hundert Millivolt [LVDS]. Die Umwandlung unipolarer Signale in differentielle Signale geschieht im LVDS-Treiber, vereinfacht in Abbildung 3.2 dargestellt.

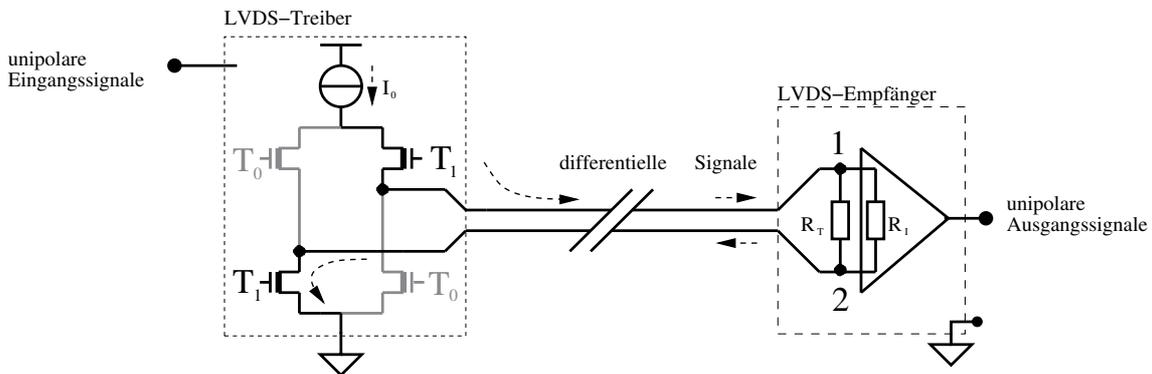


Abbildung 3.2: Vereinfachter Schaltplan einer LVDS-Datenübertragungsstrecke

Eine Stromquelle im LVDS-Treiber liefert einen konstanten Strom I_0 . Die umzuwandelnden unipolaren Eingangssignale steuern vier Transistoren. Abhängig von ihrem logischen Zustand fließt der Strom I_0 (in Abb. 3.2) entweder durch die Transistoren T_1 (bei Logisch 1 am Eingang) oder durch T_0 (bei Logisch 0 am Eingang). Der Strom I_0 läuft dann in wechselnder Richtung über eine Schleife, die mit R_T abgeschlossen ist, durch den LVDS-Empfänger. Ein Signalverstärker mit hohem Eingangswiderstand ($R_T \ll R_L$) im LVDS-Empfänger gibt den Spannungsabfall über R_T wieder als unipolares Signal aus. Für den Abschlußwiderstand sind $R_T = 100 \Omega$ gebräuchlich.

Abbildung 3.3 zeigt die Spannungsverhältnisse einer LVDS-Signalförmung, insbesondere den Potentialverlauf (LVDS pos. und LVDS neg.) an den Punkten 1 und 2 in Abbildung 3.2. Beide Signalpolaritäten (LVDS pos bzw. LVDS neg.) werden vom LVDS-Treiber auf einem zeitlichen Mittelwert von 1 V bis 1.4 V gehalten. Die Signalamplitude U_{amp} hängt vom Abschlußwiderstand R_T ab und beträgt etwa 400 mV. Durch die geringe Signalamplitude und kleine Übertragungsströme kann die elektrische Leistung reduziert werden. Wie das Beispielsignal (Abb. 3.3) zeigt, werden Signalstörungen, die beide Signalpolaritäten gleichermaßen verändern, durch die Differenzbildung im LVDS-Empfänger beseitigt. Dafür ist es notwendig, beide Signalleitungen mit möglichst geringem Abstand oder umeinander verdreht auszuführen, wie es in den TYPE0-Kabeln gegeben ist.

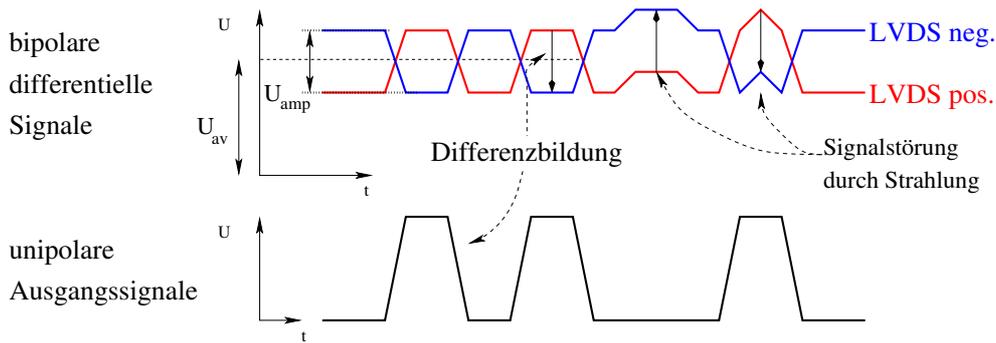


Abbildung 3.3: Bipolare differentielle Signalübertragung im LVDS-Schema

BPM Kodierung

Die BPM-kodierte Signalübertragung in den Detektor ermöglicht die Übertragung eines Steuersignals mit entsprechendem Taktsignal in einem Kanal. Dadurch kann die Anzahl benötigter optischer Fasern reduziert und sichergestellt werden, dass die vom DORIC rekonstruierten Steuersignale in passender Phase zum rekonstruierten Takt sind. Abbildung 3.4 zeigt als Beispiel ein Datensignal, das mit einem entsprechenden Taktsignal zu einem Signal BPM-kodiert wird.

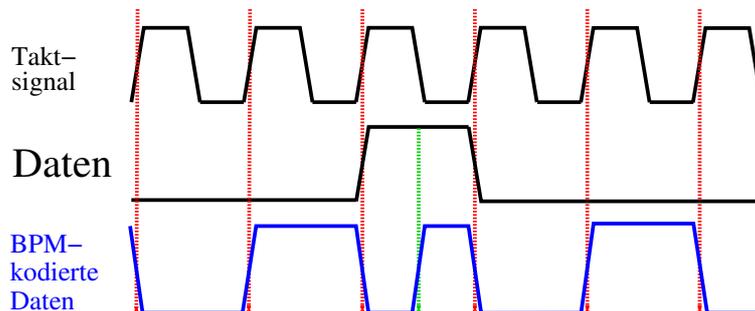


Abbildung 3.4: BPM-Kodierung

Das kodierte Signal ändert seinen logischen Zustand bei jeder steigenden Flanke des Taktsignals. Sind die zu kodierenden Daten Logisch 0 resultiert das in einem kodierten Signal der halben Taktfrequenz. Im Falle Logisch 1 ändert das kodierte Signal zusätzlich bei fallender Flanke des Taktsignals seinen Zustand. Das kodierte Signal hat dann die gleiche Frequenz wie das Taktsignal. BPM-kodierten Signale haben natürlicherweise einen Duty-Cycle¹ von 50 %.

3.1.1 DORIC-Design

Die DORICs (Digital-Opto-Receiver-Integrated-Circuit) bilden zusammen mit den PIN-Dioden die detektorseitigen Empfangseinheiten der optischen Datenübertragungsstrecke. Ein DORIC-Kanal hat die Aufgabe, aus den BPM-kodierten (s.o.) Stromsignalen von der PIN-Diode an seinem Eingang das Taktsignal und Steuersignale zu rekonstruieren und

¹Der Duty-Cycle bezeichnet das zeitliche Verhältnis von Logisch 1 zu Logisch 0 eines Signals

im LVDS-Schema auszugeben (s.u.). Ein DORIC-Chip hat vier Kanäle [Kräm02]². Da er im ATLAS-Detektor hoher Strahlung ausgesetzt sein wird wurde er in strahlenhartem Deep-Submicron-Prozess (0.25 μ m CERN Prozess) realisiert. Abbildung 3.5 zeigt das Blockschaltbild eines DORIC-Kanals mit angeschlossener PIN-Diode.

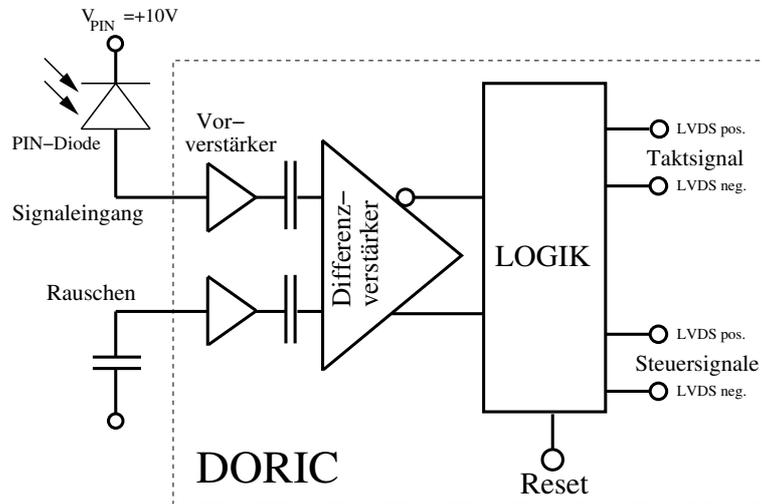


Abbildung 3.5: Blockschaltbild eines DORIC-Kanals (nach [APOE])

Die von einer PIN-Diode empfangenen kodierte Daten laufen als unipolare Stromsignale mit einer Amplitude von 50 μ A bis 1000 μ A in den Eingang des DORIC-Kanals (Signaleingang in Abb. 3.5). Diese Strecke beträgt auf dem Optoboard weniger als 1 cm. Das Eingangssignal gelangt durch einen Vorverstärker und eine Einkoppelkapazität in einen Differenzverstärker. Der Vorverstärker reagiert empfindlich auf Rauschen in der Versorgungsspannung (siehe Anhang B.1), deshalb nimmt der Differenzverstärker über einen zweiten äquivalenten Eingang, ebenfalls mit Vorverstärker, Rauschen auf und subtrahiert dieses vom Eingangssignal.

Die korrekte Dekodierung der BPM-kodierte Eingangssignale durch die Logik des DORICs (s.u.) ist gefährdet, wenn ihr Duty-Cycle eine große Abweichung von 50 % hat. Der Differenzverstärker interpretiert die logischen Zustände der Eingangssignale unabhängig von deren Intensität und setzt dabei seine internen Vergleichsschwellen derart, dass der Duty-Cycle der BPM-kodierte Eingangssignale erhalten bleibt. Die Ausgangssignale des Differenzverstärkers werden der Dekodierlogik des DORICs zugeführt. Diese rekonstruiert das Taktsignal und die Steuersignale und gibt beide im LVDS-Schema aus. Die LVDS-Ausgangssignale des DORIC laufen auf Pins einer 80-poligen Buchse auf der Unterseite des Optoboards (s.u.).

Funktionsweise der Dekodierlogik des DORICs

Die Funktionsweise der Dekodierlogik des DORICs soll mit Hilfe des Blockschaltbilds der Logik (Abb. 3.6) und einem Beispielsignal (Abb. 3.7) erläutert werden. (Im Folgenden beziehen sich die Bezeichnungen in Klammern auf Bauteile in Abb. 3.6, oder auf Signale, die in Abb. 3.7 dargestellt sind. Die Dekodierlogik arbeitet intern mit differentiellen Signalen,

²DORIC und VDC wurden von der Universität Siegen in Zusammenarbeit mit der Ohio State University entwickelt

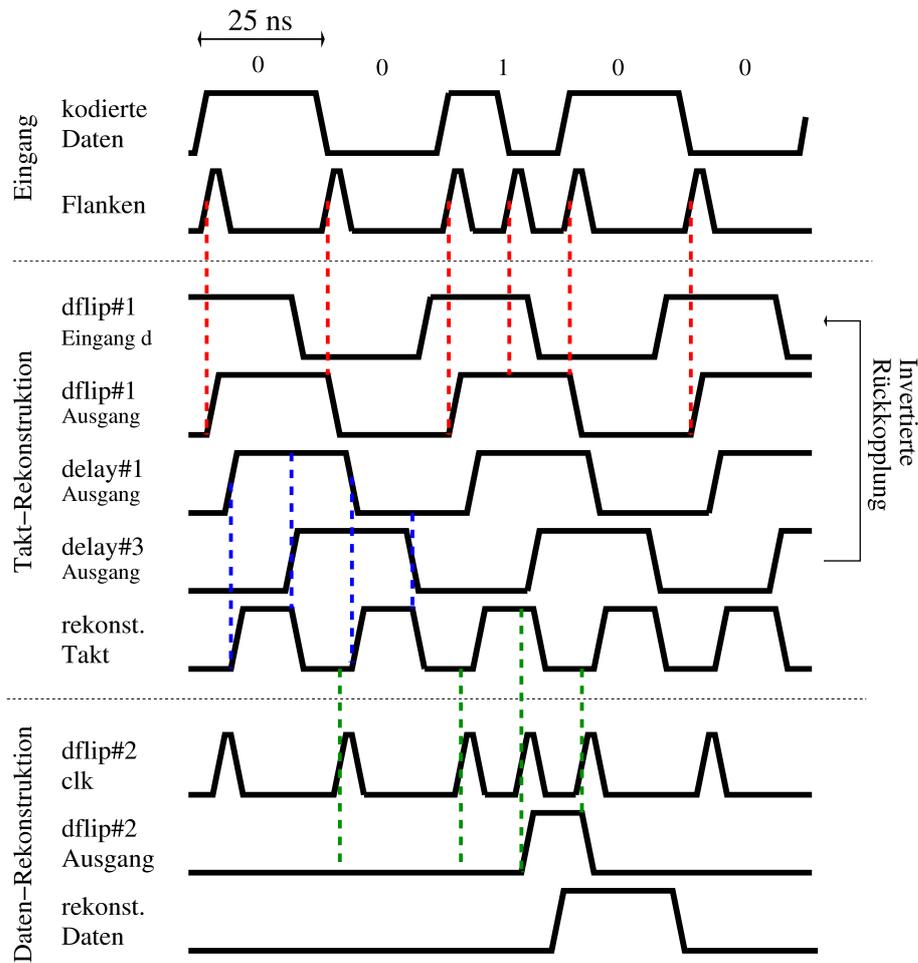


Abbildung 3.7: Prinzip der Dekodierung des BPM-Signals

Wenn Steuersignale gesendet werden, dann enthält die vom Flankendetektor (edge-det) ausgegebene Pulsfolge zusätzliche Pulse. Hat der DORIC bereits begonnen (etwa 1 ms lang) das Taktsignal zu rekonstruieren und ist die Verzögerungszeit justiert, beeinflussen die zusätzlichen Pulse die Rekonstruktion des Taktsignals nicht (siehe Abb. 3.7, dfflip#1 Ausgang).

Die Rekonstruktion der Steuersignale erfolgt durch ein Verzögerungsgatter (edge-delay) und zwei weitere D-Flip-Flops (dfflip#2-3). Die Pulsfolge wird durch das Verzögerungsgatter (edge-delay) angepasst, damit mit Hilfe des rekonstruierten Taktsignals am Eingang (Eingang d) des zweiten D-Flip-Flops (dfflip#2) die Steuersignale extrahiert werden können (siehe Abb. 3.7, dfflip#2 Ausgang). Diese werden mit dem dritten D-Flip-Flop (dfflip#3) zum rekonstruierten Taktsignal synchronisiert.

Der LVDS-Treiber (LVDS-Treiber) gibt die rekonstruierten Steuersignale und das rekonstruierte Taktsignal aus.

3.1.2 VDC-Design

Die VDCs (VCSEL-Driver-Chip) und die die daran angeschlossenen VCSEL bilden die detektorseitige Sendeeinheit der optischen Datenübertragungsstrecke. Ein VDC hat wie ein DORIC vier Kanäle und wurde ebenfalls im strahlenharten Deep-Submicron-Prozess

(0.25 μm CERN Prozess) entwickelt.

Abbildung 3.8 zeigt das Blockschaltbild eines VDC-Kanals mit angeschlossenem VCSEL. Mit einem LVDS-Empfänger empfängt der VDC vom MCC (Modul-Control-Chip, siehe Kapitel 1.2.3) des Pixel-Moduls ausgegebene LVDS-Signale. Diese gibt ein VCSEL-Treiber als unipolare Stromsignale aus, mit denen ein VCSEL betrieben wird.

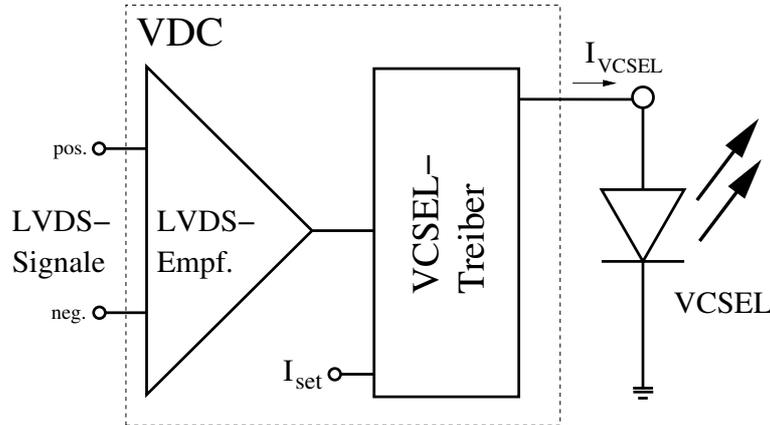


Abbildung 3.8: Blockschaltbild eines VDC-Kanals (nach [APOE])

Der Ausgangsstrom des VCSEL-Treibers I_{VCSEL} beträgt 1 mA bis maximal 20 mA (Amplitude) und wird durch die Größe des Stromes I_{set} linear eingestellt ($I_{\text{VCSEL}} \approx 14 \cdot I_{\text{set}}$). Beim Annealing, das heißt dem Ausheilen von Strahlenschäden, wird der VCSEL mit einem höheren Strom betrieben, als im Normalbetrieb (siehe z.B. [AR05]). Zur Minimierung der Schaltzeiten fließt durch den VCSEL stets ein Dunkelstrom von etwa 1 mA; der Schwellenstrom zum Laser-Betrieb beträgt 1.5 mA bis maximal 3 mA [VCSEL]. Der VDC ist ausgelegt, unabhängig von den Ausgangssignalen I_{VCSEL} einen konstanten Stromdurchfluß zu haben. Dadurch wird das Rauschen auf dem Optoboard bei Schaltvorgängen des VDCs minimiert. Ein VDC hat ebenso wie ein DORIC-Chip vier Kanäle.

Das Licht der Gallium-Arsenid VCSEL³ hat Wellenlängen im infraroten Bereich zwischen 830 nm bis 860 nm, nominal 850 nm.

3.2 Design der Optoboards

Ein Optoboard (s.o.) hat Dimensionen von etwa 2 cm \times 6 cm \times 0.1 cm (Abb. 3.9 und 3.10). Als keramisches Trägermaterial wird wegen der sehr guten Wärmeleitungseigenschaften Berylliumoxid gewählt. Ein Optoboard hat im Betrieb eine Leistungsaufnahme von etwa 1 W und wird im Detektor auf einer Temperatur von etwa 10 °C gehalten [MiZio].

Auf der Oberseite der Optoboards befinden sich die zur Sendeeinheit gehörenden Elemente, die VDC-Chips und die VCSEL.

Jedes Optoboard besitzt zwei VDC-Chips mit jeweils vier Kanälen. Die VCSEL befinden sich in einem Array mit acht Kanälen (siehe Abb. 4.4). Die Optoboards, die für den Betrieb der Pixel-Module der B-Lage des Pixel-Detektors (siehe Kapitel 1.2.1) vorgesehen sind, besitzen die doppelte Anzahl Sendekanäle und werden daher mit vier VDC-Chips und zwei VCSEL-Arrays bestückt. Von den acht Kanälen eines VCSEL-Arrays werden nur

³Die VCSEL auf den Optoboards werden von TrueLight™ hergestellt [VCSEL].

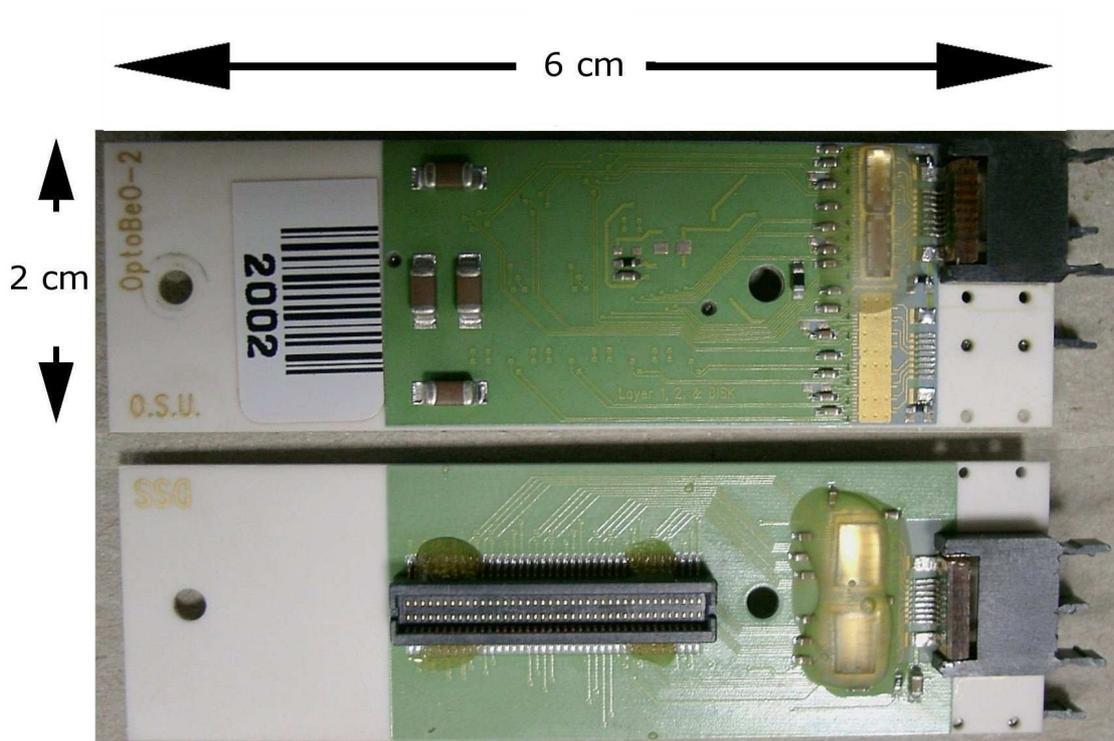


Abbildung 3.9: Foto des Optoboards BeO2002

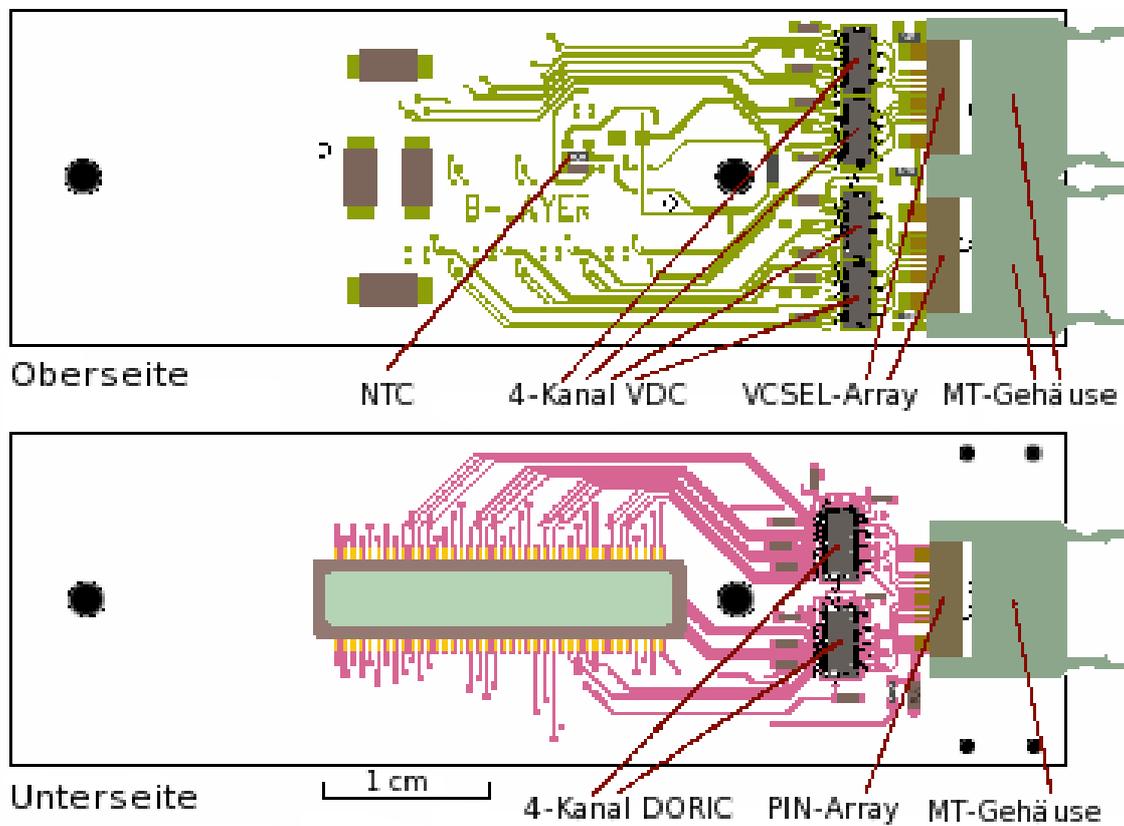


Abbildung 3.10: OptoBoard Design des B-Lagen-Typs (nach [APOE])

sieben verwendet, da ein Optoboard die Daten von maximal sieben Modulen überträgt (vgl. Kapitel 3.4).

Zusätzlich befindet sich auf der Oberseite ein temperaturabhängiger Widerstand⁴ (NTC), der es erlaubt, die Temperatur des jeweiligen Optoboards während des Betriebs zu messen. Die Spezifikationen des NTCs finden sich in Anhang B.2.

Auf der Unterseite der Optoboards befinden sich die zur Empfangseinheit gehörenden Elemente, die DORIC-Chips und die PIN-Dioden. Die PIN-Dioden sind ebenfalls in einem Array mit acht Kanälen zusammengefasst, welches von zwei DORICs mit je vier Kanälen ausgelesen wird. Analog zur Sendeinheit werden auch von der Empfangseinheit nur sieben der acht verfügbaren Kanäle verwendet. Der LVDS-Datentransfer und die Versorgungsspannungen und -ströme für den Betrieb laufen über eine 80-polige Buchse auf der Unterseite. Die Belegung dieser Buchse wird in Anhang B.1 erläutert.

Es gibt drei Bauformen der Optoboards, die mit verschiedenen Seriennummern versehen werden. Optoboards mit einer Seriennummer zwischen 2000 und 3999 besitzen ein VCSEL-Array mit jeweils acht Kanälen, das von zwei VDCs betrieben wird. Dieses befindet sich bei einem Optoboard mit einer Seriennummer zwischen 2000 und 2999 links auf der Oberseite der Platine, wie auf dem Foto in der Abbildung 3.9 zu sehen ist.

Im Fall eines Optoboards mit einer Seriennummer zwischen 3000 und 3999 befinden sich die VDCs und das VCSEL-Array auf der rechten Seite. Aus geometrischen Gründen für den Einbau der Optoboards auf das Patch-Panel-0 (siehe Kapitel 3.4) existieren diese beiden Typen.

Die für den Betrieb Pixel-Module der B-Lage vorgesehenen Optoboards erhalten eine Seriennummer zwischen 1000 und 1999. Diese tragen, wie in Abbildung 3.10 verdeutlicht, links und rechts auf der Oberseite der Platine jeweils ein VCSEL-Array.

3.3 Qualitätsanforderungen an die Optoboards

Die Fertigung der Optoboards umfasst die Montage der VDCs und DORIC-Chips sowie der VCSEL- und PIN-Dioden-Arrays [AsPro] auf den Berylliumoxid-Platinen. Die Platinen werden vom Hersteller vorgefertigt, d.h. mit den elektrisch passiven Elementen bestückt. Jedes fertig gestellte Optoboard durchläuft festgelegte optische und elektronische Tests [TestPro] [QA]. Die Erfüllung dieser Qualitätsanforderungen qualifiziert sie für den Einbau in den Detektor.

Qualitätsanforderungen an die Sendeeinheit

Die Qualitätsanforderungen an die Sendeeinheit umfassen die Signalqualität und die optische Ausgangsleistung jedes VCSEL-Kanals und sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst. Die Messung wird an einem 40 MHz-Taktsignal als Ausgangssignal der VCSEL bei festem $I_{\text{set}} = 0.55 \text{ mA}$ pro VDC vorgenommen. Damit durch jeden VDC eines Optoboards mit zwei VDCs $0.55 \mu\text{A}$ fließen, müssen zur Messung $1.1 \mu\text{A}$ angelegt werden, da die VDCs auf dem Optoboard parallel geschaltet sind. Im Fall eines Optoboards des B-Lagen-Typs müssen $2.2 \mu\text{A}$ für die vier VDCs angelegt werden.

Die Messungen der Anstiegs und Abfallzeiten werden von 20 % bis 80 % der Signalamplitude vorgenommen.

⁴SEMITEC™103KT1608

Messparameter	Ausgangssignal	I_{set} pro VDC	Anforderung
Optische Leistung	40 MHz Taktsignal	0.55 mA	$\geq 500 \mu\text{W}$
Anstiegs- und Abfallzeit (20 – 80 %)	40 MHz Taktsignal	0.55 mA	$\leq 1 \text{ ns}$

Tabelle 3.1: Qualitätsanforderungen an die Sendeeinheit eines Optoboards

Qualitätsanforderungen an die Empfangseinheit

Die LVDS-Signale, die der LVDS-Treiber der Logik eines DORIC-Kanals ausgibt (vgl. Kapitel 3.1.1), werden auf vier PINs der 80-poligen Buchse auf der Unterseite eines Optoboards (siehe Abb. B.2) gelegt. Diese vier Pins führen jeweils das positive und das negative LVDS-Signal des Taktsignals (LVDS pos. CLK, LVDS neg. CLK) sowie der Steuersignale (LVDS pos. CMD, LVDS neg. CMD).

Die Qualitätsanforderungen des Empfangsteils betreffen die, aus der Dekodierung optischer Eingangssignale gewonnenen, LVDS-Signale. Als Eingangssignale werden zufällige Bitfolgen (Pseudo Random Bit Stream, PRBS) gesendet. Alle Kanäle des DORICs müssen die Anforderungen erfüllen. Die Überprüfung wird bei verschiedenen Leistungen der Eingangssignale vorgenommen. Die Stärke des Stroms I_{PIN} , der in der PIN-Diode erzeugt wird, ist ein Maß für die Eingangsleistung. Die Umrechnungsfaktoren von PIN-Strom zu optischer Leistung sind in Gleichung 4.2 angegeben.

Zu untersuchen sind neben beiden Polaritäten der LVDS-Ausgangssignale des Takts und der Steuersignale auch das unipolare Taktsignal (rek. CLK) und die unipolaren Steuersignale (rek. CMD), die durch einen LVDS-Empfänger aus den zusammen gehörenden LVDS-Signalaritäten rekonstruiert werden. Zur Messung dieser Größen wird ein Oszilloskop als LVDS-Empfänger verwendet (siehe Kapitel 4.2.1). Dabei erfolgen die Messungen an den unipolaren Signalen, z.B. der Anstiegszeiten der Signalfanken, von 20 % zu 80 % der Signalamplitude.

Tabelle 3.2 fasst die zu überprüfenden Parameter zusammen.

Messparameter	Messsignal (Eingangssignal: PRBS)	PIN-Strom I_{PIN} (Amplitude)	Anforderung
LVDS-zeitliches Mittel U_{av}	LVDS pos. u. LVDS neg. CLK & CMD	100 μA	0.9 – 1.5 V
LVDS Amplitude U_{amp}	LVDS pos. u. LVDS neg. CLK & CMD	100 μA	0.2 – 0.5 V
Anstiegs- und Abfallzeit (20 – 80 %)	rek. CLK & CMD	100 μA	$\leq 1 \text{ ns}$
Verzögerung CMD- zu CLK-Fanken	rek. CLK & CMD	100 μA	0 – 3 ns
Duty-Cycle	rek. CLK	50, 100, 1000 μA	46 – 54 %
Jitter	rek. CLK	50, 100, 1000 μA	$\leq 1 \text{ ns}$

Der Jitter misst, wie stark die Pulsweiten des Logisch 1-Zustands eines Messsignals schwanken.

Tabelle 3.2: Qualitätsanforderungen an die Empfangseinheit eines Optoboards

Diese Messungen werden mit dem Optoboard-Testsystem, das in Kapitel 4 erläutert wird, automatisiert ausgeführt.

3.4 Implementierung der Datenübertragungsstrecke in den ATLAS-Detektor

Im ATLAS-Detektor befindet sich jedes Optoboard auf einer speziellen flexiblen Platine (Patch-Panel 0, PP0-Flex), die die Schnittstelle zwischen den TYPE0-Kabeln von den Pixel-Modulen zu den Optoboards darstellt und die Betriebsspannungen und -ströme für die Optoboards und Module verteilt [PP0] (vgl. Abb. 3.11).

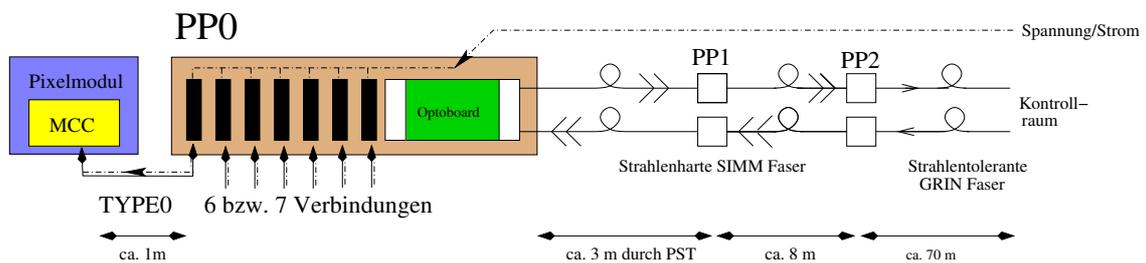


Abbildung 3.11: Elektrische und optische Verbindungen vom Kontrollraum zu den Pixel-Modulen

Jedes PP0-Flex bietet die Möglichkeit sechs oder sieben TYPE0-Kabel anzuschließen. Abbildung 3.12 zeigt die Lage der PP0-Flexe. Unmittelbar an den Pixel-Detektor schließt sich zu beiden Seiten eine 3 m lange, die Strahlröhre umfassende, Struktur an (Pixel-Support-Tube). Durch diese werden Versorgungsleitungen zum Pixel-Detektor gelegt.

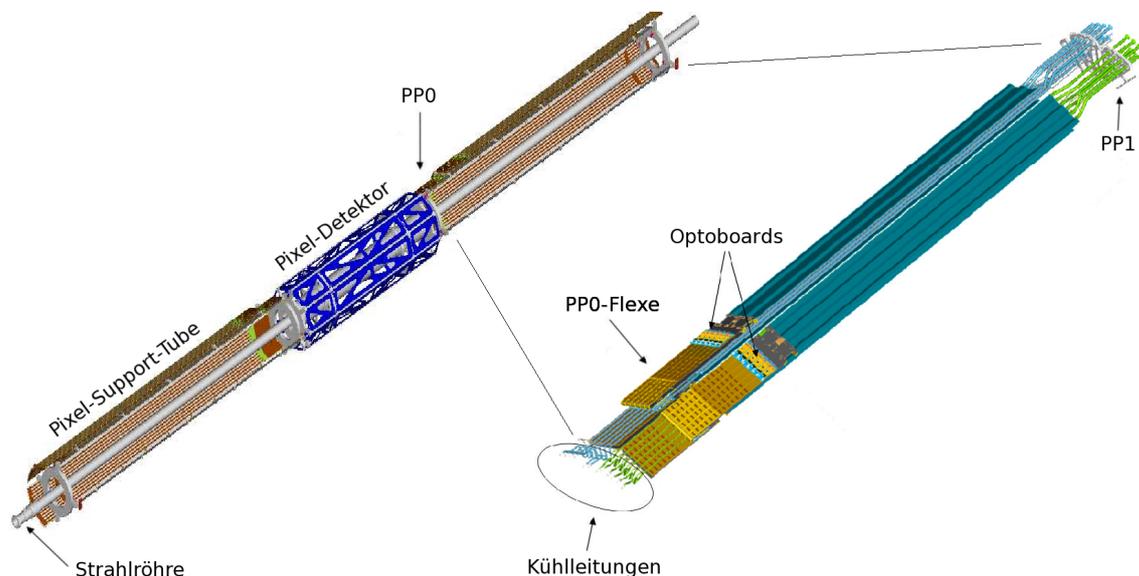


Abbildung 3.12: Pixel-Support-Tube mit PP0 und PP1 (nach [PP0] und [FDR])

Die PP0-Flexe befinden sich auf der dem Pixel-Detektor zugewandten Seite außen auf der Pixel-Support-Tube. Von den 13 Modulen eines Staves (vgl. Kapitel 1.2.1) im Pixel-Detektor werden sieben mit einem PP0-Flex einer Detektorseite, die verbleibenden 6 mit

einem der anderen Seite verbunden. Insgesamt befinden sich 272 Optoboards im Detektor, davon 44 des B-Lagen-Typs [POS].

Die Pixel-Support-Tube wird an ihren Enden durch eine weitere Schnittstelle (Patch-Panel 1, PP1) abgeschlossen. Am PP1 können sämtliche Versorgungsleitungen unterbrochen werden, was den Ein- und Ausbau des Pixel-Detektors erleichtert.

Die etwa 3 m lange Verbindung zwischen PP0 und PP1 besteht aus strahlenharten Stufenindex-Fasern (SIMM) (siehe Kapitel 2.3). Die Fasern sind in 8-Kanal Bändern zusammengefasst und auf der Optoboardseite mit passenden MT8-Stecker (vgl. Kapitel 4) abgeschlossen. Am PP1 werden jeweils zwei dieser Faserbänder durch eine Steckverbindung zu einem Bündel mit 16 Kanälen zusammengefasst.

An einer weiteren Schnittstelle (Patch-Panel 2, PP2) im Bereich der Myonenkammern enden die 8 m langen strahlenharten SIMM-Fasern vom PP1. Die verbleibende etwa 70 m lange optische Verbindung in den Kontrollraum wird von dort durch Gradientenindex-Fasern (GRIN) hergestellt. Um den Einbau einer weiteren Steckverbindung im optischen Weg zu vermeiden, werden die strahlenharten SIMM-Fasern vom Pixel-Detektor mit den strahlentoleranten GRIN-Fasern zum Kontrollraum am PP2 zu einer Verbindung verschweißt. Alle verwendeten Fasern sind vom Multi-Mode Typ, das bedeutet sie führen mehrere optische Moden.

4 Das Optoboard-Testsystem

In diesem Kapitel soll ein Testsystem vorgestellt werden, das es erlaubt die Messungen zur Qualitätssicherung an der Empfangseinheit (PIN-Dioden und Digital-Opto-Receiver-Integrated-Circuit, DORIC) und der Sendeeinheit (VCSEL-Driver-Chip, VDC und VCSEL) eines Optoboards durchzuführen. Zunächst werden in Kapitel 4.1 die wesentlichen Funktionen dieses Testsystems erläutert. Es ist modular aufgebaut, d.h. es besteht auf fünf verschiedenen Bestandteilen, die daran anschließend genauer vorgestellt werden.

Die Durchführung aller Qualitätsmessungen an einem Optoboard (siehe Kapitel 3.3) erfordern drei verschiedene Messaufbauten des Testsystems. Für jeden dieser Aufbauten wurde ein dazu passendes Messprogramm erstellt, das die zugehörigen Messungen automatisiert durchführt. Die Messaufbauten und die Messprogramme werden in Kapitel 4.1.3 erklärt.

4.1 Funktionen des Optoboard-Testsystems

Das Optoboard-Testsystem besteht aus einer zentralen Steuereinheit, einem optischen Abschwächer und drei Messkarten. Auf zwei dieser Messkarten (Messkarte DORIC und Messkarte Bitfehler) kann ein Optoboard aufgesetzt und mit Betriebsspannungen und -strömen (siehe Anhang B.1) betrieben werden. Zusätzlich existiert eine Messkarte (Messkarte VCSEL) für Untersuchungen an optische Signalen.

Von der zentralen Steuereinheit (Steuerkarte) können jedem Kanal der Empfangseinheit eines Optoboards optische Signale zugeführt und die vom zugehörigen DORIC-Kanal rekonstruierten Signale untersucht werden. In Abbildung 4.1 ist diese Funktion schematisch dargestellt.

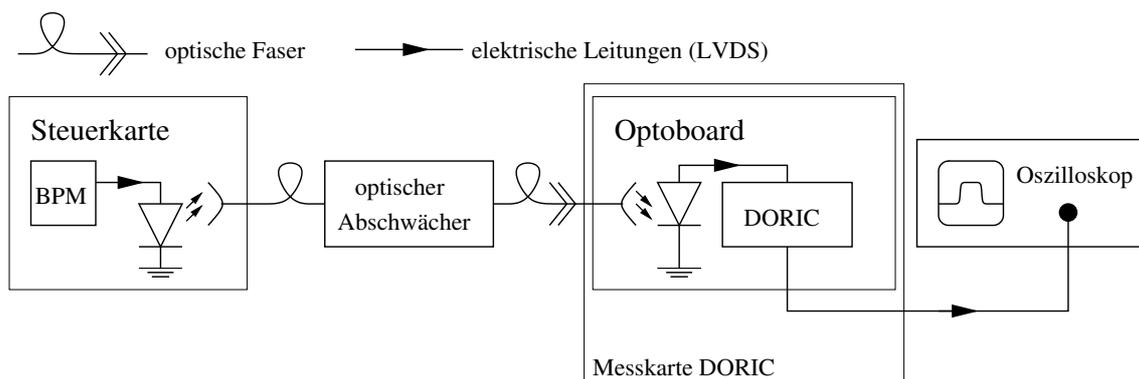


Abbildung 4.1: Betrieb der Empfangseinheit eines Optoboards mit optischen Eingangssignalen (schematisch)

Die Steuerkarte erzeugt optische, BPM-kodierte Signale. Diese laufen durch optische Fasern zu einer PIN-Diode des Optoboards. Dazwischen kann die Leistung der optischen Signale mit dem optischen Abschwächer reduziert werden. Zur Durchführung der Qualitätsuntersuchungen an der Empfangseinheit eines Optoboards können die von den DO-

RICs rekonstruierten Ausgangssignale mit einem Oszilloskop untersucht werden. Das ist mit der Messkarte DORIC möglich.

Jedem Kanal der Empfangseinheit eines Optoboards können von der Steuerkarte erzeugte LVDS-Signale zugeführt werden (Abb. 4.2).

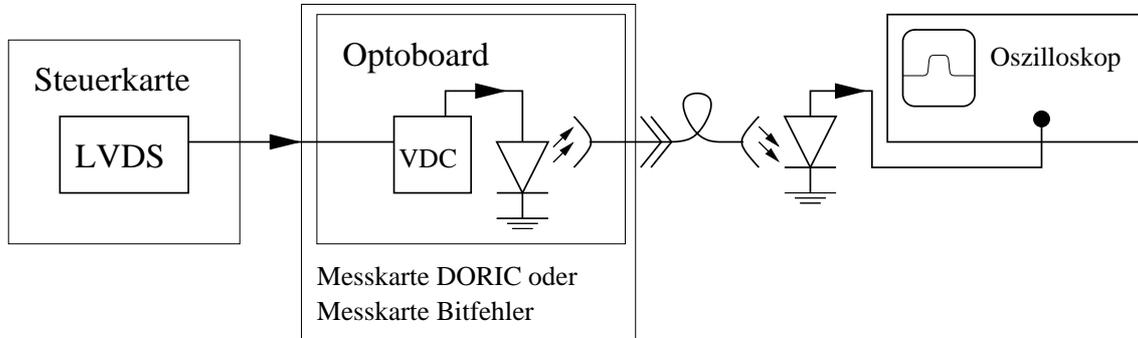


Abbildung 4.2: Betrieb der Sendeeinheit eines Optoboards mit elektrischen Eingangssignalen (schematisch)

Der angeschlossene VCSEL gibt diese Eingangssignale optisch aus. Sie werden von einer PIN-Diode, die sich auf der Messkarte VCSEL befindet, empfangen. Diese PIN-Diode erlaubt die Messung der optischen Leistung der Eingangssignale. Zusätzlich können mit einem Oszilloskop Messungen an den Pulsformen der VCSEL-Signale vorgenommen werden.

Diese beiden Funktionen erlauben die Durchführung aller Qualitätsuntersuchungen an einem Optoboard.

Zusätzlich erlaubt das Optoboard-Testsystem die Durchführung von Bitfehler-Analysen der Empfangseinheit. Dieses erfordert eine Signalarückspeisung zur Steuerkarte, wie sie in Abbildung 4.3 schematisch dargestellt wird.

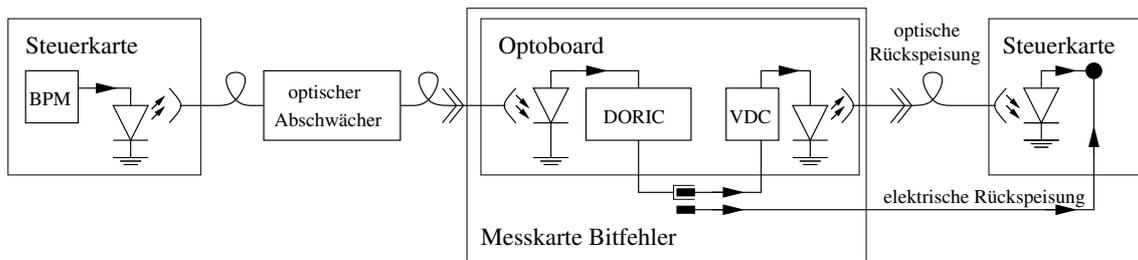


Abbildung 4.3: Rückspeisung der Ausgangssignale eines DORIC-Kanals zur Steuerkarte (schematisch)

Das Optoboard wird auf der Messkarte Bitfehler betrieben. Es empfängt über den optischen Abschwächer die Signale der Steuerkarte. Die daraus durch den DORIC rekonstruierten Signale können als LVDS-Signale zur Steuerkarte zurückgeführt werden (elektrische Rückspeisung). Die Elektronik der Steuerkarte kann die zurückgespeisten Signale mit den zuvor gesendeten vergleichen und die Anzahl unterschiedlicher Bits zählen.

Neben der elektrischen Rückspeisung der Ausgangssignale des DORICs ist auch ihre optische Rückspeisung möglich. Dazu wird der Ausgang des DORIC-Kanals mit einem VDC-Eingang verbunden. Der dran angeschlossene VCSEL sendet die Ausgangssignale des DORIC-Kanals zu einer PIN-Diode auf der Steuerkarte. Die dort empfangenen Signale können ebenso für eine Zählung der Bitfehler verwendet werden.

Als optische Verbindungen zwischen den Komponenten des Testsystems werden Stufenindex-Multimode-Fasern mit $50\ \mu\text{m}$ -Durchmesser verwendet. Im ATLAS-Detektor sind die Optoboards ebenfalls mit Fasern dieses Typs verbunden (siehe Kapitel 3.4). Acht dieser Fasern sind jeweils in ein Faserband zusammengefasst, das am Ende durch einen MT8-Stecker abgeschlossen ist. In Abbildung 4.4 ist ein MT8-Stecker schematisch dargestellt. Daneben ist das Foto eines VCSEL-Arrays des Typs gezeigt, wie er auf die Optoboards montiert wird.

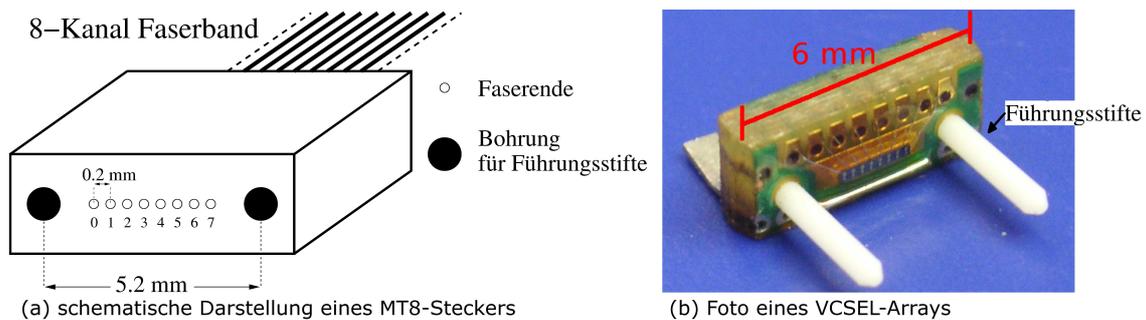


Abbildung 4.4: MT8-Stecker (schematisch nach [Cil02]) und Foto eines VCSEL-Arrays

Die Führungsstifte des VCSEL-Arrays passen in die Führungsbohrungen des MT8-Steckers. Wird der MT8-Stecker derart aufgesetzt, ist die korrekte Platzierung der Faserenden vor den VCSEL garantiert. Da ein Optoboard nur sieben Empfangs- und Sendekanäle hat, wird die äußere Faser (0) nicht verwendet. Zwei Faserbänder können durch eine spezielle Steckverbindung (MPO) verbunden werden. So ist es möglich, die Faserbänder auf dem PIN-Dioden-Array oder dem VCSEL-Array eines Optoboards mit den Komponenten des Testsystems, z.B. dem optischen Abschwächer zu verbinden.

Die elektrischen Verbindungen zwischen den Komponenten des Testsystems sind 20-adrige Flachbandkabel, die geeignet sind, LVDS-Signale über die kurzen Distanzen ohne wesentlichen Qualitätsverlust zu übertragen.

Im Folgenden werden die Bestandteile des Testsystems genauer beschrieben.

4.1.1 Die Steuerkarte

Die Steuerkarte ist der zentrale Bestandteil des Optoboard-Testsystems. Auf dieser Karte befindet sich eine programmierbare Logik (Field Programmable Gate Array, FPGA). Dieses FPGA generiert Bitfolgen, die als optische, BPM-kodierte Signale der Empfangseinheit oder als LVDS-Signale der Sendeeinheit eines Optoboards zugeführt werden. Zusätzlich kann die Logik Bitfolgen vergleichen und Bitfehler zählen.

Abbildung 4.5 zeigt schematisch den Aufbau der Steuerkarte.

Das FPGA arbeitet mit dem 40 MHz-Takt eines Quarzes auf der Steuerkarte. In das FPGA wird ein Programm¹ geladen, das Befehle eines externen Rechners über eine General-Purpose-Interface-Bus (GPIB) Schnittstelle empfängt und damit die Bestandteile der Karte steuert.

Zwei austauschbare Tochterkarten, eine BPM-Karte und eine DRX-Karte, können an die Steuerkarte angeschlossen werden. Diese Karten sind vom gleichen Typ, wie sie für den Betrieb der Datenübertragungsstrecke im ATLAS-Detektor entwickelt wurden (vgl. Abbildung 3.1).

¹Die Programm-Dokumentation findet sich in [AR05].

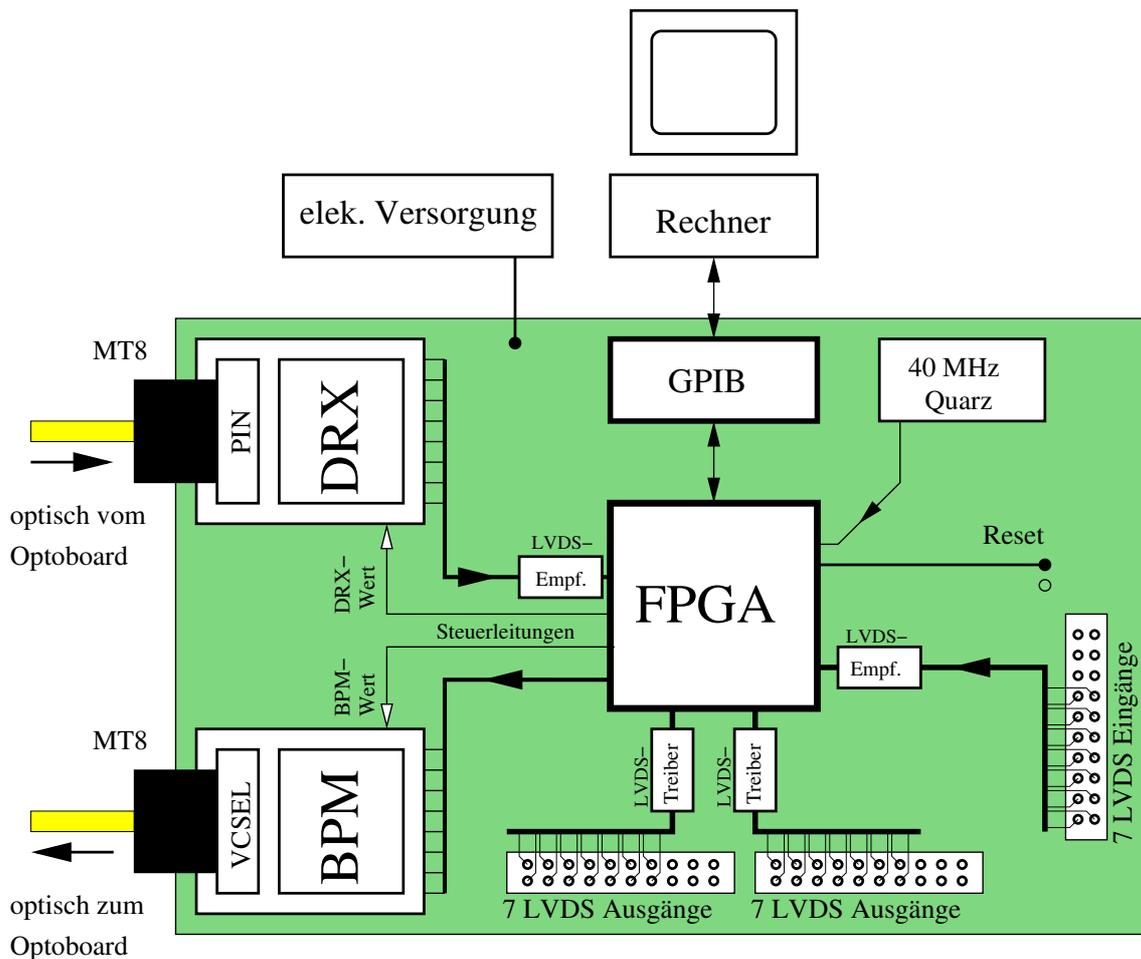


Abbildung 4.5: Aufbau der Steuerkarte (schematisch)

Auf der BPM-Karte befindet sich ein BPM-Chip [BPM] und ein daran angeschlossenes VCSEL-Array mit acht Kanälen. Für jeden Kanal des VCSEL-Arrays besitzt der BPM-Chip eine BPM-Kodier-Logik und einen VCSEL-Treiber.

Das FPGA nutzt diese Sendeeinheit um einem Optoboard optische Signale zu senden. Dazu generiert es fünf verschiedene Bitfolgen (permanent Logisch 0 oder 1, einen 20 MHz-Takt, eine zufällige Bitfolge, wiederholend eine Folge von 15 Taktzyklen Logisch 0 und einem Taktzyklus Logisch 1 (1 in 16)), die jedem Kanal BPM-Karte über eine Leitung zugeführt werden können. Der entsprechende VCSEL speist diese Signale BPM-kodiert in die Faser des aufgesteckten MT8-Steckers. Zusätzlich führt eine Steuerleitung vom FPGA zur BPM-Karte. Über diese Leitung kann das FPGA die optische Leistung jedes VCSELS des VCSEL-Arrays einstellen. Dazu dient ein Zahlenwert (BPM-Wert) zwischen 0 und 255 (255 entspricht maximaler optischer Leistung, siehe Kapitel 5.1.1), den der BPM-Chip für jeden Kanal speichert.

Auf der DRX-Karte befindet sich ein PIN-Dioden-Array mit zwölf Kanälen dessen Ausgänge an einen DRX-Chip angeschlossen sind. Acht der PIN-Dioden empfangen optische Signale aus Fasern des aufgesteckten MT8-Steckers. Vom FPGA kann für jeden Kanal der DRX-Karte ein Zahlenwert (DRX-Wert) zwischen 0 und 255 gesetzt werden, der die Empfangsschwelle bestimmt. Diese Empfangsschwelle legt fest, ab welcher Stromstärke

des in den DRX-Chip [DRX] einlaufenden PIN-Stroms das Eingangssignal als Logisch 1 interpretiert wird (siehe Kapitel 5.2). Der DRX-Chip gibt die empfangenen Signale als LVDS-Signale aus, die über einen LVDS-Empfänger in den FPGA laufen.

Über sieben LVDS-Ausgangskanäle der Steuerkarte werden LVDS-Signale zu Eingängen der verwendeten Messkarte (Messkarte DORIC oder Messkarte Bitfehler, s.u.) geführt. Von diesen Eingängen laufen die Signale in die VDCs der aufgesetzten Optoboards. Für ein Optoboard des B-Lagen Typs mit 14 VCSEL-Kanälen alle 14 Verbindungen benötigt. Sieben LVDS-Eingänge dienen der Rückspeisung von LVDS-Signalen. Die empfangenen Signale werden von einem LVDS-Empfänger in unipolare Signale umgewandelt und dem FPGA zugeführt.

Die Steuerkarte kann ein passendes Reset-Signal für die DORICs eines Optoboards generieren. Dieses läuft über eine koaxiale Leitung über die Messkarte zum Optoboard.

Die elektrische Versorgungsspannungen erhält die Steuerkarte von externen Spannungsquellen (siehe Anhang B.3).

4.1.2 Der optische Abschwächer

Neben der Reduktion der Sendeleistung der VCSEL auf der BPM-Karte (durch Verringerung des BPM-Werts) kann die optische Leistung der BPM-kodierten Signale, die von der Steuerkarte zum Optoboard laufen, durch einen optischen Abschwächer verringert werden. Die Beeinflussung der Signalqualität durch diese Abschwächungsmethode wird in Kapitel 5.1.2 diskutiert. Die Fasern, die durch den optischen Abschwächer führen, sind intern durch zwei Spalte gleicher Breite unterbrochen. Der Abschwächungsfaktor wird durch Variation der Spaltbreiten eingestellt.

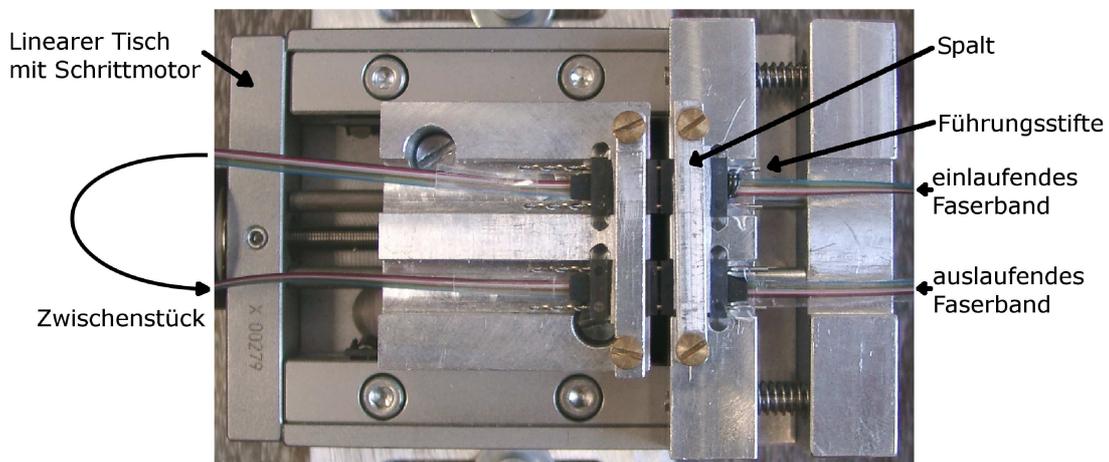


Abbildung 4.6: Foto des optischen Abschwächers

Abbildung 4.6 zeigt ein Foto der Spalte, welche die Fasern, die durch den optischen Abschwächer laufen, unterbrechen. Die MT8-Stecker des einlaufenden und des auslaufenden Faserbands sind parallel montiert und fixiert. Ein Schrittmotor verschiebt die Enden des Faserbands, das als Zwischenstück dient, auf der durch die Führungsstifte vorgegebenen Achse. Die Schrittgröße beträgt $5\ \mu\text{m}$ bis 1 mm, die maximale Spaltbreite mehr als 2 mm. Dieser Aufbau befindet sich in einem lichtundurchlässigen Metallgehäuse. Die Faserbänder im Inneren enden in MPO-Steckern, die durch die Wände des Gehäuses nach außen führen. In das äußere Ende eines dieser Stecker wird das Faserband eingesteckt,

das die abzuschwächenden Signale führt, in den zweiten Stecker das Faserband, das die abgeschwächten Signale aufnimmt.

Abbildung 4.7 zeigt schematisch einen einfachen Spalt.

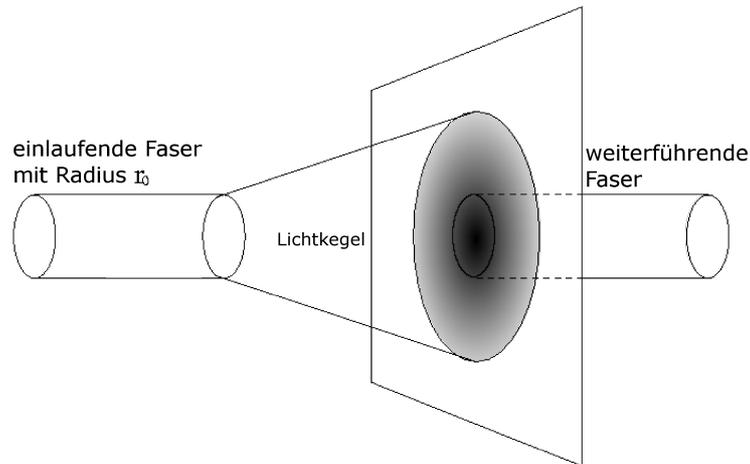


Abbildung 4.7: Der einfache Spalt (schematisch)

Am Ende der Faser wird das Licht in Form eines Kegelstumpfs abgestrahlt, dessen Öffnungswinkel durch die Numerische Apertur (siehe Kapitel 2.3.1) der Faser bestimmt wird. Übertragen wird nur das Licht, das auf die Oberfläche der weiterführenden Faser fällt.

4.1.3 Die Optoboard-Messkarten

Optoboards, die untersucht werden sollen, werden auf spezielle Trägerkarten aufgesetzt (Abb. 4.8). Jede Trägerkarte ist mit einer Vorrichtung ausgestattet, mit der die Faserbänder auf dem PIN-Dioden-Array und dem VCSEL-Array des Optoboards fixiert werden. Zusätzlich kann ein Schutzdeckel verschraubt werden.

Der 80-polige Stecker auf der Oberseite einer Trägerkarte, auf den ein Optoboard aufgesetzt wird, ist durch die Karte mit einer 80-poligen Buchse auf der Unterseite verbunden. Die Messkarten (Messkarte DORIC und Messkarte Bitfehler, s.u.) besitzen dazu passende Stecker, in die die Trägerkarte mit dem Optoboard für eine Messung eingesetzt werden kann. Die Trägerkarte erleichtert die Handhabung des Optoboards, macht den direkten Kontakt mit dem toxischen Berylliumoxid unnötig und verhindert die Abnutzung der 80-poligen Buchse des Optoboards beim Wechsel der Messkarte.

Messkarte DORIC

Die Messkarte DORIC erlaubt die Durchführung von Qualitätsuntersuchungen an den Ausgangssignalen des DORICs eines Optoboards (vgl. Abb. 4.1).

Jeder DORIC-Kanal eines Optoboards legt die rekonstruierten Signale auf vier Pins der 80-poligen Buchse auf der Unterseite des Optoboards (siehe Anhang B.1). Auf zwei dieser Pins liegen die zusammengehörenden LVDS-Signalleitungen (LVDS pos. und LVDS neg.) des rekonstruierten Taktsignals (CLK) und auf den anderen beiden die zusammengehörenden LVDS-Signalleitungen der rekonstruierten Steuersignale (CMD).

Wie in Abbildung 4.9 schematisch gezeigt, sind diese Signalpaare auf der Messkarte mit einem Widerstand $R_T = 75 \Omega$ abgeschlossen. Dieser im Vergleich zur LVDS-Norm kleinere

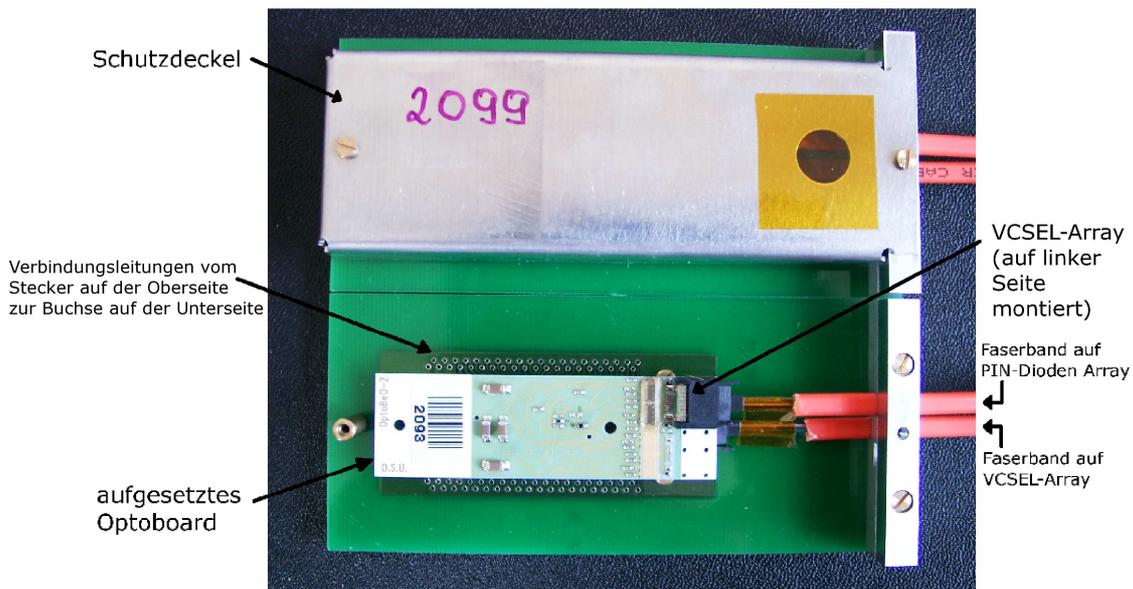


Abbildung 4.8: Trägerkarte mit aufgesetztem Optoboard

Abschlusswiderstand (vgl. Kapitel 3.1) ist an die TYPE0-Kabel, über die die LVDS-Signale zu den Modulen laufen (vgl. Kapitel 3.4), angepasst [MiZio].

Auf jeder Seite eines Abschlusswiderstands befindet sich eine spezielle Buchse für den Messkopf eines Oszilloskops². Diese Buchse verbinden die Signalleitung des Messkopfs mit der Leiterschleife und die Referenzsignalleitung des Messkopfs mit der Masse auf der Messkarte.

Abbildung 4.10 zeigt die Messkarte DORIC mit aufgesetzter Trägerkarte. Die Messkarte besitzt für die rekonstruierten Steuersignale (CMD) und die rekonstruierten Taktsignale (CLK) jeweils zwei Paare der Messkopfstecker. An ein Paar werden über einen Drehschalter die Signale eines der Kanäle zwei bis sieben (CMD 2-7 bzw. CLK 2-7) angelegt. Dadurch ist es möglich, die Messköpfe in den Buchsen zu belassen und die Kanäle nacheinander durch Drehung des Schalters anzulegen. Das beschleunigt die Durchführung der Messungen und die Messköpfe werden weniger beansprucht, weil sie seltener umgesteckt werden müssen. Da der Drehschalter nur sechs Stellungen besitzt, ist der erste Kanal mit einem separaten Paar Messkopfbuchsen (CMD 1 bzw. CLK 2) bestückt.

In den Drehschaltern laufen die differentiellen Signale durch zusätzliche innere Leiterbahnen. Diese stellen störende Induktivitäten dar und reduzieren die Signalqualität. Die Ergebnisse der Qualitätsmessungen eines korrekt arbeitenden Optoboards erfüllen die Qualitätsanforderungen jedoch auch bei Messungen an Kanälen, deren Signalleitungen über einen der Drehschalter geführt werden.

Zur Durchführung unverfälschter Messungen an zehn Optoboards (siehe Kapitel 6.1.1 und Anhang D) wurde eine zweite Messkarte DORIC verwendet. Auf dieser Karte sind alle Kanäle mit einem Paar Messkopfbuchsen bestückt. Zusätzlich können auch die beiden Leitungen, die mit dem temperaturabhängigen Widerstand (vgl. Kapitel 3.2) auf dem Optoboard verbunden sind, auf der Karte abgegriffen werden.

²HP Infinium™54825A (500 MHz, 2 GS/s)

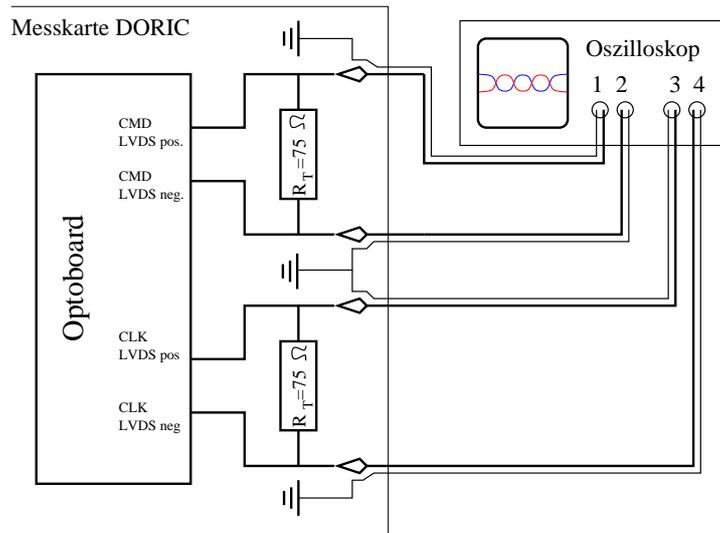


Abbildung 4.9: Messung der LVDS-Signale eines DORIC-Kanals mit einem Oszilloskop (schematisch)

Zwei 20-adrige Flachbandkabel, die die LVDS-Signale für den Betrieb der VDCs führen, enden in Buchsen auf der Messkarte. Bei Optoboards mit einer Seriennummer zwischen 2000 und 2999 (VCSEL links, siehe Kapitel 3.2 und Abb.4.8) müssen die Eingangssignale für die VDCs an andere Pins der Buchse des Optoboards angelegt werden als bei Optoboards mit einer Seriennummer zwischen 3000 und 3999 (VCSEL rechts). Während der Messungen sind stets beide Flachbandkabel verbunden und es liegen auf allen möglichen VDC-Eingängen Signale an, obwohl nur ein Optoboard des B-Lagen-Typs alle 14 Signalleitungen benötigt.

Der LVDS-Treiber auf der Steuerkarte sollte mit $R = 100 \Omega$ im LVDS-Empfänger abgeschlossen werden. Die LVDS-Empfänger der VDCs schließen die einlaufenden LVDS-Signalleitungen jedoch nur mit $R_T = 75 \Omega$ ab. Diese Fehlanpassung wurde nicht korrigiert, da im Betrieb keine dadurch verursachte Beeinträchtigung festgestellt wurde.

Zusätzlich besitzt die Messkarte DORIC einen koaxialen Eingang für die Signalleitungen des Reset-Signals von der Steuerkarte an die DORICs des Optoboards.

Messkarte Bitfehler

Die Messkarte Bitfehler ermöglicht die elektrische oder optische Rückspeisung der von den DORICs eines Optoboards rekonstruierten Signale zur Steuerkarte (vgl. Abb. 4.3). Die Messkarte Bitfehler mit aufgesetzter Trägerkarte wird in Abbildung 4.11 gezeigt. Im Gegensatz zur Messkarte DORIC werden auf dieser Messkarte die von den DORICs des Optoboards ausgehenden LVDS-Signalleitungen nicht durch Abschlusswiderstände abgeschlossen. Die dekodierten Steuersignale können ebenso wie die rekonstruierten Taktsignale aller sieben Kanäle an jeweils einer 20-poligen Buchse abgegriffen werden.

Die Steuersignale werden über Flachbandkabel zur Steuerkarte zurückgeführt. Im dortigen Empfänger sind die zusammengehörenden Signalleitungen ebenfalls mit $R_T = 75 \Omega$ statt mit $R = 100 \Omega$ abgeschlossen. Diese Fehlanpassung hat im Betrieb ebenfalls keine Beeinträchtigungen verursacht.

Es ist auch möglich die Taktsignale anstelle der Steuersignale zur Steuerkarte zurückzuführen um eine Bitfehler-Zählung durchzuführen. In die Buchse, an der die Signale

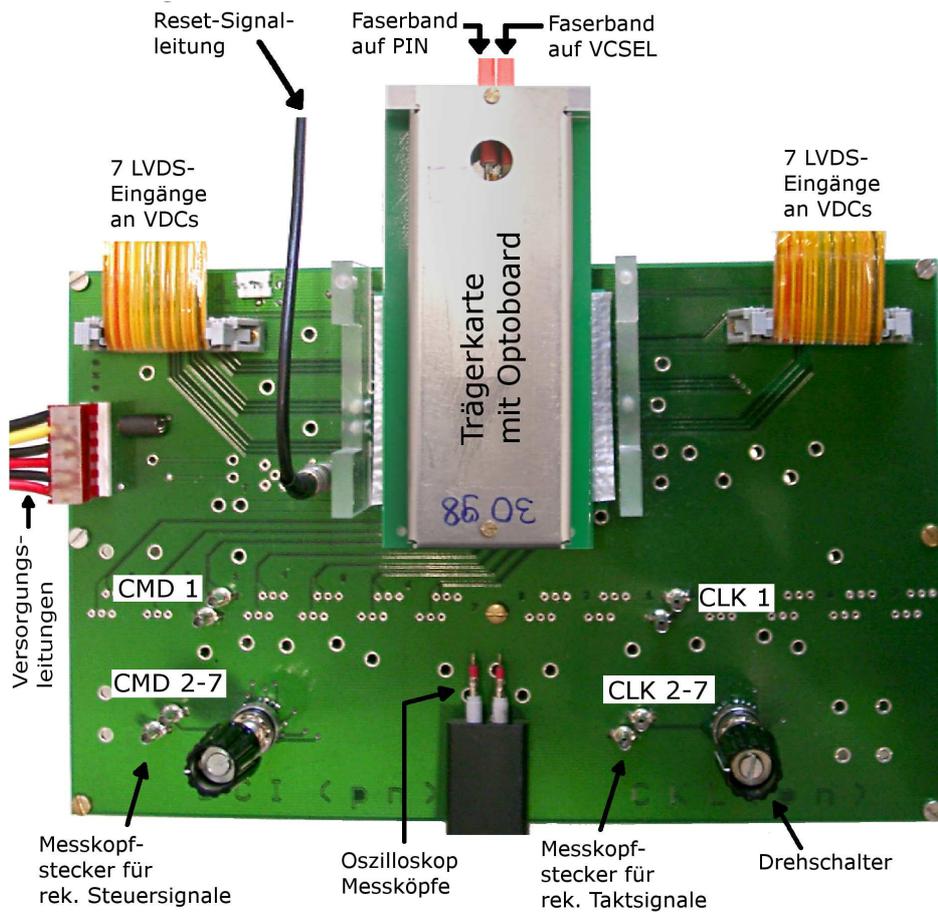


Abbildung 4.10: Messkarte DORIC

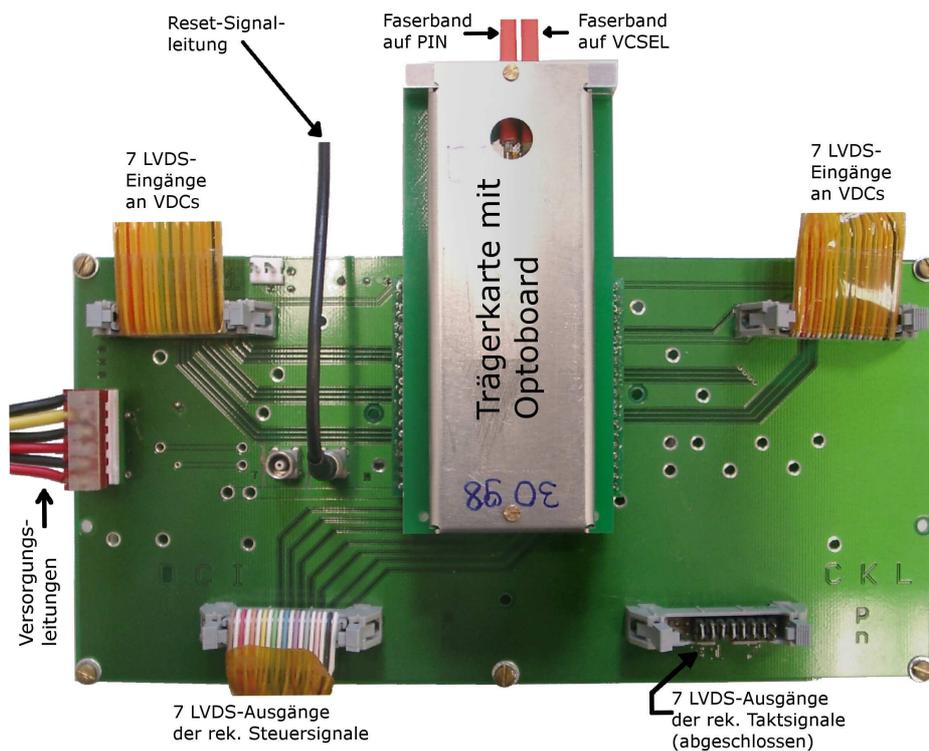


Abbildung 4.11: Messkarte Bitfehler

anliegen, die nicht zurückgespeist werden, wird ein Gegenstück eingesetzt, das die zusammengehörenden LVDS-Signalleitungen mit $R = 100\ \Omega$ abschließt (siehe Abb. 4.11).

Wie die Messkarte DORIC besitzt die Messkarte Bitfehler einen coaxialen Eingang für die Signalleitungen des Reset-Signals an die DORICs des Optoboards.

Messkarte VCSEL

Die Messkarte VCSEL dient dazu, die Leistung optischer Signale zu messen und weitere Untersuchungen, z.B. die Messung von Anstiegs- und Abfallzeiten optischen Signale durchzuführen. Dazu befindet sich auf der Messkarte VCSEL ist eine großflächige Fotodiode (Large-Surface-Photodiode, LSP) und ein PIN-Dioden-Array mit acht Kanälen. Beide werden mit $V_{PIN} = 10\ \text{V}$ depletiert.

Die LSP befindet sich in einem Gehäuse, in das ein MT8-Stecker eingesteckt wird. Das aus allen acht Fasern austretende Licht fällt auf die LSP. Durch die Messung des PIN-Stroms, den das einfallende Licht auslöst, wird die von allen Fasern des Faserbands geführte optische Leistung bestimmt.

Das PIN-Dioden-Array ist vom gleichen Typ wie die, die auf die Optoboards montiert werden. Auf einem Optoboard oder der DRX-Karte sind die Ausgänge des PIN-Dioden-Arrays mit den Eingängen der DORICs bzw. des DRX-Chips verbunden. Es ist daher bei diesen nur möglich, den gesamten PIN-Strom zu messen, der in allen PIN-Dioden des Arrays erzeugt wird.

Wie in Abbildung 4.12 verdeutlicht liegt im Fall des PIN-Dioden-Arrays auf der Messkarte VCSEL die Depletionsspannung nur an einem Kanal an. Dieser kann über einen Drehschalter ausgewählt werden. Es ist dadurch möglich, die aus jeder Faser austretende Lichtleistung unabhängig von der Lichtleistung in den verbleibenden Fasern zu messen.

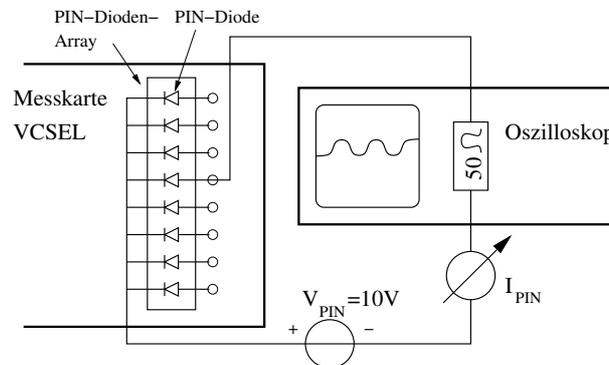


Abbildung 4.12: Messung an den Ausgangssignalen des VCSEL

Der Stromkreis, über den die Depletionsspannung an der PIN-Diode anliegt, muss mit einem zusätzlichen Widerstand von $50\ \Omega$ geschlossen werden. Dazu kann der Innenwiderstand $R_i = 50\ \Omega$ eines angeschlossenen Oszilloskops dienen, wie Abbildung 4.12 schematisch zeigt. An den einlaufenden optischen Signalen können mit dem Oszilloskop Messungen vorgenommen werden. Ihre optische Leistung wird ebenfalls durch Messung des PIN-Stroms bestimmt. Der Widerstand in Sperrrichtung einer PIN-Diode beträgt etwa $5\ \text{M}\Omega$, die zusätzlichen Widerstände im Oszilloskop und im Strommessgerät verringern die Potentialdifferenz an der Diode nur geringfügig.

Die Responsivitäten R , d.h. das Verhältnis von erzeugtem Fotostrom zu optischer Ein-

gangsleistung der LSP und des PIN-Dioden-Arrays, sind [AR05]:

$$\text{LSP: } R_{\text{LSP}} = (1.91 \pm 0.04) \frac{\text{A}}{\text{W}}, \quad (4.1)$$

$$\text{PIN-Dioden-Array: } R_{\text{PIN}} = (1.73 \pm 0.04) \frac{\text{A}}{\text{W}}, \quad (4.2)$$

$$\frac{R_{\text{PIN}}}{R_{\text{LSP}}} = 0.903 \pm 0.006. \quad (4.3)$$

4.2 Automatisierung der Messprozeduren

Die Messungen zur Überprüfung der Qualität produzierter Optoboards (vgl. Kapitel 3.3) mit dem hier vorgestellten Optoboard-Testsystem wurden durch Programme automatisiert, die mit Hilfe einer graphischen Programmieroberfläche³ erstellt wurden. Ein Rechner kann über jeweils eine serielle Schnittstelle zwei Multimeter⁴ auslesen und den optischen Abschwächer steuern. Über eine GPIB-Schnittstelle kommuniziert der Rechner mit dem FPGA der Steuerkarte und dem Oszilloskop.

Die Messprogramme steuern über diese Schnittstellen die Komponenten des Testsystems und führen die Messungen automatisiert durch. Das heißt, ein Programm stellt die benötigte Messbedingung her, es justiert z.B. die optische Leistung durch den Abschwächer, führt die Messungen durch, liest die Messwerte aus und speichert diese. Die Durchführung einer kompletten Qualitätsuntersuchung eines Optoboards erfordert drei Messaufbauten, die mit den zugehörigen Programmabläufen im Folgenden erläutert werden. Eine genauere Beschreibung der Messprogramme findet sich in Anhang D.

4.2.1 Automatisierte Messung der Ausgangssignalqualität des DORIC

Messaufbau

Der Messaufbau zur Überprüfung der Ausgangssignalqualität eines Kanals des DORICs ist in Abbildung 4.13 schematisch dargestellt. Das Optoboard wird auf der Messkarte DORIC betrieben.

Das FPGA auf der Steuerkarte erzeugt eine zufällige Bitfolge, die von einem VCSEL der BPM-Karte über den Abschwächer an eine PIN-Diode auf dem Optoboard gesendet wird. Der PIN-Strom, den die optischen Signale im PIN-Dioden-Array des Optoboards erzeugen, wird durch das Strommessgerät eines Multimeters gemessen. Da nur der gesamte PIN-Strom aller sieben PIN-Dioden gemessen werden kann, dürfen die übrigen sechs keine optischen Signale empfangen, damit der geforderte PIN-Strom für eine Messung eingestellt werden kann.

Das Oszilloskop misst den Potentialverlauf auf beiden Seiten der Abschlusswiderstände, die die LVDS-Signalleitungen des rekonstruierten Taktsignals (CLK) und der rekonstruierten Steuersignale (CMD) dieses Kanals abschließen (siehe auch Abb.4.9). Das Referenzsignal (Masse) wird dafür über die Messkopfstecker von der Messkarte übernommen. Intern subtrahiert das Oszilloskop das LVDS-Signal der negativen Polarität von dem der positiven Polarität. Es arbeitet dann als LVDS-Empfänger (vgl. Abb. 3.2). Auf diese Weise können an beiden Signalpolaritäten eines LVDS-Signals und am daraus rekonstruierten unipolaren Signal Messungen vorgenommen werden.

³Die Messprogramme wurden in LabViewTM Ver. 6.2 erstellt.

⁴VoltcraftTMM3860

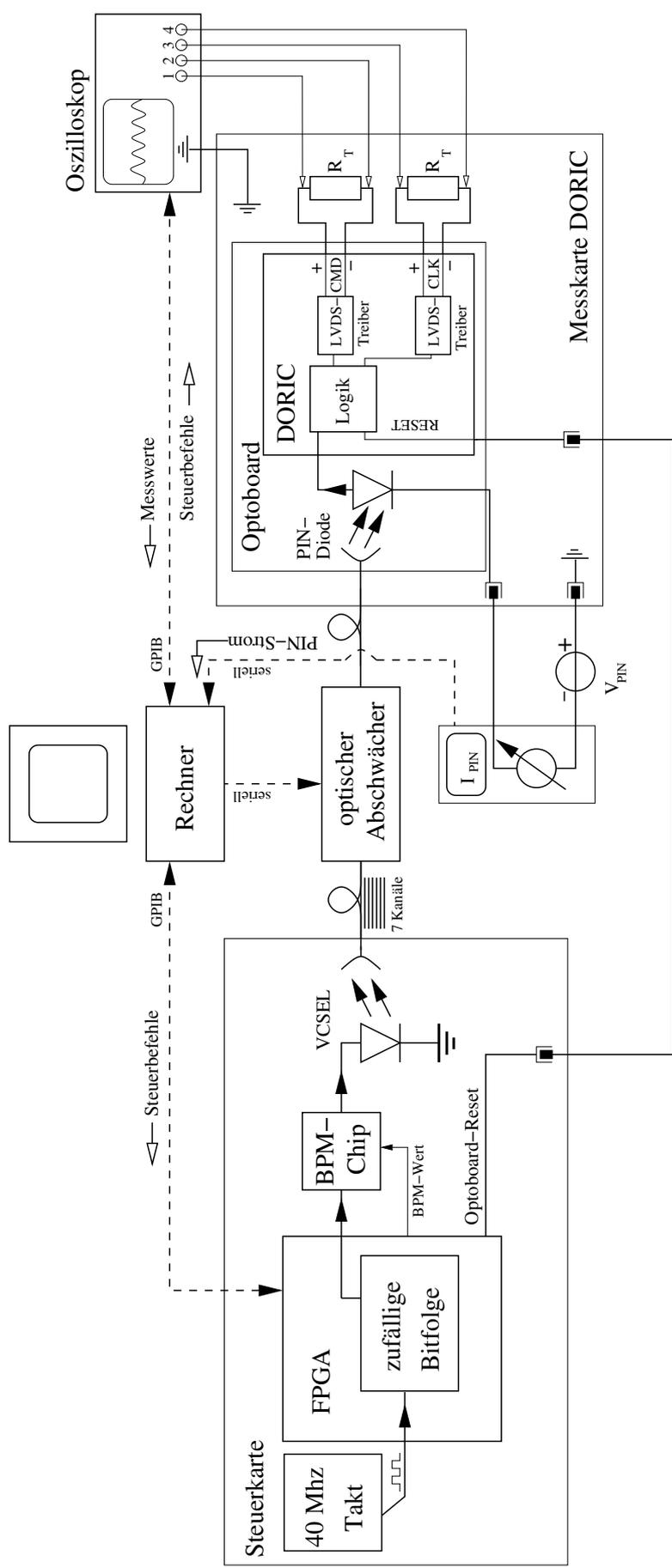


Abbildung 4.13: Blockschaubild zur Durchführung der Messungen an den Ausgangssignalen eines DORIC-Kanals

Programmablauf

Das Messprogramm auf dem Rechner führt die DORIC-Qualitätsmessung für den vom Benutzer gewählten Kanal durch. Das bedeutet, es aktiviert über das FPGA auf der Steuerkarte den entsprechenden VCSEL-Kanal auf der BPM-Karte. Dieser sendet während der gesamten Messdauer mit maximaler Ausgangsleistung (BPM-Wert 255). Mit Hilfe des optischen Abschwächers justiert das Steuerprogramm den PIN-Strom. Ist der Sollwert ($I_{\text{PIN}} = 50, 100, 1000 \mu\text{A}^5$) erreicht, ruft das Messprogramm im Oszilloskop nacheinander Messprotokolle (z.B. Messung der Anstiegs- und Abfallzeit) auf, führt die Messung durch und liest die Messwerte aus. Nachdem die erforderlichen Messungen bei allen vorgegebenen PIN-Strömen vorgenommen wurden, muss der Benutzer den nächsten zu messenden Kanal auswählen. Ausführlicher ist der Programmablauf in Anhang C.2.1 beschrieben.

4.2.2 Automatisierte Bestimmung der Bitfehler-Schwellen

Abbildung 4.14 zeigt die Bitfehlerrate (BER) eines DORIC-Kanals bei vorgegebener PIN-Stromstärke. Die Bitfehlerrate ist das Verhältnis falsch dekodierter Bits zur Gesamtzahl empfangener Bits.

$$\text{BER} = \frac{\text{Falsch dekodierte Bits}}{\text{Gesamtzahl empfangener Bits}} \quad (4.4)$$

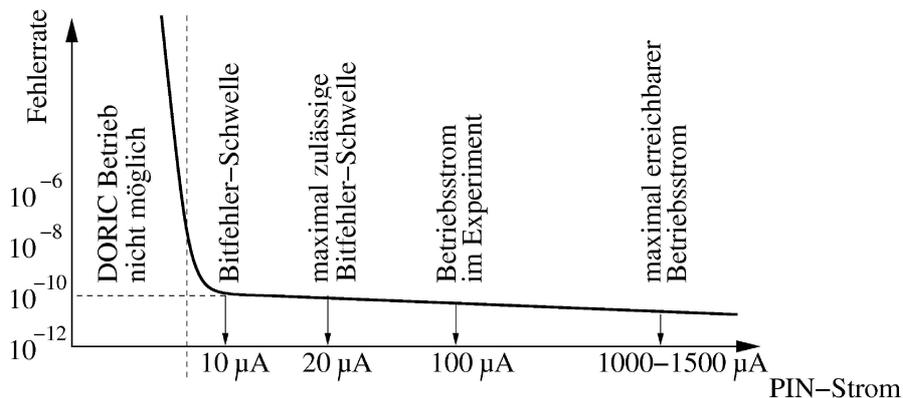


Abbildung 4.14: Bitfehlerrate bei vorgegebenem PIN-Strom

Die Bitfehlerrate eines korrekt arbeitenden DORIC-Kanals liegt unter 10^{-10} , falls der PIN-Strom größer als $10 \mu\text{A}$ ist. Fällt der PIN-Strom unter diesen Wert, wird die Signalamplitude zu klein und der Differenzverstärker des DORIC-Kanals (vgl. Abbildung 3.6) kann Untergrundrauschen als Signalfanken interpretieren. Durch diese Fehlinterpretation steigt die Bitfehlerrate an. Die Bitfehler-Schwelle ist die PIN-Stromstärke, unterhalb derer die Bitfehlerrate exponentiell ansteigt.

Fällt der PIN-Strom deutlich unter die Bitfehler-Schwelle (um mehr als $1.5 \mu\text{A}$), wird durch der Dekodierlogik (vgl. Kapitel 3.1.1) viele Fehlinterpretationen ein undefiniertes Signal zugeführt und die daraus erzeugte Pulsfolge (vgl. Abb. 3.7) enthält viele nicht taktssynchrone Pulse. Die Rekonstruktion des Taktsignals reißt ab, da die eingestellte Verzögerungszeit der Verzögerungsgatter durch diese zusätzlichen Pulse dejustiert wird. Korrekter Betrieb

⁵Die Angabe der Größe eines PIN-Stroms bezieht sich im Folgenden stets auf die Signalamplitude.

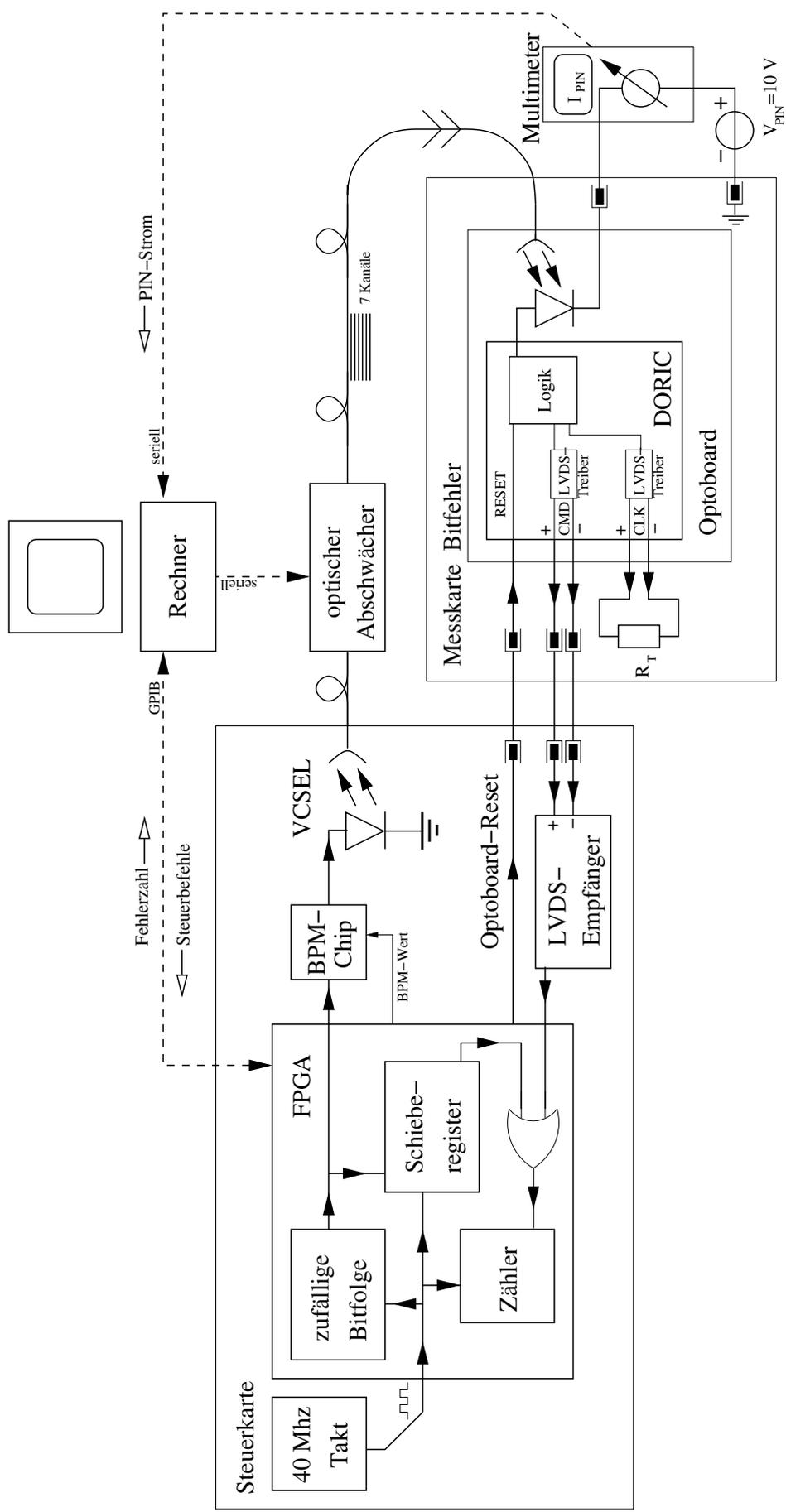


Abbildung 4.15: Blockschaltbild der Bitfehler-Schwellenmessung mit elektrischer Rückspeisung

des DORIC-Kanals ist danach nur durch Senden eines Reset-Signals an die DORICs bei einem PIN-Strom oberhalb der Bitfehler-Schwelle möglich. Die Bitfehler-Schwelle korrekt arbeitender Optoboards liegt bei einem PIN-Strom von etwa $10\ \mu\text{A}$, maximal zulässiger Wert ist $20\ \mu\text{A}$. Während des Betriebs des ATLAS-Detektors liegt der nominale PIN-Strom bei $100\ \mu\text{A}$ [MiZio] deutlich über der Bitfehler-Schwelle.

Die Bestimmung der Bitfehler-Schwelle erfolgt durch Vergleich der Bitfolge, die einem DORIC-Kanal optisch gesendet wird, mit der Bitfolge, die der DORIC-Kanal daraus rekonstruiert. Das FPGA ermittelt daraus die Bitfehlerzahl, die über die GPIB-Schnittstelle ausgelesen werden kann.

Messaufbau

Abbildung 4.15 zeigt schematisch den Messaufbau zur Bestimmung der Bitfehler-Schwelle eines DORIC-Kanals mit elektrischer Rückspeisung.

Das FPGA auf der Steuerkarte erzeugt eine zufällige Bitfolge. Diese wird in ein getaktetes Schieberegister eingelesen und zugleich von der BPM-Karte über den Abschwächer zu dem Kanal des Optoboards gesendet, dessen Bitfehler-Schwelle bestimmt werden soll. Die übrigen Kanäle der BPM-Karte sind deaktiviert. Der PIN-Strom I_{PIN} wird vom Strommessgerät des Multimeters gemessen.

Über zwei Signalleitungen gelangen die LVDS-Ausgangssignale der Steuersignale (CMD) des entsprechenden DORIC-Kanals in den LVDS-Empfänger der Steuerkarte. Das FPGA übernimmt die Ausgangssignale des LVDS-Empfängers mit seinem Takt und dem dazu invertierten Takt. Intern vergleicht jeweils ein Exklusiv-Oder-Gatter diese beiden übernommenen Signale mit den Ausgangssignalen des Schieberegisters. Daraus errechnet das FPGA zwei Fehlerzahlen, wobei die kleinere die Anzahl der Bitfehler angibt [AR05].

Die Tiefe des Schieberegisters ist durch das Messprogramm einstellbar und wird vom Benutzer so angepasst, dass ein vom FPGA ausgegebenes Bit gleich viele Taktzyklen benötigt, um das Schieberegister zu durchlaufen, wie es benötigt, um die optische Datenübertragungstrecke über das Optoboard zu durchlaufen. Die zeitliche Differenz einer Signalfanke der aus dem Schieberegister ausgelesenen Bitfolge zu der zugehörigen Signalfanke der zurückgespeisten Bitfolge beträgt bei korrekt eingestellter Verzögerungszeit weniger als einen Taktzyklus.

Es liegen keine Bitfehler vor, wenn eine der zwei Zählraten null ist. Das FPGA kann zwei verschieden lang andauernde Bitfehler-Zählungen vornehmen. In einer kurzen Zählung werden 2^{15} empfangene mit zuvor gesendeten Bits verglichen. Das benötigt etwa 1 ms Programmlaufzeit. In einer langen Bitfehler-Zählung werden $2^{25} \approx 0.34 \cdot 10^8$ Bits verglichen, was etwa 1 s Programmlaufzeit benötigt [AR05].

Programmablauf

Das Programm zur Ermittlung der Bitfehler-Schwelle aktiviert über den FPGA den VCSEL-Kanal der BPM-Karte, der zu dem DORIC-Kanal des Optoboards sendet, dessen Bitfehler-Schwelle bestimmt werden soll. Die Lichtleistung des VCSEL ist dabei vom Benutzer durch den BPM-Wert einstellbar. Voreingestellt ist ein BPM-Wert von 130.

Zunächst wird der optische Abschwächer so eingestellt, dass der im PIN-Dioden-Array auf dem Optoboard erzeugte Strom größer als die Bitfehler-Schwelle ist ($I_{\text{PIN}} > 20\ \mu\text{A}$). Durch Reduktion der optischen Leistung mit dem Abschwächer wird der PIN-Strom schrittweise verringert. Zwischen diesen Schritten wird eine kurze Bitfehler-Zählung vorgenommen. Die Reduktion wird beendet, wenn in einer Zählung mehr als 20 Fehler gezählt werden. Der

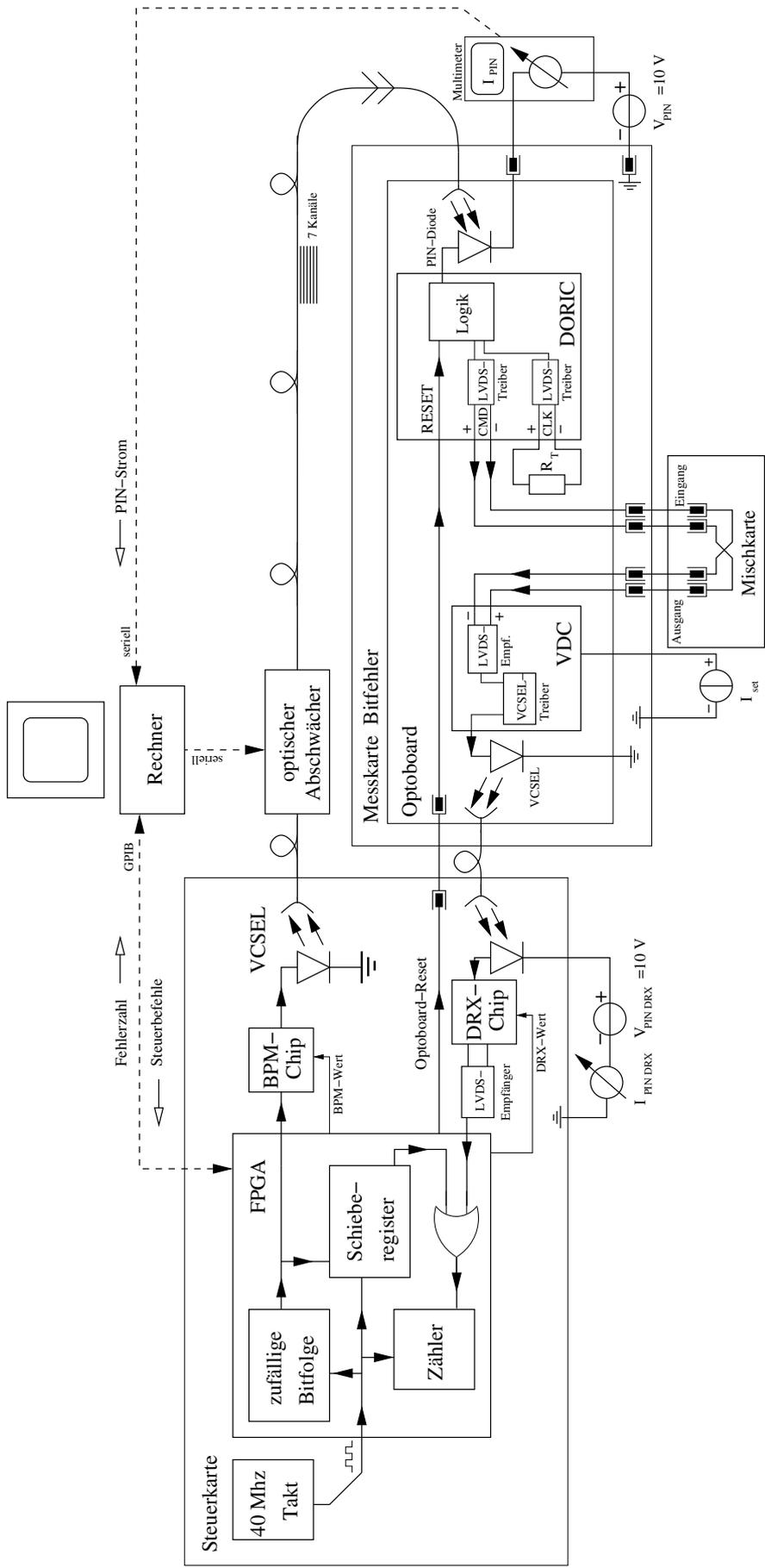


Abbildung 4.16: Blockschaltbild der Bitfehler-Schwellenmessung mit optischer Rückspeisung

PIN-Strom liegt unter der Bitfehler-Schwelle. So wird verhindert, dass die Prozedur abbricht, bevor die Bitfehler-Schwelle unterschritten ist. Um die Schwelle genauer einzugrenzen, wird in kleineren Schritten (von etwa $0.2 \mu\text{A}$) nacheinander der PIN-Strom erhöht, ein Reset-Signal gesendet und eine lange Bitfehler-Zählung vorgenommen. Das Optoboard-Reset-Signal ist für die Wiederherstellung des korrekten DORIC-Betriebs oberhalb der Bitfehler-Schwelle nötig. Treten keine Bitfehler mehr auf, wird eine erneute Bitfehler-Zählung ohne weitere Erhöhung des PIN-Stroms durchgeführt. Ist auch deren Ergebnis negativ, wird der PIN-Strom in kleinen Schritten gesenkt, bis in langer Zähldauer mindestens ein Fehler auftritt. Andernfalls wird der PIN-Strom weiter erhöht. Der zuletzt gemessene PIN-Strom, bei dem eine fehlerfreie Bitfehler-Zählung vorgenommen wurde, wird als Bitfehler-Schwelle gespeichert. Abbildung 4.16 zeigt schematisch den Messaufbau zur Bestimmung der Bitfehler-Schwelle eines DORIC-Kanals mit optischer Rückspeisung. Im Gegensatz zum Aufbau zur elektrischen Messung der Bitfehler-Schwellen (Abb. 4.15) werden die LVDS-Ausgangssignale des DORIC-Kanals nicht direkt zur Steuerkarte zurückgeführt. Sie laufen über eine externe Karte (Mischkarte in Abbildung 4.16). Auf dieser Mischkarte sind Leiterbahnen so verlegt, dass die Ausgangssignale des DORIC-Kanals, die am Eingang anliegen, auf den richtigen VCSEL-Eingang des VDCs geführt werden, der mit dem Ausgang der Mischkarte verbunden ist. Der VCSEL sendet die Signale an die DRX-Karte auf der Steuerkarte. Die eingehenden optischen Signale werden in elektrische umgewandelt und dem FPGA zum Vergleich mit den gesendeten Signalen zugeführt. Durch Messung des PIN-Stroms $I_{\text{PIN DRX}}$, der im PIN-Dioden-Array der DRX-Karte erzeugt wird, kann die Ausgangsleistung der VCSEL des Optoboards durch den Strom I_{set} so eingestellt werden, dass die Empfangsschwellen der DRX-Karte (DRX-Wert) korrekt gesetzt werden können (siehe Kapitel 5.2). Der Programmablauf zur optischen Bestimmung der Bitfehler-Schwellen ist analog zur elektrischen Bestimmung.

4.2.3 Automatisierte Messung der Ausgangssignalqualität der VCSEL

Messaufbau

Um die Ausgangssignalqualität zu untersuchen, sendet der VCSEL eines Optoboards von der Steuerkarte generierte Bitfolgen, ein 20 MHz- oder ein 40 MHz-Taktsignal oder eine zufällige Bitfolge, zu einer PIN-Diode auf der Messkarte VCSEL. Abbildung 4.17 zeigt schematisch den Messaufbau.

Eine Leistungsmessung erfolgt durch Messung des in der PIN-Diode erzeugten PIN-Stroms mit dem Strommessgerät des Multimeters. Der Umrechnungsfaktor von PIN-Strom zu optischer Leistung ist in Gleichung (4.2) gegeben. Die Leistungsmessung wird mit allen drei Signalformen durchgeführt. Im Falle des 40 MHz-Ausgangssignals werden zusätzlich die Anstiegs- und Abfallzeiten der Signalfanken gemessen.

Programmablauf

Das Messprogramm legt auf alle VCSEL-Ausgänge über das FPGA ein 20 MHz-Taktsignal. Nacheinander werden die Kanäle, beginnend bei Kanal 1, durch den Benutzer über den Drehschalter der Messkarte VCSEL ausgewählt. Der zum jeweils ausgewählten Kanal gehörende VCSEL auf dem Optoboard sendet nacheinander die zufällige Bitfolge, das 40 MHz- und das 20 MHz-Taktsignal. Das Programm misst und speichert für jedes der drei Signale die optische Leistung. Es steuert das Oszilloskop zur Messung der Anstiegs- und Abfallzeiten und führt in dem Zeitraum, in dem der 40 MHz-Takt anliegt, die Messung durch und speichert die Messwerte.

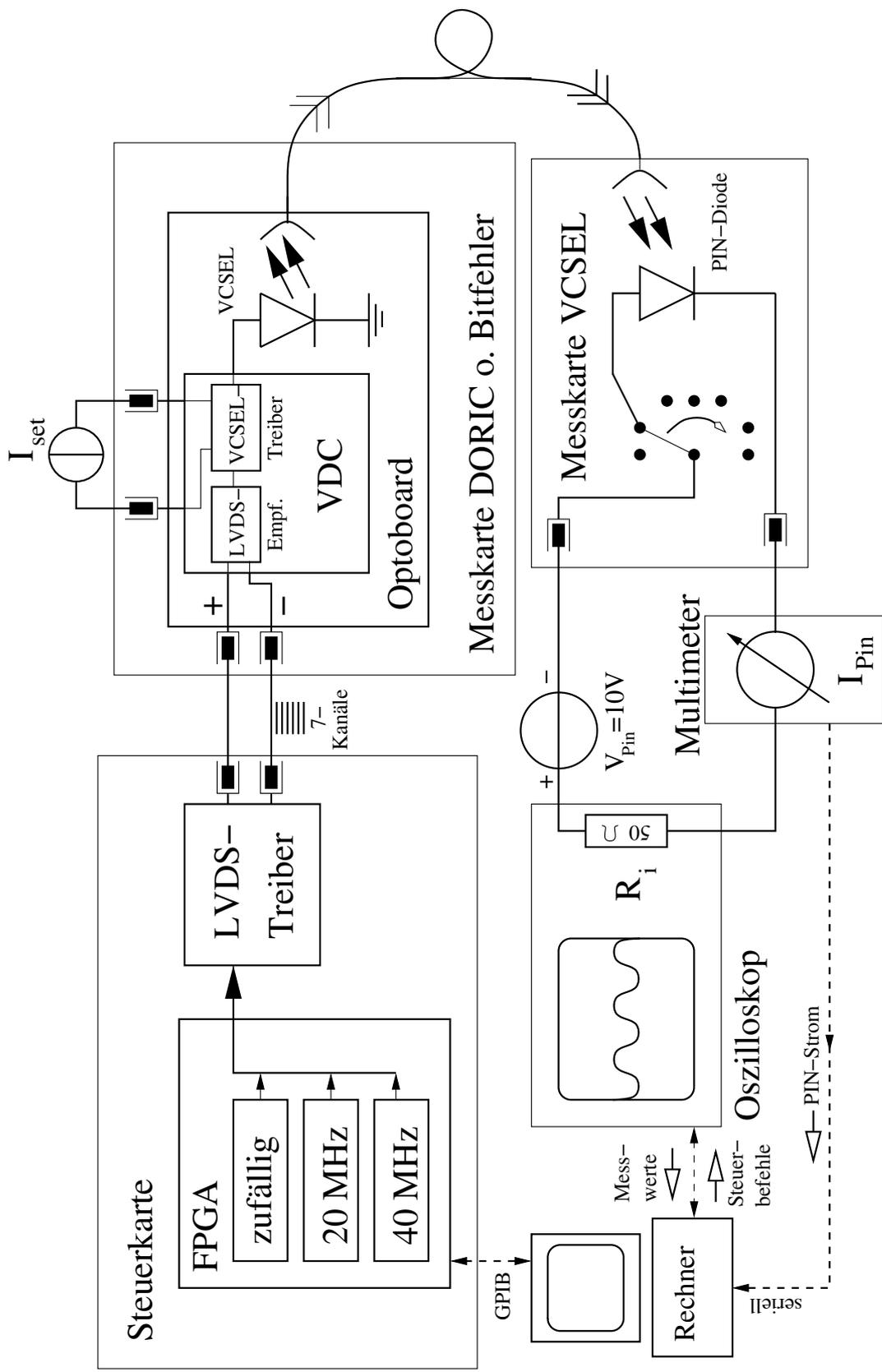


Abbildung 4.17: Blockschaltbild für die Messung der Eigenschaften eines VCSEL

5 Eigenschaften des Optoboard-Testsystems

Um Messungen an den Optoboards korrekt durchführen zu können, wurden die Eigenschaften des Optoboard-Testsystems (vgl. Kapitel 4) untersucht.

In Kapitel 5.1 wird die Qualität der optischen Ausgangssignale des Testsystems diskutiert. Es soll eine geeignete Methode ermittelt werden, um die optische Ausgangsleistung so zu justieren, dass im PIN-Dioden-Array eines angeschlossenen Optoboards ein vorgegebener Sollstrom erzeugt wird. Dazu kann die optische Leistung der VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser) der BPM-Karte durch den BPM-Wert (vgl. Kapitel 4.1.1) eingestellt oder durch den optischen Abschwächer reduziert werden.

Für den korrekten Empfang optischer Signale durch die DRX-Karte auf der Steuerkarte (z.B. zur Bitfehler-Schwellenmessung mit optischer Rückspeisung) müssen Empfangsschwellen (DRX-Wert, vgl. Kapitel 4.1.1) gesetzt werden. In Kapitel 5.2 wird ein Arbeitsdiagramm angegeben, aus dem für einen gegebenen PIN-Strom $I_{\text{PIN DRX}}$ im PIN-Dioden-Array der DRX-Karte ein passender DRX-Wert abgelesen werden kann.

Kapitel 5.3 befasst sich mit der Messung der Bitfehler-Schwellen. Die Messung der Bitfehler-Schwelle eines DORIC-Kanals erlaubt die Angabe eines minimalen PIN-Stroms, oberhalb dessen die Bitfehlerrate des DORIC-Kanals ausreichend klein für den Betrieb dieses Optoboards im ATLAS-Detektor ist.

Das abschliessende Kapitel 5.4.2 behandelt die Messungen an den VCSEL-Signalen eines Optoboards.

5.1 Qualität der optischen Ausgangssignale des Testsystems

Mit dem Aufbau in Abbildung 5.1 wird die Qualität der Ausgangssignale des Testsystems (der optischen Signale am Ausgang des optischen Abschwächers) untersucht.

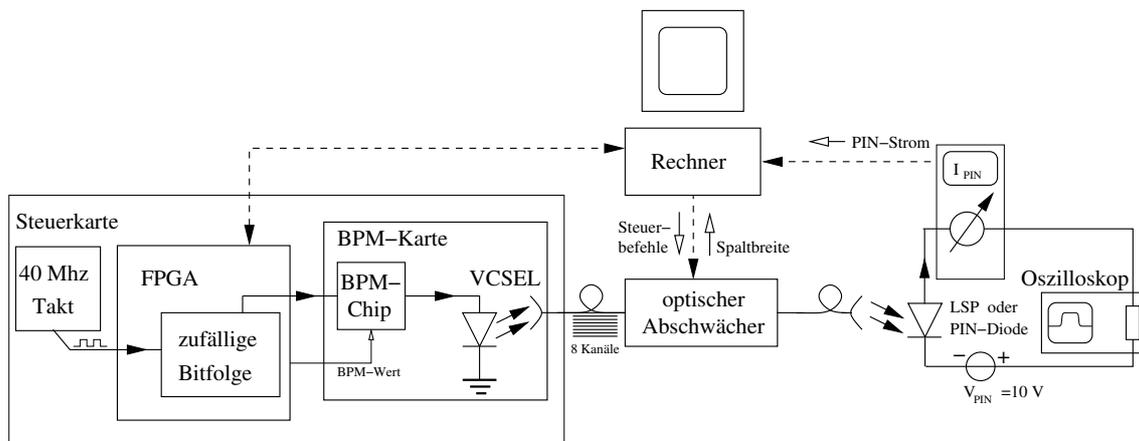


Abbildung 5.1: Aufbau zur Untersuchung der Ausgangssignale des Testsystems

Ein VCSEL einer BPM-Karte auf der Steuerkarte (siehe Kapitel 4.1.1) sendet BPM-kodiert eine zufällige Bitfolge. Diese Signale laufen durch den optischen Abschwächer, dessen Aus-

gang mit der großflächigen Photodiode (LSP) oder dem PIN-Dioden-Array der Messkarte VCSEL (siehe Kapitel 4.1.3) verbunden ist. Das verwendete Strommessgerät¹ misst den zeitlichen Mittelwert des PIN-Stroms I_{PIN} . Da die BPM-kodierten Ausgangssignale einen Duty-Cycle von 50 % mit minimaler Signalfrequenz von 20 MHz haben, ist der PIN-Strom (Amplitude) gleich dem Doppelten, des durch das Messgerät gemessenen Stroms. Angegebene PIN-Ströme sind im Folgenden stets als Signalamplituden zu verstehen. Das Strommessgerät kann die Signalamplitude mit einer Genauigkeit von $\pm 0.2 \mu\text{A}$ messen.

Durch das Steuerprogramm auf dem Rechner kann die Breite der zwei parallelen Spalte im optischen Abschwächer (vgl. Kapitel 4.1.2) eingestellt werden. Zusätzlich kann das Programm die aktuelle Spaltbreite bezüglich eines zuvor festgelegten Nullpunkts von der Steuerung des Schrittmotors auslesen.

5.1.1 Optische Ausgangsleistung des Testsystems

Die optische Ausgangsleistung des Testsystems wurde für vier verschiedene BPM-Karten als Sendeeinheit auf der Steuerkarte (siehe Abb. 5.1) mit Hilfe der großflächigen Photodiode (LSP) gemessen. Die Spalte des Abschwächers waren bei dieser Messung geschlossen, um die maximale Ausgangsleistung zu erhalten. Die folgenden Diagramme (Abb. 5.2) zeigen den gemessenen PIN-Strom aufgetragen gegen den BPM-Wert für zwei BPM-Karten. Diese sind als BPM 2 und BPM 3 gekennzeichnet. Das VCSEL-Array einer BPM-Karte hat acht Kanäle. Im Folgenden sind diese von 0 bis 7 durchnummeriert.

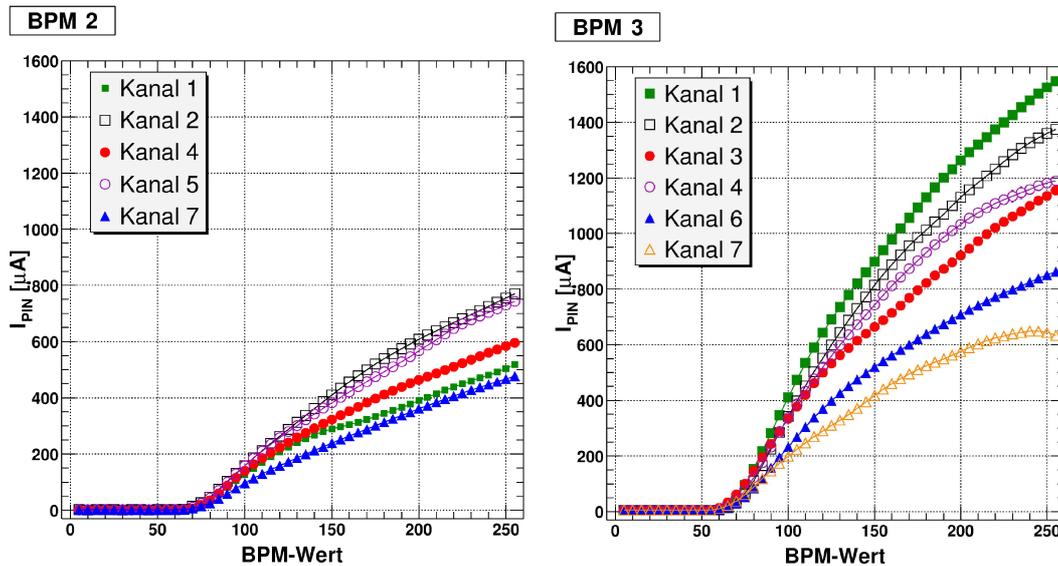


Abbildung 5.2: Optische Ausgangsleistung der BPM-Karten BPM 2 und BPM 3

Jeder Messpunkt entspricht dem Mittelwert von fünf Messungen. Die Standardabweichung ist als Fehler eingezeichnet, die Fehlerbalken sind jedoch von den eingetragenen Messpunkten überdeckt. Im Diagramm zur Karte BPM 2 sind die Kurven der Kanäle 0, 3 und 6 nicht aufgetragen, die entsprechenden Messkurven liegen zwischen den Kurven der Kanäle 2 und 7. Im Diagramm zur Karte BPM 3 sind die Kurven der Kanäle 0 und 5 nicht aufgetragen, diese überlagern sich mit der Kurve des Kanals 4. Der von den optischen Eingangssignalen

¹Voltcraft™M3860

in der LSP erzeugte PIN-Strom wurde mit Gleichung (4.3) (auf Seite 45) in einen entsprechenden PIN-Strom, den die gleichen optischen Signale in einer PIN-Diode auf einem Optoboard erzeugen würden, umgerechnet. Zur Ausführung der Qualitätsuntersuchungen müssen die optischen Eingangssignale in der PIN-Diode eines Optoboards $50 \mu\text{A}$, $100 \mu\text{A}$ und $1000 \mu\text{A}$ erzeugen (vgl. Tabelle 3.2).

Der BPM-Wert eines Kanals wurde von Null beginnend in Fünferschritten erhöht, wobei nach jedem Schritt der PIN-Strom der LSP erst dann gemessen wurde, nachdem dieser einen zeitlich konstanten Wert angenommen hatte. Die übrigen VCSEL blieben jeweils deaktiviert; diese Betriebsart entspricht derjenigen bei der Durchführung der Qualitätsmessungen an einem DORIC-Kanal. Die Messreihenfolge der Kanäle schloss die Beeinflussung der optischen Ausgangsleistung eines VCSEL des Arrays durch vorherigen Betrieb des Nachbarkanals aus.

Der Verlauf der gemessenen Kurven in Abbildung 5.2 ähnelnd der Kennlinie eines Halbleiterlasers (vgl. Abb. 2.8). Der BPM-Wert legt den Strom durch den VCSEL im Fall Logisch 1 fest. Der Schwellenstrom zum Laserbetrieb fließt durch den VCSEL bei einem BPM-Wert von etwa 70.

Die Standardabweichung ist für alle Messpunkte kleiner als 5 % des Mittelwerts. Innerhalb dieser Streuung ist das Ergebnis einer erneuten Messung reproduzierbar, falls der Messaufbau nicht verändert, d.h. die Umgebungstemperatur nicht wesentlich erhöht oder erniedrigt (d.h. Veränderung kleiner als $\pm 5^\circ\text{C}$), keine Faser ausgetauscht oder Faserkopplung gelöst, die Lage der Fasern nicht verändert und die erneute Messung direkt im Anschluss an die zu reproduzierende ausgeführt wird. Andernfalls ergeben erneute Messungen bis zu $\pm 20\%$ Abweichung von zuvor erhaltenen Ergebnissen (siehe auch [AR05]).

Der Grund für diese Abweichung liegt in der Veränderung des Messaufbaus. Beispielsweise werden die optischen Signale in einer Kopplung zweier Fasern durch eine MPO-Steckverbindung z.B. am Ausgang des optischen Abschwächers (vgl. Kapitel 4.1) geschwächt. Diese Abschwächung hat nach Lösen der Kopplung und späterer Wiederherstellung eine andere Größe, weil die Faserenden nicht exakt gleich platziert werden können. Zusätzlich zur Veränderung des Messaufbaus führen Veränderungen der Leistung der VCSEL, die z.B. von der Umgebungstemperatur beeinflusst wird, zu einer nicht genauer reproduzierbaren Messung des PIN-Stroms. Die in Abbildung 5.2 dargestellten Messkurven sollen zum Vergleich der maximal erreichbaren optischen Ausgangsleistung der BPM-Karten dienen.

Zur Ausführung der DORIC-Qualitätsmessungen wird die BPM-Karte BPM 3 verwendet. Abgesehen von den VCSEL-Kanälen 6 und 7 besitzen die VCSEL dieser Karte eine ausreichende Ausgangsleistung, um den maximal benötigten PIN-Strom von $1000 \mu\text{A}$ zu erzeugen. Ist die optische Ausgangsleistung zu gering, so werden die Messungen beim maximal erreichbaren PIN-Strom ausgeführt, in der Regel $I_{\text{PIN}} \geq 700 \mu\text{A}$.

Zur Bestimmung der Bitfehler-Schwellen wird die BPM-Karte BPM 2 verwendet. Die Ausgangsleistungen der VCSEL dieser Karte sind etwa gleich und geringer als die der BPM-Karte BPM 3. Zur Messung wird ein VCSEL mit einem BPM-Wert von 130 betrieben (s.u.). Durch die im Vergleich zu BPM-Karte BPM 3 geringere Ausgangsleistung ist ein kleinerer Spalt des optischen Abschwächers zur Reduktion des PIN-Stroms ausreichend. Für eine Messung der Bitfehler-Schwelle muss der PIN-Strom bis unter $10 \mu\text{A}$ reduziert werden.

Nach der Aktivierung eines VCSELs verändert sich die optische Ausgangsleistung nachdem sie einen stabilen Wert angenommen hat (nach etwa 10 – 20 s), zeitlich langsam genug, so dass mit dem optischen Abschwächer Sollwerte des PIN-Stroms mit einer Abweichung

von unter $\pm 10\%$ eingestellt und innerhalb dieser Abweichung zeitlich konstant gehalten werden können.

Die Ausgangsleistungen der VCSEL eines Arrays einer BPM-Karte verändern sich im Betrieb bei Variation der Raumtemperatur und werden vom Betriebsmodus der Nachbar-kanäle beeinflusst. Das Aktivieren oder Deaktivieren weiterer Kanäle des VCSEL-Arrays führt zu Leistungsschwankungen, die abhängig von der Größe der Spalte des optischen Abschwächers bis zu $\pm 30\%$ vom Ausgangswert betragen (siehe Kapitel 5.3.4).

5.1.2 Qualität abgeschwächter Signale

In Abbildung 5.3 wird die Pulsform eines 40 MHz-Taktsignals, das entspricht Logisch 1 BPM-kodiert, für sechs optische Leistungen bzw. PIN-Ströme dargestellt. Diese Pulsformen wurden durch das Oszilloskop² im Messaufbau in Abbildung 5.1 aufgenommen. Zum Empfang der optischen Signale wurde eine Diode des PIN-Dioden-Arrays verwendet.

Im Fall der sechs Pulsformen in Abbildung 5.3 (a) wurde die optische Leistung durch Setzen des BPM-Werts eingestellt. Die Spalte des optischen Abschwächers waren dabei geschlossen. Zur Aufnahme der in Abbildung 5.3 (b) dargestellten Pulsformen wurde das mit maximaler Ausgangsleistung des VCSELs (BPM-Wert 255) gesendete optische Signal mit dem optischen Abschwächer auf die gleichen sechs PIN-Ströme, wie sie im Fall der Pulsformen in Abbildung 5.3 (a) gemessen wurden, reduziert.

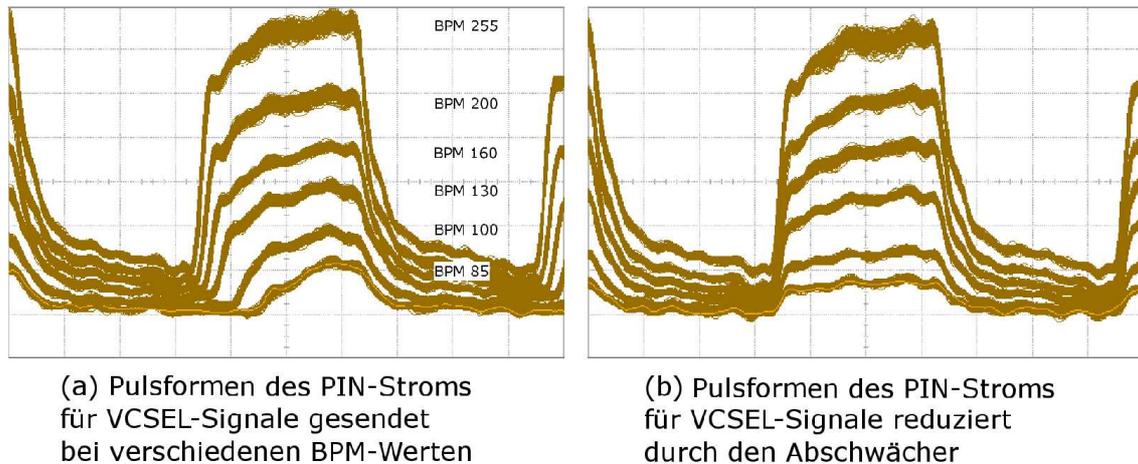


Abbildung 5.3: Leistungsreduktion durch Senkung des BPM-Werts oder durch den optischen Abschwächer

Die gemessenen PIN-Ströme, die zu den dargestellten Pulsformen gehören, sind in Tabelle 5.1 angegeben.

Wie in Abbildung 5.3 (a) ersichtlich, werden die Pulsflanken mit fallendem BPM-Wert flacher und der Duty-Cycle des Signals sinkt unter den Sollwert von 50 %. Die Dekodierung des Signals ist unter einem BPM-Wert von etwa 100 nicht mehr möglich.

Der Flankendetektor am Eingang der Dekodierlogik erzeugt Pulse zu den steigenden und zu den fallenden Flanken des Eingangssignals, wie in Kapitel 3.1.1 anhand der Abbildung 3.7 erläutert wurde. Liegt der Duty-Cycle des Eingangssignals deutlich unter 50 %, dann ist der zeitliche Abstand zwischen einem Puls, der zu einer steigenden Flanke des BPM-kodierten Signals gehören, nicht mehr passend zu dem, der zur direkt folgenden

²HP Infinium™54825A

BPM-Wert	$I_{\text{PIN}}[\mu\text{A}](\pm 5\%)$
255	1240
200	920
160	680
130	480
100	260
85	140

Tabelle 5.1: Gemessene PIN-Ströme zu den in Abbildung 5.3 dargestellten Pulsformen

fallenden Flanke gehört. Der falsche Abstand der Pulse führt dazu, dass Bitfehler bei der Rekonstruktion der Steuersignale auftreten und im Extremfall die Rekonstruktion des Taktsignals abreißt.

Wie die gemessenen PIN-Ströme in Tabelle 5.1 zeigen, müsste zum Erreichen der Sollströme $50\ \mu\text{A}$ bzw. $100\ \mu\text{A}$ ohne Reduktion der optischen Leistung durch den Abschwächer, der BPM-Wert 100 unterschritten werden. Wegen des Verlusts der Signalqualität ist die Reduktion der Sendeleistung durch die Senkung des BPM-Werts nicht geeignet.

Der Vergleich zwischen Abbildung 5.3 (a) und (b) zeigt, dass der optische Abschwächer die Signale unter Beibehaltung der Pulsform abschwächen kann.

Zur Durchführung der Qualitätsmessung wird der VCSEL der BPM-Karte stets mit konstantem BPM-Wert (BPM-Wert 255 für DORIC-Messprozeduren, BPM-Wert 130 für Bitfehler-Schwellenmessung) betrieben und die optische Leistung nur durch den optischen Abschwächer eingestellt.

5.1.3 Überstrahlen am optischen Abschwächer

Die Bestimmung der Bitfehler-Schwellen erfordert die Abschwächung der optischen Signale der BPM-Karte bis zu PIN-Strömen von $7\ \mu\text{A}$. Dazu müssen die parallelen Spalte des Abschwächers (siehe Kapitel 4.1.2) bis zu 1 mm geöffnet werden.

An einem einzelnen Spalt aus zwei MT8-Steckern kommt es für Spaltöffnungen, die größer als 1 mm sind, zum Überstrahlen [Prak], dessen Ursache schematisch in Abbildung 5.4 dargestellt ist.

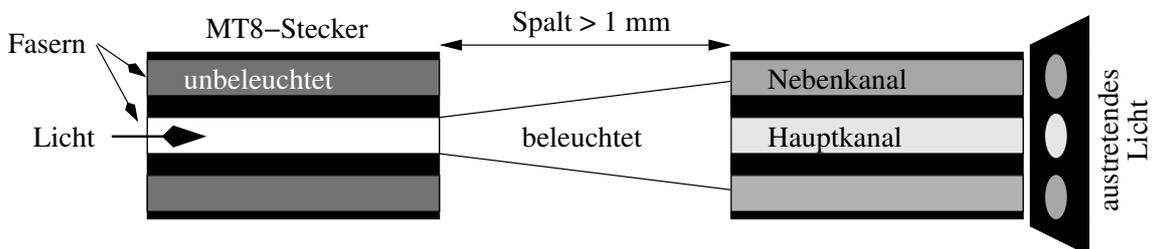


Abbildung 5.4: Überstrahlen an einem einfachen Spalt (schematisch)

Am Ende einer Faser auf der einen Seite des Spalts wird das Licht kegelförmig abgestrahlt. Im Idealfall beleuchtet dieser Lichtkegel nur die weiterführende Faser (Hauptkanal) auf der anderen Seite. Überstrahlen bedeutet, dass Licht neben der weiterführenden Faser (Hauptkanal) auch deren Nachbarn (Nebenchanal) beleuchtet. Dadurch führen hinter dem Spalt mehrere Fasern Licht.

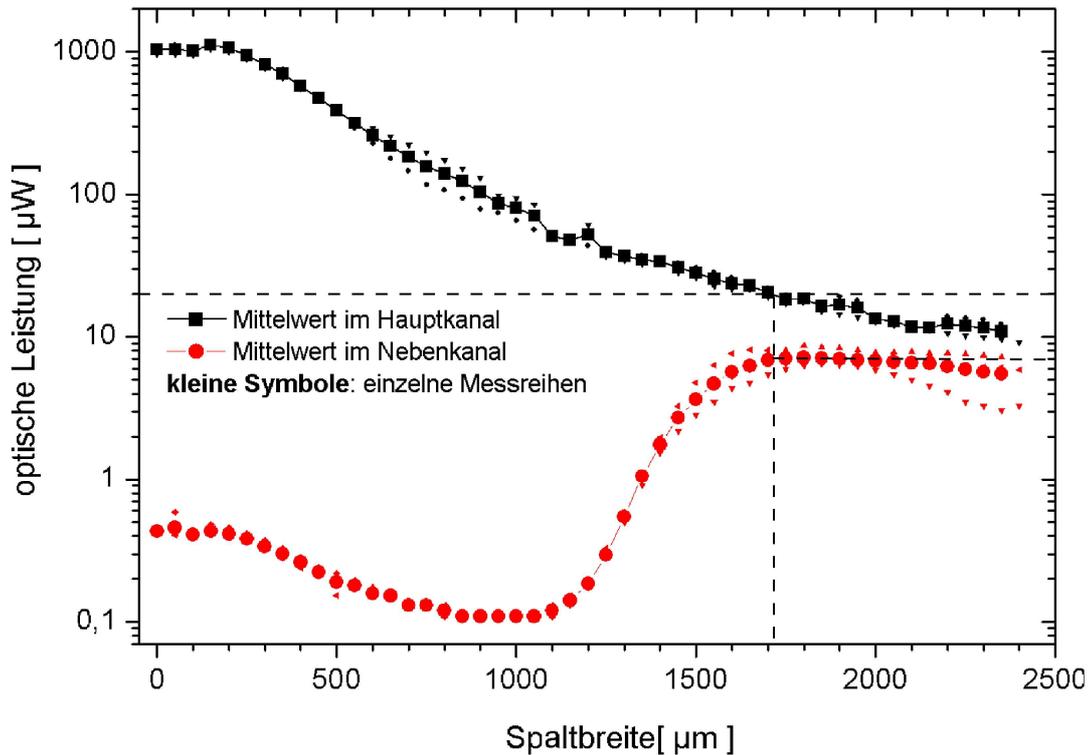


Abbildung 5.5: Gemessenes Überstrahlen am Einfachspalt (nach [Prak])

Das Diagramm in Abbildung 5.5 zeigt die optische Leistung im Haupt- und Nebkanal als Funktion der Breite eines einzelnen Spalts. Das Überstrahlen ist für Spaltbreiten unter 1 mm kleiner als 1% der optischen Leistung im Hauptkanal. Bei weiterer Öffnung des Spalts steigt das Überstrahlen bis auf 60% der optischen Leistung im Hauptkanal an [Prak].

Eine korrekte Bestimmung der Bitfehler-Schwellen mit nur einem Spalt als Abschwächer ist nicht möglich, weil nur der Gesamtstrom, der in allen sieben PIN-Dioden des PIN-Dioden-Arrays auf dem Optoboard erzeugt wird, gemessen werden kann. Durch das Überstrahlen ist dieser gegenüber dem PIN-Strom, der in der PIN-Diode fließt, dessen Bitfehler-Schwelle bestimmt werden soll, erhöht. Beträgt die optische Leistung im Hauptkanal z.B. etwa $20 \mu\text{W}$, was einem PIN-Strom von etwa $10 \mu\text{A}$ entspricht, fließen im Nebkanal etwa $3,5 \mu\text{A}$ und der gemessene PIN-Strom (zwei Nebkanäle) würde etwa $17 \mu\text{A}$ betragen.

Im optischen Abschwächer befinden sich zwei Spalte gleicher Breite (siehe Abb. 4.6). Die zur Einstellung eines bestimmten Abschwächungsfaktors benötigte Breite der beiden Spalte ist kleiner als die entsprechende Breite eines einzelnen Spalts. Damit kann das Überstrahlen reduziert werden. Mit dem Aufbau in Abbildung 5.1 wurde der optische Abschwächer auf Überstrahlen untersucht.

Dafür sendet BPM-Karte (BPM 3) auf einem VCSEL-Kanal optische Signale mit maximaler Leistung (BPM-Wert 255). Der Strom, den diese Signale in jeder einzelnen Diode des PIN-Dioden-Arrays der Messkarte VCSEL erzeugen, kann als Funktion der Spaltbreite gemessen werden. Dabei erlaubt die Messkarte VCSEL die Messung des PIN-Stroms einer Diode, auch wenn die übrigen Kanäle optische Signale empfangen (vgl. Kapitel 4.1.2).

Das Diagramm in Abbildung 5.6 zeigt den gemessenen PIN-Strom in der durch den Haupt-

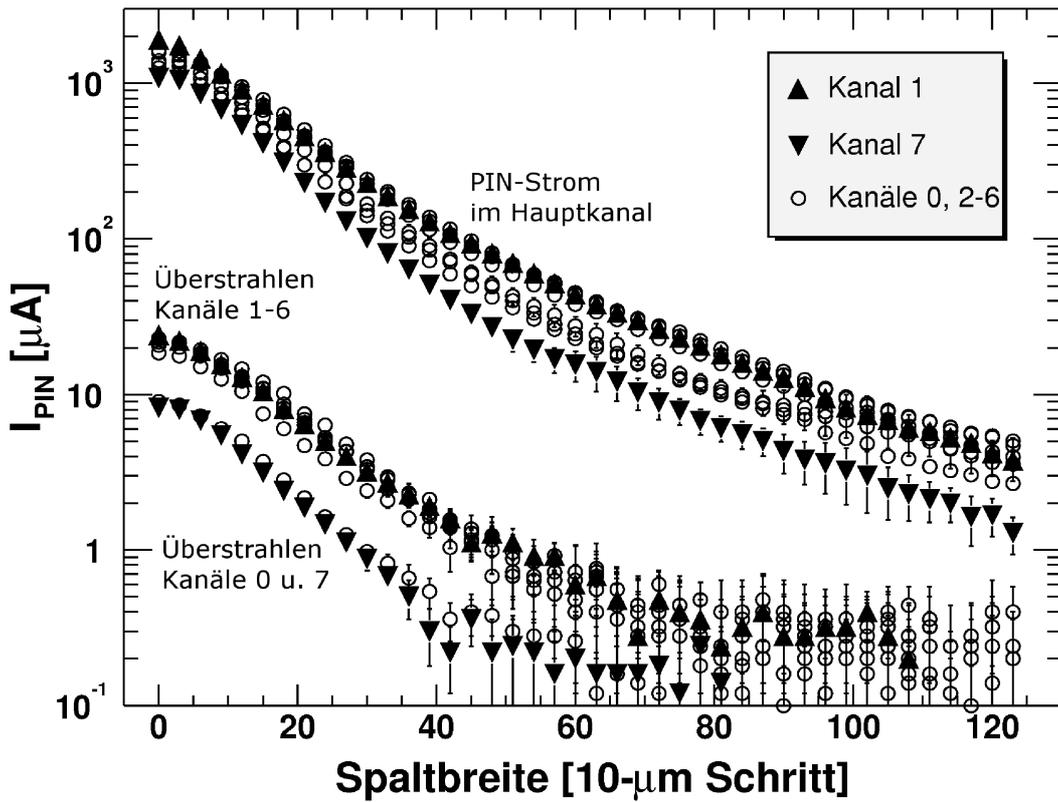


Abbildung 5.6: Überstrahlen am Abschwächer mit zwei Spalten

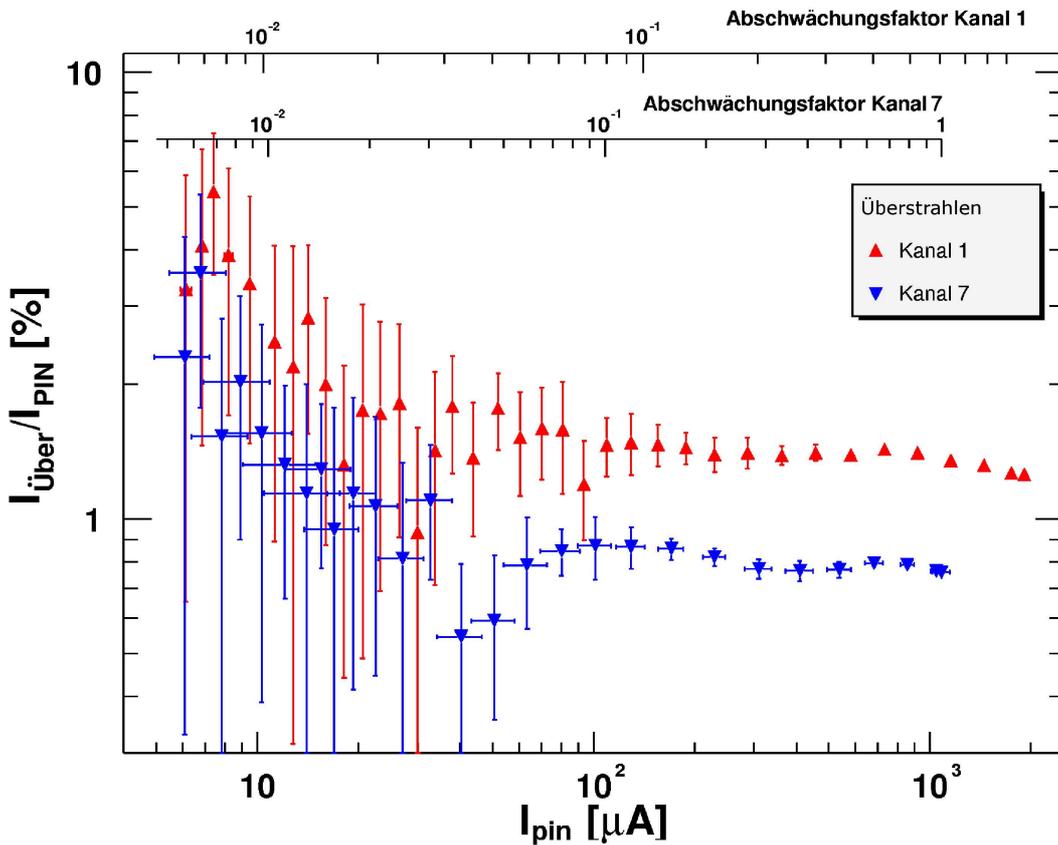


Abbildung 5.7: Relatives Überstrahlen gegen I_{PIN} (Kanäle 1 und 7)

kanal beleuchteten PIN-Diode aufgetragen gegen die Breite der beiden Spalte. Der Schrittmotor des linearen Tisches vergrößert die Breite der Spalte in Einzelschritten von $10\ \mu\text{m}$. Der PIN-Strom, der in den beiden direkten Nachbarkanälen entsteht, wird zu einem Gesamtstrom durch Überstrahlen $I_{\text{Über}}$ addiert, den die dargestellten Messkurven (Überstrahlen) zeigen. Die Kanäle 0 und 7 liegen am Rande des PIN-Dioden-Arrays und haben jeweils nur einen Nachbarkanal. Daher ist das Überstrahlen dieser beiden Kanäle um einen Faktor 2 kleiner als bei einem Kanal in der Mitte des Arrays. Jede der dargestellten Messkurven (PIN-Strom im Hauptkanal und Überstrahlen) resultiert aus den Mittelwerten und der Standardabweichung von fünfmaliger Messung. Nach jeder Einzelmessung wurden die Spalte des Abschwächers wieder geschlossen und die Messprozedur erneut ausgeführt.

Der gemessene Gesamtstrom, den das Überstrahlen erzeugt, ist für Spaltbreiten über $800\ \mu\text{m}$ kleiner als $0.4\ \mu\text{A}$. Aufgrund der Auflösung des Messgeräts von $\pm 0.2\ \mu\text{A}$, kann dieser Strom nicht korrekt gemessen werden. Die eingetragenen Messpunkte resultieren in diesem Bereich aus dem Rauschen des Messgeräts und sind mit einem Verschwinden des Überstrahlens verträglich.

Bei kleinen Spaltbreiten steigen die gemessenen Ströme, die in den PIN-Dioden der Nachbarkanäle erzeugt werden, bis zu $20\ \mu\text{A}$ an. Wegen der kleinen Spaltbreite kann dieser Anstieg nicht durch Überstrahlen im beschriebenen Sinne entstehen. Mit Hilfe zweier spezieller Faserbänder mit acht Kanälen, bei denen ein Ende mit einem MT8-Stecker abgeschlossen ist und am anderen Ende jede Faser einen separaten speziellen Abschlussstecker (Straight Tip, ST, siehe [Cil02]) besitzt, kann die Ursache des Überstrahlens bei geschlossenen Spalten lokalisiert werden.

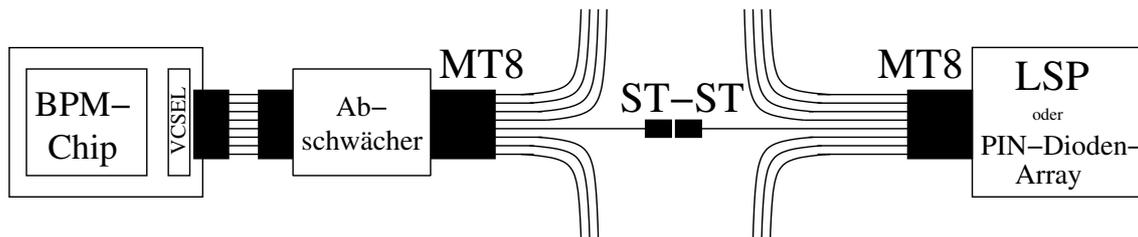


Abbildung 5.8: Aufbau zur Lokalisierung der Ursache des Überstrahlens bei kleinen Spaltbreiten (schematisch)

Mit dem Aufbau in Abbildung 5.8 wurden zwei Messungen vorgenommen. Verbindet man über die ST-ST Stecker einen Nachbarkanal eines aktivierten VCSELs der BPM-Karte mit der großflächigen Photodiode (LSP), so fließt kein Photostrom, d.h. der Nachbarkanal führt kein Licht. Somit kann das Überstrahlen weder an der BPM-Karte noch im optischen Abschwächer (bei geschlossenen Spalten) entstehen. Strahlt eine lichtführende Faser über die ST-ST Verbindung auf eine PIN-Diode des PIN-Dioden-Arrays, so fließt in den Nachbarkanälen jeweils ein Strom, der ca. 1% der Stärke des Stroms in der beleuchteten Diode hat. Das bedeutet, dieses Überstrahlen entsteht am PIN-Dioden-Array.

Dieses hat zwei mögliche Erklärungen.

- Das Silizium der PIN-Diode ist mit einem lichtdurchlässigen Kunststoff überzogen, der es vor Beschädigung schützt. Dadurch wird verhindert, dass ein Faserende des aufgesetzten MT8-Steckers direkt auf der Diode aufliegt. Dieser Spalt könnte das 1%-ige Überstrahlen verursachen.
- Die Depletionsspannung liegt, wie durch Abbildung 4.12 verdeutlicht, an den Dioden an. Liegt zwischen den Dioden ein endlicher elektrischer Widerstand, so fließt durch

das Messgerät auch ein Bruchteil des Stroms, der in den benachbarten Dioden einer angeschlossenen Diode erzeugt wird.

Der im Diagramm in Abbildung 5.6 eingetragene Nullpunkt, bei dem beide Spalte geschlossen sind, ist nicht dauerhaft gespeichert. Der Austausch der Fasern und das Abschalten der Versorgungsspannung der Steuerung des linearen Tisches³ hat mehrere Neubestimmungen des Nullpunkts nötig gemacht. Zur Einstellung eines Sollwerts des PIN-Stroms verwenden die Steuerprogramme daher und wegen der nicht konstanten Leistung der VCSEL der BPM-Karte nicht die gemessenen Kurven. Das Steuerprogramm vergleicht den aktuellen PIN-Strom mit dem Sollwert und verändert entsprechend die Spaltbreite in 10 μm -Schritten, d.h. der Sollwert wird iterativ erreicht.

Für die Kanäle 1 und 7 zeigt das Diagramm in Abbildung 5.7 die gemessene relative Stromstärke durch Überstrahlen $I_{\text{Über}}$ aufgetragen gegen den PIN-Strom im Hauptkanal. Dabei ist Kanal 7 ein Kanal am Rand des Arrays und hat nur einen Nachbarkanal.

Für die Ausführung von DORIC-Qualitätsuntersuchungen (vgl. Tabelle 3.2) ($I_{\text{PIN}} = 1000 \mu\text{A}$, $100 \mu\text{A}$ und $50 \mu\text{A}$) ist die erwartete Fehlanpassung durch Überstrahlen kleiner als 2%. Diese kann vernachlässigt werden, da hierfür eine Abweichung von bis zu 10% vom Sollwert akzeptabel ist.

Für die Bestimmung der Bitfehler-Schwellen müssen PIN-Ströme bis minimal $7 \mu\text{A}$ eingestellt werden. Diese Messung kann mit reduzierter optischer Ausgangsleistung bei einem BPM-Wert von 130 durchgeführt werden (s.u.). Für Untersuchungen zur Systematik und Messungen der Bitfehler-Schwellen (s.u.) wurde die BPM-Karte BPM 2 verwendet. Die optischen Signale eines VCSELS dieser Karte erzeugen für einen BPM-Wert von 130 einen PIN-Strom von $(200 \pm 100) \mu\text{A}$ (siehe Abb. 5.2). Die Reduktion dieses Stroms auf $7 \mu\text{A}$ für eine Bitfehler-Schwellenmessung entspricht einer Abschwächung um etwa den Faktor 0.03. Im Diagramm in Abbildung 5.7 (oben) sind zusätzlich Achsen des Abschwächungsfaktor beider Kanäle eingezeichnet. Für den Faktor 0.03 liegt das Überstrahlen unter 3%.

Die eingezeichneten Fehlerbalken $\Delta \frac{I_{\text{Über}}}{I_{\text{PIN}}}$ werden für $I_{\text{PIN}} < 40 \mu\text{A}$ stetig größer (bis zu 2%). Der zugehörige PIN-Strom des Überstrahlens in einem Nachbarkanal beträgt dann $0.4 \mu\text{A}$, was 1% von I_{PIN} entspricht (vgl. die Messkurve von Kanal 7). Aufgrund der begrenzten Messgenauigkeit des Strommessgeräts (minimal $0.2 \mu\text{A}$) kann dieser Strom nicht gemessen werden. Das digitale Messgerät misst in diesem Bereich $0.4 \mu\text{A}$, $0.2 \mu\text{A}$, $0 \mu\text{A}$ oder sogar einen negativen Strom von $-0.2 \mu\text{A}$. Daher wird die Standardabweichung der fünfmaligen Messung stetig größer. Gleichzeitig wird auch der Normierungsfaktor $\frac{1}{I_{\text{PIN}}}$ größer. Beides verursacht das Anwachsen von $\Delta \frac{I_{\text{Über}}}{I_{\text{PIN}}}$.

5.2 Empfangsschwellen der DRX-Empfangseinheit

Für den korrekten Empfang optischer Signale durch die Empfangseinheit (DRX-Karte) der Steuerkarte muss die Empfangsschwelle, die durch den DRX-Wert bestimmt wird, für jeden Empfangskanal korrekt gesetzt werden (vgl. Kapitel 4.1.1).

In Abbildung 5.9 ist schematisch die Pulsform des PIN-Stroms $I_{\text{PIN DRX}}$ in einer PIN-Diode der DRX-Karte dargestellt, der fließt, wenn z.B. der VCSEL eines Optoboards dieser PIN-Diode optische Signale sendet.

Wie an der Pulsform verdeutlicht, interpretiert der DRX-Chip die Eingangssignale nur dann korrekt, wenn die Empfangsschwelle innerhalb eines zulässigen Bereichs liegt. Dieser Bereich hängt von der Größe des PIN-Stroms $I_{\text{PIN DRX}}$ ab.

³Mercury™DC Motor Controller

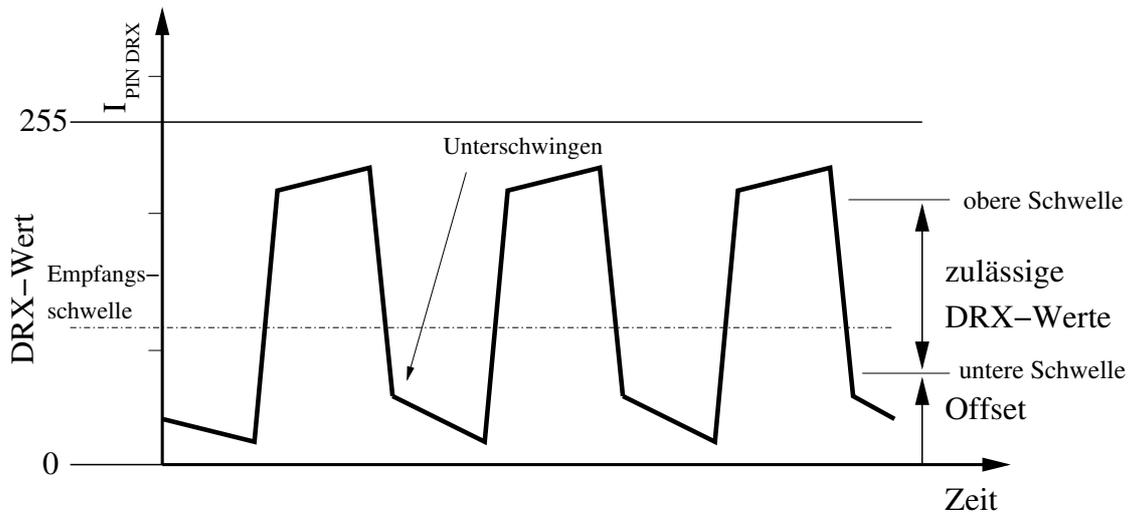


Abbildung 5.9: Empfangsschwellen eines DRX-Kanals (schematisch)

Die Pulsform des PIN-Stroms zeigt ein Unterschwingen, wie in Kapitel 5.4.2 erläutert wird. Zusätzlich dazu führt der Betrieb der VCSEL mit einem Dunkelstrom von 1 mA (vgl. Kapitel 3.1.2) zu einer Lichtleistung im Fall Logisch 0 und einem Dunkelstrom im PIN-Dioden-Array der DRX-Karte.

Für den korrekten Empfang der Signale, muss die Empfangsschwelle oberhalb eines Offsets liegen, damit sie nicht in den Bereich des Unterschwingens der fallenden Flanke fällt (untere Schwelle). Zusätzlich muss die Empfangsschwelle unterhalb der maximalen Signalamplitude (obere Schwelle) liegen. Die obere Schwelle entfällt, wenn das Niveau Logisch 1 bei einem größeren PIN-Strom über der durch den DRX-Wert 255 gesetzten oberen Empfangsschwelle liegt.

Der Messaufbau zur Bestimmung der zulässigen DRX-Werte für einen gegebenen PIN-Strom ist in Abbildung 5.10 schematisch dargestellt. Dieser ist analog zu dem der optischen Bitfehler-Schwellenmessung in Abbildung 4.16, jedoch schwächt der optische Abschwächer die vom Optoboard zur Steuerkarte zurückgespeisten Signale ab, was die Abschwächung der optischen Signale durch eine lange optische Verbindung simuliert.

Abbildung 5.11 verdeutlicht das Prinzip der Rückspeisung. Alle VCSEL der BPM-Karte sind aktiviert. Auf sechs Kanälen senden diese BPM-kodiert Logisch 0 und auf einem Kanal zufällige Signale. Nach der Dekodierung durch die DORICs und der Rückspeisung dieser Signale über die Mischkarte, liegen an den VDCs des Optoboards auf sechs Kanälen als Eingangssignal Logisch 0 und auf einem Kanal die zufälligen Signale an. Dadurch wird sichergestellt, dass nur genau ein VCSEL des VCSEL-Arrays auf dem Optoboard optische Signale sendet, die übrigen VCSEL sind deaktiviert. Nur eine PIN-Diode auf der DRX-Karte empfängt optische Signale und der Gesamtstrom $I_{PIN\ DRX}$ wird nur in dieser Diode des PIN-Dioden-Arrays der DRX-Karte erzeugt.

Bei festgehaltener optischer Ausgangsleistung des VCSELs auf dem Optoboard, d.h. der Strom I_{set} (vgl. Kapitel 3.1.2) bleibt unverändert, wird der PIN-Strom $I_{PIN\ DRX}$ durch den optischen Abschwächer auf einen Sollwert eingestellt. Der DRX-Wert dieses Kanals wird von 0 beginnend in Fünferschritten erhöht. Zwischen diesen Schritten wird eine Bitfehler-Zählung (über $34 \cdot 10^6$ Bits) vorgenommen. Werden die Signale von der DRX-Karte korrekt empfangen, treten keine Bitfehler auf und der DRX-Wert ist zulässig. Durch diese schrittweise Erhöhung werden der minimale DRX-Wert (untere Schwelle) und der maximale

DRX-Wert (obere Schwelle) für gegebenen $I_{\text{PIN DRX}}$ ermittelt. Diese Prozedur wird nach jeder Erhöhung des Stroms $I_{\text{PIN DRX}}$ um $50 \mu\text{A}$ bis zum maximal erreichbaren Strom bei geschlossenen Spalten des optischen Abschwächers durchgeführt. Das Diagramm in Abbildung 5.12 zeigt für zwei Kanäle einer DRX-Karte (DRX 1) die gemessenen unteren und oberen DRX-Schwellen. Das Optoboard BeO2042 wurde dabei zur Signalarückspeisung verwendet. Wird eine optische Bitfehler-Schwellenmessung (Aufbau gem. Abb. 4.16) durchgeführt, kann durch den Strom I_{set} die optische Leistung der VCSEL angepasst werden, damit der Strom $I_{\text{PIN DRX}}$ eine geeignete Größe hat, um einen zulässigen DRX-Wert zu setzen.

Um zu überprüfen, dass die Reduktion von I_{set} die optische Signalqualität der VCSEL nicht so verändert, dass der Bereich zulässiger DRX-Werte kleiner wird, wurde die Messung für verschiedene Ströme $I_{\text{set}} = 1.1 \mu\text{A}$ (entspricht $0.55 \mu\text{A}$ pro VDC) und $I_{\text{set}} = 0.6 \mu\text{A}$ (entspricht $0.3 \mu\text{A}$ pro VDC) vorgenommen. Im Fall des niedrigeren I_{set} ist die optische Ausgangsleistung der VCSEL um etwa einen Faktor 0.5 reduziert, daher enden die zugehörigen Kurven (untere Schwellen in Abb. 5.12) bei niedrigerem $I_{\text{PIN DRX}}$.

Für Kanal 6 im Diagramm in Abbildung 5.12 liegen die unteren Schwellen zulässiger DRX-Werte, die mit $I_{\text{set}} = 0.6 \mu\text{A}$ gemessen wurden, bis zu 45 Einheiten über den entsprechenden Werten, die mit $I_{\text{set}} = 1.1 \mu\text{A}$ gemessen wurden. Für Kanal 2 liefern beide Messungen den gleichen Verlauf.

Arbeitsdiagramm

Die gemessenen unteren und oberen Schwellen aller Kanäle einer DRX-Karte können in einem Arbeitsdiagramm, wie es in Abbildung 5.13 gezeigt wird, zusammengefasst werden. Aus dem Arbeitsdiagramm können Wertepaare des PIN-Stroms $I_{\text{PIN DRX}}$ und passendem DRX-Wert abgelesen werden, die korrekten Empfang optischer Signale durch die DRX-Karte ermöglichen. Das dargestellte Diagramm beinhaltet die zwei Messungen mit den Strömen $I_{\text{set}} = 1.1 \text{ mA}$ und $I_{\text{set}} = 0.6 \text{ mA}$.

Für den Strom $I_{\text{set}} = 1.1 \text{ mA}$ ist in dem durch die dunkelgraue Fläche abgedeckten Bereich des Arbeitsdiagramms die Empfangsschwelle mindestens eines Kanals der DRX-Karte nicht korrekt gesetzt. Die zugehörigen Wertepaare, $I_{\text{PIN DRX}}$ und DRX-Wert, ermöglichen keinen korrekten Empfang der Signale. Mit Wertepaaren $I_{\text{PIN DRX}}$ und DRX-Wert aus den grauen und weißen Bereichen des Diagramms wurden die zurückgespeisten Signale korrekt empfangen.

Für den Strom $I_{\text{PIN DRX}} = 750 \mu\text{A}$ tritt eine obere Schwelle auf ($I_{\text{PIN DRX}} = 750 \mu\text{A}$ und DRX-Wert 250). Wie die schematische Darstellung in Abbildung 5.9 und das Arbeitsdiagramm verdeutlichen, sollte für $I_{\text{PIN DRX}} \geq 400 \mu\text{A}$ die obere Schwelle entfallen. Das Niveau Logisch 1 liegt dann über der durch den DRX-Wert 255 gesetzten Empfangsschwelle. Die Ursache für das Auftreten der oberen Schwelle für $I_{\text{PIN DRX}} = 750 \mu\text{A}$ konnte nicht geklärt werden. Da die Breite des Bereichs zulässiger DRX-Werte für $I_{\text{PIN DRX}} \geq 750 \mu\text{A}$ kleiner als 80 wird, sollte $I_{\text{PIN DRX}}$ unter diesem Wert gehalten werden.

Die Reduktion des Stroms I_{set} kann, wie im Fall des Kanals 6 (s.o.), zu einem Anstieg der unteren Schwelle führen, da in Einzelfällen die Qualität der Signale der VCSEL abnimmt. Im Arbeitsdiagramm (Abb. 5.13) sind die Bereiche hellgrau unterlegt, für die mit $I_{\text{set}} = 0.6 \mu\text{A}$ zusätzlich zu den schwarz eingetragenen Bereichen unzulässige Werte ermittelt wurden. Wertepaare aus den weißen Bereichen ermöglichen auch mit dem reduzierten I_{set} einen korrekten Empfang.

DRX 1 | BeO2042

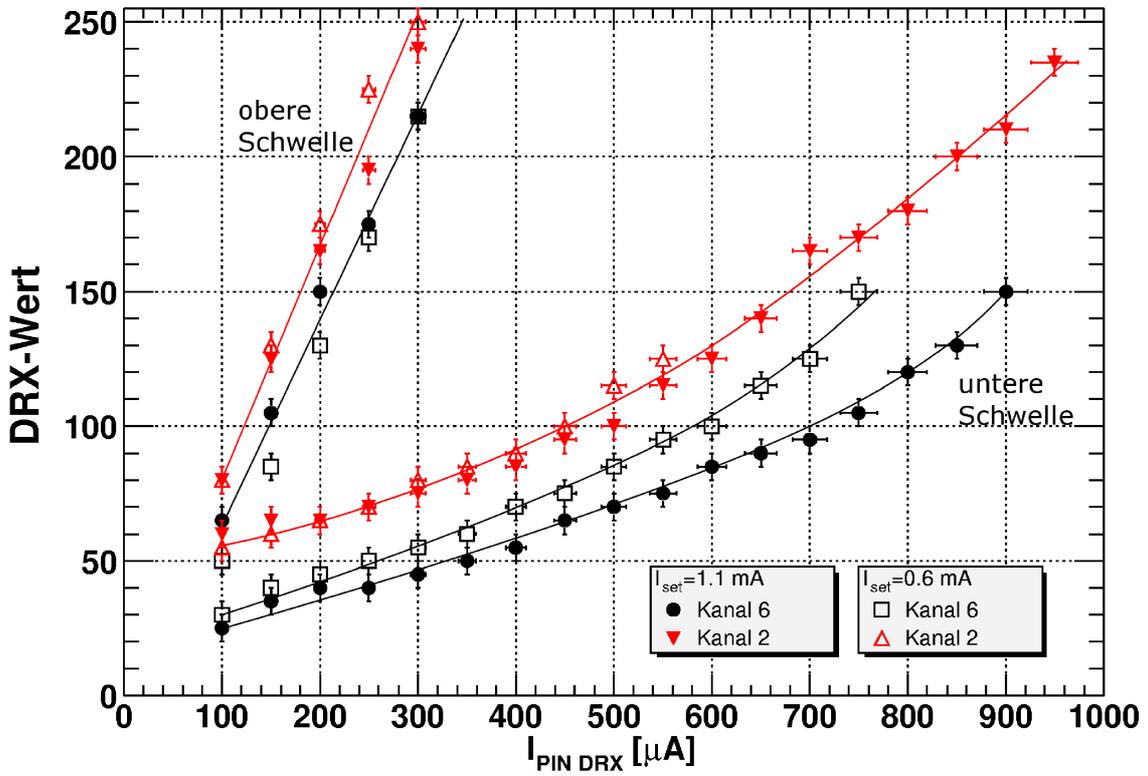


Abbildung 5.12: Obere und untere Schwellen zulässiger DRX-Werte aufgetragen gegen $I_{PIN\ DRX}$

DRX 1 | BeO2042

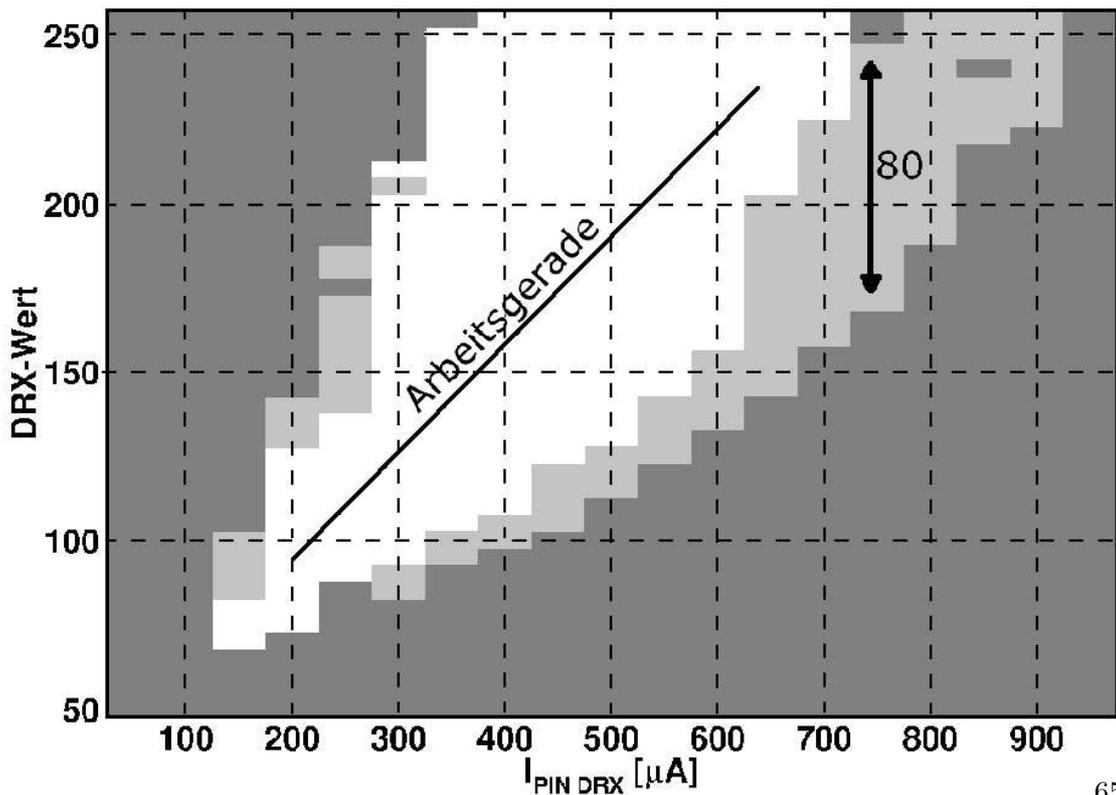


Abbildung 5.13: Arbeitsdiagramm der DRX-Karte DRX 1

Die eingezeichnete Arbeitsgerade

$$\text{DRX} \approx 0.32 \cdot \frac{I_{\text{PIN DRX}}}{\mu\text{A}} + 30 \quad 200 \mu\text{A} \leq I_{\text{PIN DRX}} \leq 700 \mu\text{A} \quad (5.1)$$

dient als Richtwert, um zu gegebenem $I_{\text{PIN DRX}}$ einen geeigneten DRX-Wert ermitteln zu können.

Zur Durchführung einer optischen Bitfehler-Schwellenmessung ist es unpraktisch, für jeden Kanal einer DRX-Karte den DRX-Wert einzeln zu setzen. Mit einem Unterprogramm der Steuersoftware der Testkarte ("Set_DRX.vi", vgl. Anhang C.1) kann der DRX-Wert aller Kanäle auf den gleichen Wert festgelegt werden.

Voraussetzung für den korrekten Empfang mit allen Kanälen der DRX-Karte ist, dass alle VCSEL des Optoboards, dessen Signale empfangen werden sollen, etwa eine gleiche Ausgangsleistung haben. Während alle VCSEL des Optoboards eine zufällige Bitfolge senden, kann die optische Leistung mit dem Strom I_{set} so eingestellt werden, dass ein Gesamt-PIN-Strom von z.B. 3.5 mA auf der DRX-Karte fließt. Dazu trägt jede PIN-Diode etwa 500 μA bei und für den korrekten Empfang ist ein einheitlicher DRX-Wert von 190 für alle Kanäle geeignet. Ist die Streuung der Leistung der VCSEL des Arrays zu groß für eine einheitliche Vorgabe des DRX-Werts, so kann für jeden Kanal einzeln ein DRX-Wert gesetzt werden.

Diese Untersuchung wurde für zwei weitere DRX-Karten (DRX 2 und DRX 3) durchgeführt. Die Vorgabe des DRX-Werts durch die Geradengleichung (5.1) ist auch für diese Karten zulässig, die entsprechenden Arbeitsdiagramme stimmen qualitativ mit dem in Abbildung 5.13 überein. Die Erhöhung der Depletionsspannung des PIN-Dioden-Arrays der DRX-Karte von 10 V auf 20 V führt zu keiner wesentlichen Vergrößerung des Arbeitsbereichs.

5.3 Systematik der Bitfehler-Schwellenmessung

5.3.1 Anstieg der Bitfehlerrate im Bereich der Bitfehler-Schwelle

Sinkt der PIN-Strom I_{PIN} , der in einen DORIC-Kanal fließt, in den Bereich der Bitfehler-Schwelle (d.h. der PIN-Strom wird kleiner als 2 μA über der Bitfehler-Schwelle), steigt die Bitfehlerzahl der Dekodierung exponentiell an. Im folgenden Diagramm (Abb. 5.14) ist die Bitfehlerzahl gegen I_{PIN} für die DORIC-Kanäle des Optoboards BeO2097 dargestellt. Eine entsprechende Messung wurde mit BeO3093 vorgenommen.

Diese Messung wurde mit dem Aufbau einer elektrischen Bitfehler-Schwellenmessung, wie er schematisch in Abbildung 4.15 dargestellt ist, durchgeführt. Jeder Messpunkt entspricht einer Überprüfung von 10^{10} Bits (das entspricht 300 langen Bitfehler-Zählungen, vgl. Kapitel 4.2.2).

Der korrekte Betrieb aller DORIC-Kanäle wurde bei $I_{\text{PIN}} = 20 \mu\text{A}$ und $15 \mu\text{A}$ überprüft, wobei keine Bitfehler registriert wurden. Weitere Messpunkte wurden im Bereich der zuvor gemessenen Bitfehler-Schwellen genommen und zwar bei 1.6 μA über der gemessenen Bitfehler-Schwelle beginnend und in Schritten von 0.4 μA abnehmend.

Nachdem der PIN-Strom mit dem optischen Abschwächer auf einen Sollwert im Bereich von $I_{\text{PIN}} = 10 \mu\text{A}$ einstellt wurde, schwankt die Stromstärke um diesen Wert mit etwa $\pm 0.4 \frac{\mu\text{A}}{\text{s}}$. Diese Schwankungen haben ihre Ursache in Leistungsschwankungen der VCSEL der BPM-Karte. Der optische Abschwächer kann den PIN-Strom nicht stabil halten, da er nicht ausreichend präzise und schnell genug die Breite der Spalte regulieren kann.

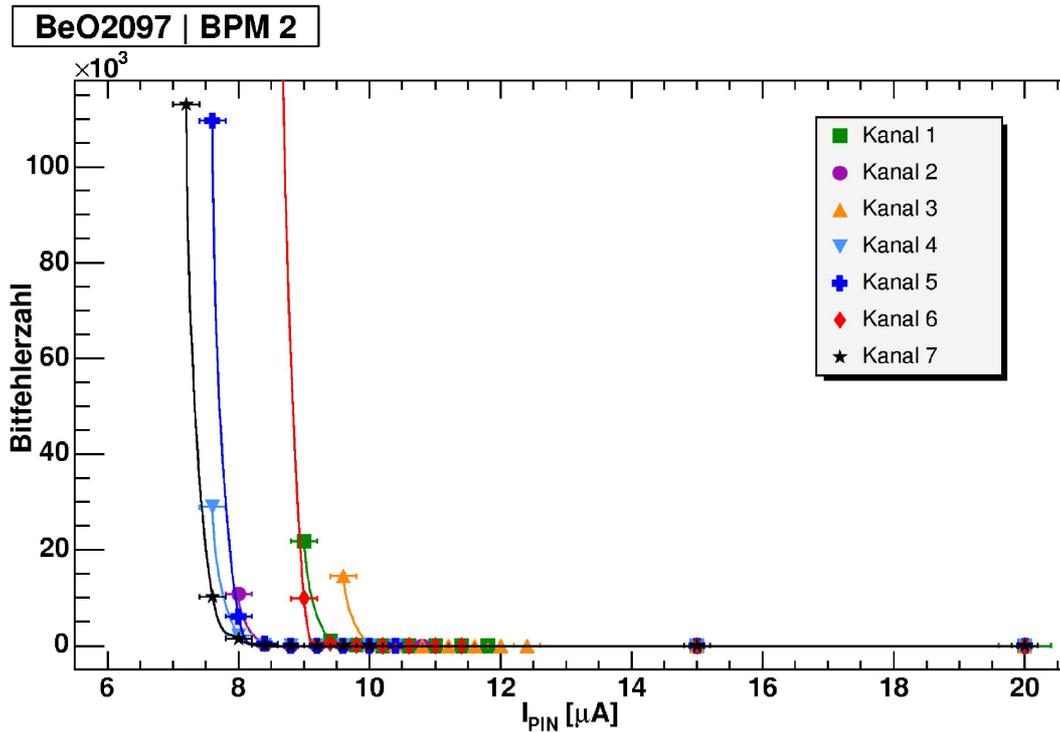


Abbildung 5.14: Anstieg der Bitfehlerzahl bei Abfall des PIN-Stroms

Um die Instabilität des PIN-Stroms teilweise zu kompensieren, wird eine einzelne, 1 s lang dauernde Bitfehler-Zählung nur dann ausgeführt, wenn der Messwert des PIN-Stroms eine maximale Abweichung von $\pm 0.2 \mu\text{A}$ vom Sollwert hat. Zusammen mit der Messungenauigkeit des Strommessgeräts kann einem PIN-Strom dann mit einem Fehler von $\pm 0.3 \mu\text{A}$ eine Fehlerrate zugeordnet werden. Diese Abweichung ergibt sich aus der quadratischen Addition des Messfehlers des Strommessgeräts von $\pm 2 \mu\text{A}$ mit der oben diskutierten Instabilität des PIN-Stroms von $\pm 2 \mu\text{A}$.

Im dem Diagramm in Abbildung 5.15 sind die gemessenen Bitfehlerraten für PIN-Ströme im Bereich der zuvor gemessenen Bitfehler-Schwellen für zwei Kanäle der Optoboards BeO2097 und BeO3093 dargestellt. Die nicht eingezeichneten weiteren zwölf untersuchten Kanäle der beiden Optoboards lieferten ein qualitativ gleichwertiges Ergebnis.

Wird bei der Überprüfung von 10^{10} Bits kein Bitfehler gezählt, liegt die Bitfehlerzahl mit 80 % Konfidenzniveau unter $1.84 [\text{Reg}]^4$ und die Bitfehlerrate unter $1.84 \cdot 10^{-10}$ (gestrichelte Linie im Diagramm in Abb. 5.15). Für beide Kanäle ist zusätzlich jeweils der Messpunkt eingetragen, für den zuletzt vor weiterer Senkung des Stroms I_{PIN} kein Bitfehler gezählt wurde (Messpunkte mit 0 Bitfehlern). Alle Bitfehlerzählungen für größere I_{PIN} ergaben ebenfalls keine Bitfehler.

Die gemessene Bitfehlerrate BER eines Kanals lässt sich approximieren durch

$$BER \approx 10^{-3.33 \cdot (I_{\text{PIN}} - I_{\text{Schwelle}}) [\mu\text{A}] + 6.5} \quad \text{für} \quad I_{\text{PIN}} < I_{\text{Schwelle}} + 1.6 \mu\text{A},$$

wobei I_{Schwelle} die gemessene Bitfehler-Schwelle ist.

Die durch die Messpunkte gelegten Ausgleichsgeraden erlauben eine Extrapolation zu kleineren Bitfehlerraten unter den Wert $1.84 \cdot 10^{-10}$, der durch die Überprüfung von 10^{10}

⁴Für Zählraten ≤ 50 sind in $[\text{Reg}]$ die Fehlergrenzen der Zählrate für ein 80 % Konfidenzniveau angegeben.

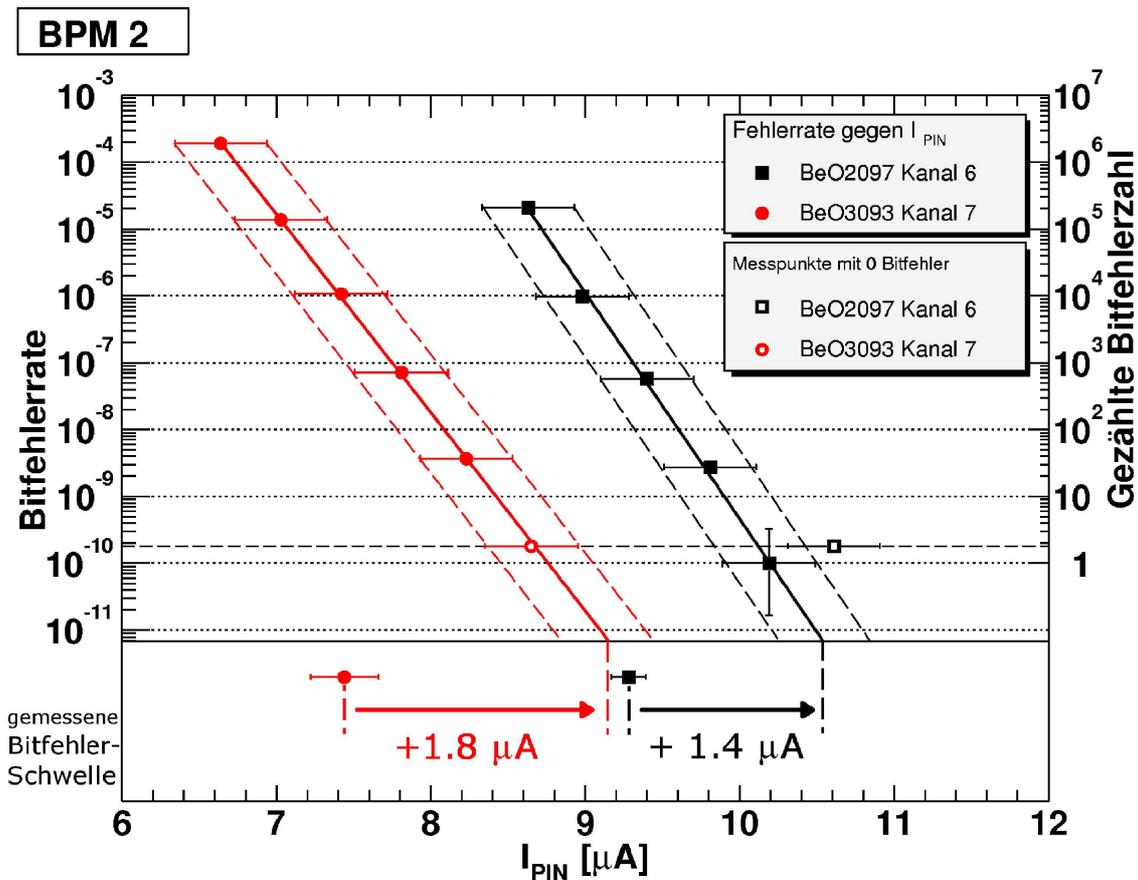


Abbildung 5.15: Bitfehlerrate und -zahl in der Umgebung der Bitfehler-Schwelle

Bits mit 80 %-Vertrauensniveau als maximaler Wert der ermittelt wurde. Eine Bitfehlerrate von $0.7 \cdot 10^{-12}$, als durchgezogene Linie in das Diagramm eingetragen, entspricht einem Bitfehler in einer Stunde Zähldauer.

Außerdem sind in das Diagramm die zuvor gemessenen Bitfehler-Schwellen (Mittelwert und Standardabweichung von jeweils fünf Einzelmessungen) eingezeichnet. Die Bitfehler-Schwelle wird von der Messprozedur bei einer Bitfehlerrate von 10^{-6} bestimmt. Für den Betrieb eines Optoboard-Kanals mit einer Bitfehlerrate unter einem Fehler pro 60 Minuten Betrieb muss der PIN-Strom mindestens $2 \mu A$ über der gemessenen Bitfehler-Schwelle liegen.

Im Betrieb des ATLAS-Detektors wird der PIN-Strom $100 \mu A$ betragen [MiZio]. Die Bitfehlerrate der DORIC-Kanäle eines korrekt arbeitenden Optoboards liegt bei diesem PIN-Strom im Labor unterhalb 10^{-10} . Wird das Optoboard bestrahlt, steigt die Bitfehlerrate bis auf $3 \cdot 10^{-10}$ (vgl. Abb. 5.16) an.

5.3.2 Bitfehler-Schwellen bei reduzierten BPM-Werten

Die Messung der Bitfehler-Schwellen kann mit reduzierter Leistung des VCSELs der BPM-Karte (BPM-Wert 130) durchgeführt werden. Das hat den Vorteil, dass die benötigten Spaltbreiten am optischen Abschwächer kleiner gehalten werden kann und somit kein Überstrahlen auftritt.

Eine Verringerung der optischen Leistung der VCSEL einer BPM-Karte durch Reduktion

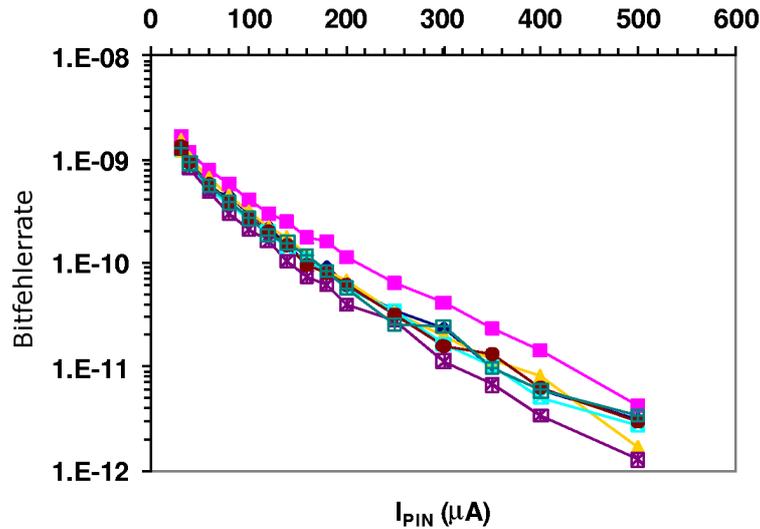


Abbildung 5.16: Bitfehlerrate gemessen an einem Optoboard unter Bestrahlung [APOE]

des BPM-Werts führt zu einem Verlust der Signalqualität, wie in Kapitel 5.1.2 diskutiert wurde. Der Einfluss auf die Bitfehler-Schwellen wurde durch mehrfache Messung mit elektrischer Rückspeisung (Aufbau nach Abb. 4.15) bei verschiedenen BPM-Werten (von 90 bis 255) untersucht. Im folgenden Diagramm (Abb. 5.17) sind Mittelwert und Streuung der Ergebnisse von jeweils zehnmaliger Messung der Bitfehler-Schwelle der DORIC-Kanäle des Optoboards BeO3099 bei vorgegebenem BPM-Wert dargestellt.

Wie an den DORIC-Kanälen 3, 4 und 5 ersichtlich, steigen die Bitfehler-Schwellen mit fallendem BPM-Wert trotz der Verschlechterung der Signalqualität nicht an. Das bestätigen auch die nicht dargestellten Kanäle 1, 2 und 6. Ein Anstieg setzt erst unterhalb eines BPM-Werts von 110 ein.

Die gemessenen Bitfehler-Schwellen von Kanal 7 streuen zwischen einem Minimalwert von etwa $10.5 \mu\text{A}$ bei einem BPM-Wert von 255 und einem Maximalwert von etwa $14.8 \mu\text{A}$ bei einem BPM-Wert von 140. Ein systematischer Anstieg setzt auch bei diesem Kanal erst unter dem BPM-Wert von 110 ein. Auffällig ist, dass die Werte bei den BPM-Werten 140 und 200 deutlich höher ($+2.5 \mu\text{A}$) sind, als die Werte die direkt zuvor (BPM-Wert 130 bzw. 180) oder danach (BPM-Wert 150 bzw. 200) gemessen wurden. Möglich ist, dass der VCSEL bei diesen BPM-Werten instabil arbeitet, oder in der verwendeten Faser optische Moden angeregt werden, die aufgrund einer Beschädigung oder Verschmutzung eines Faserendes nicht optimal ausgekoppelt werden. Diese Werte sind mit den übrigen Messwerten statistisch jedoch verträglich. Wie das nachfolgende Diagramm (Abb. 5.18) zeigt, sind die gemessenen Bitfehler-Schwellen von Kanal 7 gegenüber denen der übrigen Kanäle nicht systematisch erhöht. Es ist daher anzunehmen, dass der gemessene Verlauf von Kanal 7 durch den Aufbau oder das verwendete Optoboard bedingt ist.

Im Diagramm ist kein BPM-Wert ersichtlich, für den die gemessenen Bitfehler-Schwellen aller Kanäle minimal sind. Um die Ausgangsleistung der VCSEL so gering wie möglich zu halten, wurden während der Produktion der Optoboards sowie für die vorgestellten Untersuchungen Bitfehler-Schwellen stets mit einem BPM-Wert von 130 gemessen. Dieser Wert liegt ausreichend über dem BPM-Wert von 110, unter dem die Bitfehler-Schwellen ansteigen.

Wird die Bitfehler-Schwelle bei einem anderen BPM-Wert als 130 (aber oberhalb von

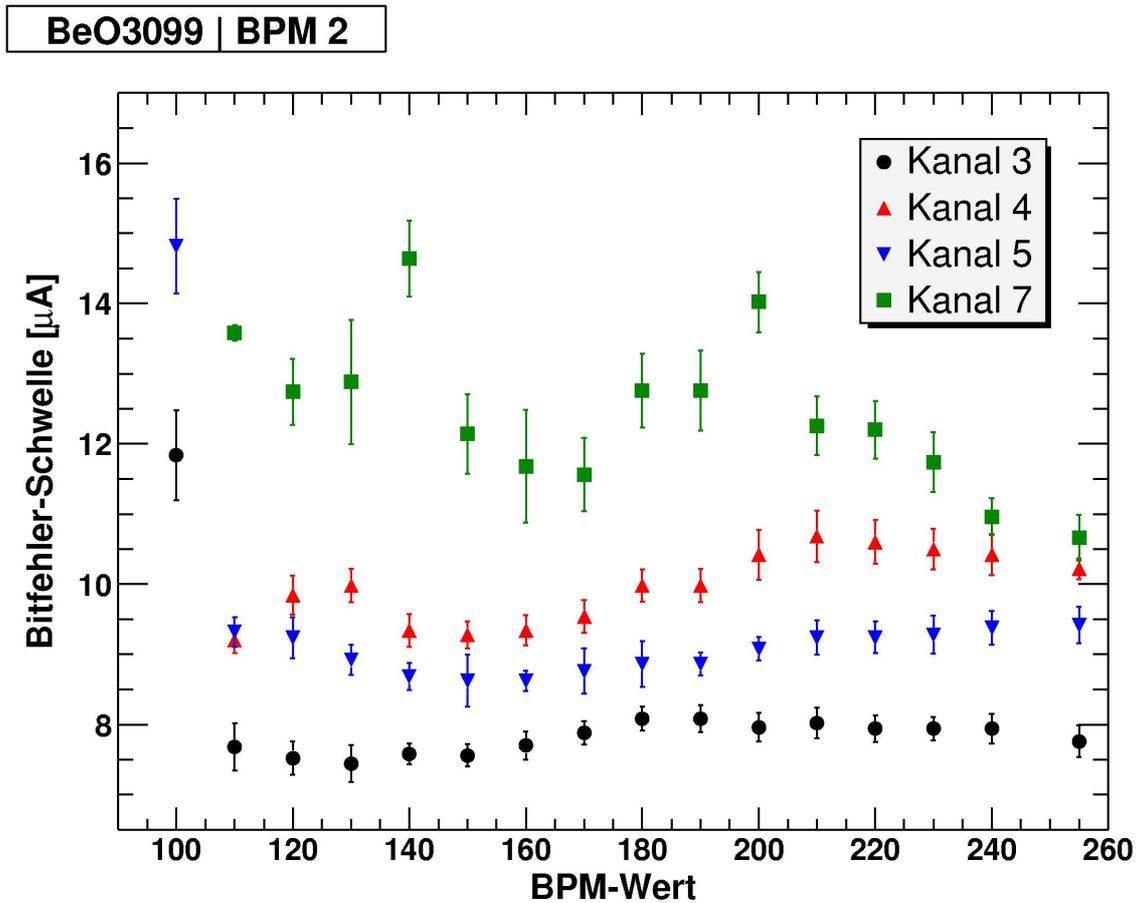


Abbildung 5.17: Gemessene Bitfehler-Schwellen bei Variation der BPM-Werte des VCSELs der BPM-Karte

110) gemessen, so kann der erhaltene Wert bis zu $\pm 1 \mu\text{A}$ abweichen, wie die Messwerte der Kanäle 3, 4 und 5 zeigen.

Diese Untersuchung wurde mit zwei weiteren BPM-Karten (BPM 2 und BPM 1) mit einem qualitativ gleichwertigen Ergebnis durchgeführt. Die Bitfehler-Schwellen können auch mit den anderen BPM-Karten bei BPM-Wert von 130 gemessen werden.

5.3.3 Reproduzierbarkeit der Bitfehler-Schwellenmessung

Mit den vier verfügbaren BPM-Karten wurden die Bitfehler-Schwellen der Optoboards BeO2097 und BeO3039 mit optischer und elektrischer Rückspeisung jeweils fünfmal gemessen (siehe Kapitel 4.2.2). Das Diagramm in Abbildung 5.18 zeigt vergleichend die gemessenen Mittelwerte mit der Standardabweichung als Fehler für BeO3093. Die entsprechende Untersuchung an BeO2097 ergab ein qualitativ gleichwertiges Ergebnis.

Die Messung liefert unabhängig von der Methode der Rückspeisung, optisch oder elektrisch, gleiche Ergebnisse. D.h., die mit beiden Methoden erhaltenen Messwerte für eine BPM-Karte stimmen mindestens innerhalb der doppelten Standardabweichung überein. Keine Methode der Rückspeisung liefert systematisch niedrigere Bitfehler-Schwellen.

Bei einer Messung mit optischer Rückspeisung sendet ein Kanal der Sendeeinheit des Optoboards (VDC und VCSEL) die von einem DORIC-Kanal dekodierten Signale zurück

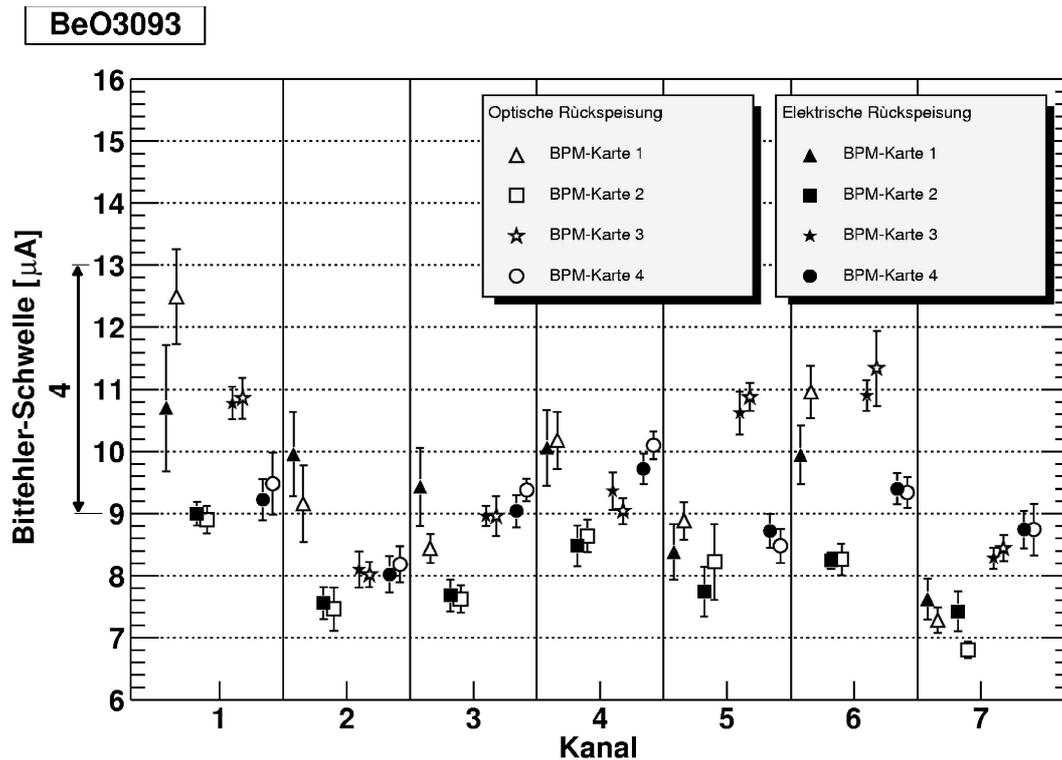


Abbildung 5.18: Bitfehler-Schwellen gemessen mit den BPM-Karten BPM 1-4 (optische und elektrische Rückspeisung)

zur Steuerkarte. Die übrigen VDC-Kanäle erhalten keine definierten Eingangssignale. Im Fall der elektrischen Rückspeisung werden die VDCs mit zufälligen Eingangssignalen betrieben. Ein unterschiedlicher Betriebsmodus der VDC-Kanäle hat keinen Einfluss auf die Bitfehler-Schwellen der DORIC-Kanäle.

Wie aus dem Diagramm (Abb. 5.18), z.B. an Kanal 1 ersichtlich, hängt die gemessene Bitfehler-Schwelle von der verwendeten BPM-Karte ab. Die von der BPM-Karte BPM 2 gemessenen Werte liegen stets unter den entsprechenden Werten, die mit den anderen BPM-Karten gemessen wurden. Diese BPM-Karte wird für Untersuchungen, wie in Kapitel 5.3 und Bitfehler-Schwellenmessungen verwendet.

Aus allen Einzelmesswerten der Bitfehler-Schwelle jedes DORIC-Kanals wurde der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet. Das sind pro Kanal fünf Einzelmesswerte genommen mit jeder der vier BPM-Karten mit optischer und elektrischer Rückspeisung, insgesamt 40 Messwerte pro Kanal. Gemittelt über alle Kanäle der beiden Optoboards hat die Standardabweichung eine Größe von 10 % des jeweiligen Mittelwerts.

Auf einen einzelnen Messwert einer Bitfehler-Schwelle, der mit einer unbekanntem BPM-Karte genommen wurde wird daher ein relativer Messfehler von 10 % angegeben.

Wie Diagramm in Abbildung 5.18 verdeutlicht, kann die Differenz der Einzelmesswerte der Bitfehler-Schwelle, bis zu $4 \mu\text{A}$ betragen. Verlangt man, dass die Bitfehlerrate des DORIC-Kanals bei jeder BPM-Karte für $I_{\text{PIN}} = 20 \mu\text{A}$ kleiner oder gleich $0.7 \cdot 10^{-11}$ sein soll, so ergibt sich als oberer zulässiger Wert einer Einzelmessung der Bitfehler-Schwelle $14 \mu\text{A}$. Dies gilt unter der Annahme, dass das Ergebnis des Kapitels 5.3.1 auf andere BPM-Karten übertragbar ist.

Untersuchungen zur Entwicklung der Bitfehler-Schwellen unter Variation der Umgebungs-

temperatur des Optoboards folgen in Kapitel 6.2.2.

Die optische Bitfehler-Schwellenmessung stellt eine gleichzeitige Funktionsüberprüfung der Empfangs- und Sendeeinheit des Optoboards dar. Äußere elektrische Einflüsse (insbesondere die Aktivierung der Leuchtstoffröhren der Deckenbeleuchtung) können bei dieser Messmethode Bitfehler erzeugen. Die Bitfehler-Schwellenmessung mit elektrischer Rückspeisung ist einfacher durchzuführen, daher wird diese Methode zur Qualitätskontrolle produzierter Optoboards verwendet.

5.3.4 Bitfehler-Schwellen bei gleichzeitigem Betrieb der Nachbarkanäle

Zur Bestimmung der Bitfehler-Schwellen werden nur zu einem DORIC-Kanal des Optoboards optische Signale gesendet. Die Ausgangssignale der übrigen DORIC-Kanäle, denen keine Signale gesendet werden, sind in diesem Fall unbestimmt.

Im späteren Betrieb der Optoboards im ATLAS-Detektor empfangen alle Kanäle eines DORICs Eingangssignale. Der PIN-Strom eines Kanals könnte, z.B. aufgrund eines Strahlenschadens in der PIN-Diode, unter die Bitfehler-Schwelle sinken, während die übrigen Kanäle noch korrekt arbeiten.

Zur Bestimmung der Bitfehler-Schwelle eines DORIC-Kanals bei gleichzeitigem Betrieb der übrigen Kanäle werden sechs VCSEL der BPM-Karte BPM 2, diese haben eine etwa die gleiche optische Ausgangsleistung (vgl. Abb. 5.2), mit maximaler Leistung (BPM-Wert 255) betrieben. Der VCSEL, der zu dem DORIC-Kanal gehört, dessen Bitfehler-Schwelle bestimmt werden soll, sendet mit etwa der halben Leistung (BPM-Wert 130).

Der optische Abschwächer reduziert die optischen Signale aller Kanäle gleichmäßig. An der Bitfehler-Schwelle, beträgt der Strom in der PIN-Diode des zugehörigen Kanals etwa $10 \mu\text{A}$. Da die übrigen VCSEL der BPM-Karte Signale mit der doppelten Ausgangsleistung senden, fließt durch die verbleibenden PIN-Dioden jeweils ein Strom von etwa $20 \mu\text{A}$. Dieser liegt oberhalb der jeweiligen Bitfehler-Schwelle. Der gemessene Gesamtstrom beträgt in diesem Beispiel $I_{\text{PIN}} = 130 \mu\text{A}$.

Nachdem die Messprozedur die Bitfehler-Schwelle gefunden hat, besteht die Schwierigkeit darin, den zugehörigen PIN-Strom zu messen. Da nur der gesamte PIN-Strom gemessen werden kann, der in allen Kanälen eines PIN-Dioden-Arrays auf einem Optoboard erzeugt wird, müssen die VCSEL auf der BPM-Karte deaktiviert werden, die nicht zu dem Kanal senden, dessen Bitfehler-Schwelle bestimmt werden soll. Dieser Abschaltvorgang verändert die Ausgangsleistung des VCSELs, der aktiviert bleibt. Diese Veränderung wurde mit dem Aufbau in Abbildung 5.19 untersucht.

Wie in Abbildung 5.19 verdeutlicht, kann die 10 V Depletionsspannung an eine einzelne PIN-Diode des PIN-Dioden-Arrays der Messkarte VCSEL angelegt werden (vgl. Kapitel 4.1.3). Der in dieser Diode erzeugte Strom I_{PIN} wird in zeitlichen Abständen von 0.5 s gemessen. Zum Zeitpunkt $t = 0$ werden die mit BPM-Wert 255 betriebenen VCSEL, deaktiviert. Der PIN-Strom I_{PIN} wird fortlaufend weiter gemessen.

Diese Messung wurde mit allen VCSEL-Kanälen der BPM-Karte BPM 2 durchgeführt. In dem Diagramm in Abbildung 5.20 ist die Entwicklung des PIN-Stroms, normiert auf den Messwert I_0 bei $t = 0$ dargestellt. Dabei waren die Spalte des optischen Abschwächers geschlossen.

Für Zeiten $t < 0$ vor dem Abschalten ist die optische Leistung innerhalb $\pm 5\%$ konstant. Diese konstante VCSEL-Leistung stellt sich nach etwa 40 s Betrieb aller Kanäle des VCSEL-Arrays nach einem Schaltvorgang ein.

Nach dem Abschalten dauert es 1.5 s bis ein erneuter Messwert genommen werden kann. Der Grund für diese Verzögerung liegt im Strommessgerät, das etwa 1 s benötigt, um den

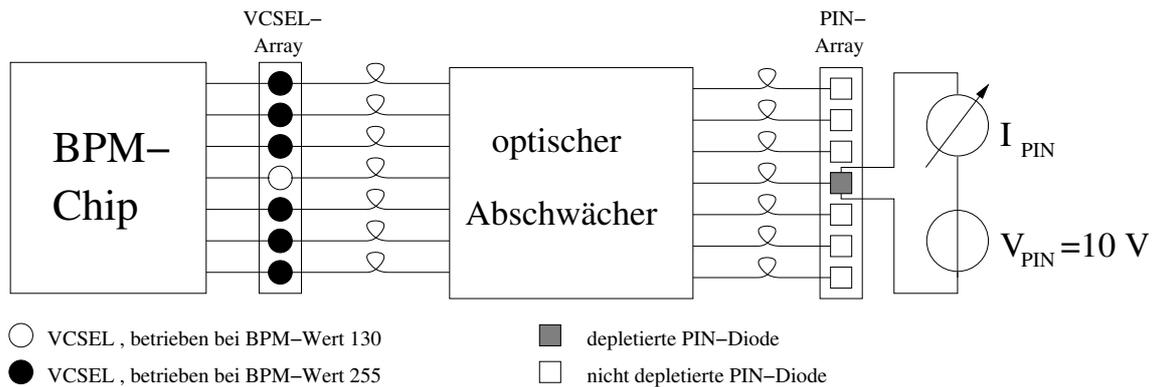


Abbildung 5.19: Prinzip der Untersuchung der Entwicklung der optischen Leistung eines VCSELS nach dem Abschalten der Nachbarkanäle (schematisch)

kleineren PIN-Strom korrekt zu messen und in Verzögerungszeiten, die in die Steuersoftware implementiert sind.

Nach dem Abschaltvorgang wird der VCSEL in einen instabilen Betriebsmodus versetzt. Insbesondere die Messkurve von Kanal 1 lässt die Vermutung zu, dass der VCSEL seine Anregungsmoden ändert, was mit Leistungsschwankungen verbunden ist (siehe auch [Nico00]). Möglich ist auch, dass der Abschaltvorgang den Strom verändert, mit dem der nicht abgeschaltete VCSEL betrieben wird. Die Leistung des neuen stabilen Betriebsmodus, der sich einstellt, kann bis zu 20 % vom Ausgangswert abweichen.

Das darauf folgende Diagramm (Abb. 5.21) zeigt das Ergebnis der gleichen Untersuchung für PIN-Ströme von $I_0 = (10 \pm 1) \mu\text{A}$. Das optische Signal des VCSELS wurde mit dem optischen Abschwächer entsprechend reduziert.

Wie im Verlauf der Kurven ersichtlich, erzeugt das Abschalten Leistungsschwankungen der Größe $\pm 30\%$ vom Ausgangswert. Die Veränderung der Ausgangsleistung der VCSEL führt dazu, dass andere optische Moden in der Faser (vgl. Abb. 2.11) laufen. Durch die Veränderung der geführten optischen Moden wird der Abschwächungsfaktor des optischen Abschwächers verändert, was zu einer weiteren Veränderung der an der PIN-Diode empfangenen Leistung führt. Die Tatsache, dass sich alle Messkurven nach 10 s innerhalb von 95 – 105 % kreuzen, ist zufällig und nicht reproduzierbar.

Das Diagramm in Abbildung 5.21 zeigt die Situation im Fall der Messung der Bitfehler-Schwelle bei gleichzeitigem Betrieb der Nachbarkanäle. Aufgrund der Leistungsschwankung nach dem Abschalten kann der PIN-Strom an der Bitfehler-Schwelle mit diesem Messprinzip nur mit einer Genauigkeit von $\pm 30\%$ gemessen werden. Eine Lösung dieses Problems könnte die Verwendung eines schnelleren Strommessgeräts und Reduktion der Verzögerungszeiten in der Steuersoftware sein. Der PIN-Strom könnte dann etwa 0.1 s nach dem Abschalten anstatt nach 1 s gemessen werden, bevor sich die Leistung des VCSELS verändert.

Weiterhin wurde ein anderer Abschaltvorgang untersucht. Der PIN-Strom an der Bitfehler-Schwelle kann aus dem Abfall des gesamten PIN-Stroms errechnet werden, wenn nur der VCSEL deaktiviert wird, der zu dem DORIC-Kanal sendet, dessen Bitfehler-Schwelle gemessen wird. Damit wird nur einer anstelle von sechs VCSEL der BPM-Karte deaktiviert. Auf diese Art gemessenen Bitfehler-Schwellen liegen jedoch unrealistisch niedrig ($\leq 6 \mu\text{A}$), oder sind sogar negativ. Diese Messmethode wurde daher verworfen.

Ergebnisse von Messungen der Bitfehler-Schwelle mit dieser Methode bei gleichzeitigem Betrieb der Nachbarkanäle sind in Kapitel 6.2.2 dargestellt.

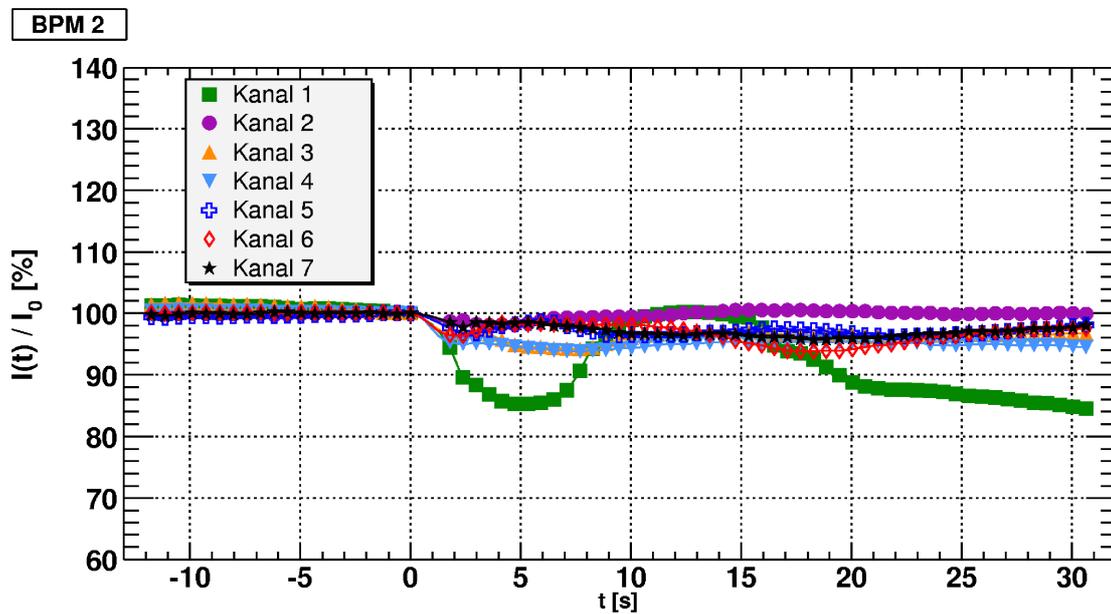


Abbildung 5.20: Entwicklung des PIN-Stroms nach dem Abschaltvorgang bei geschlossenen Spalten des optischen Abschwächers

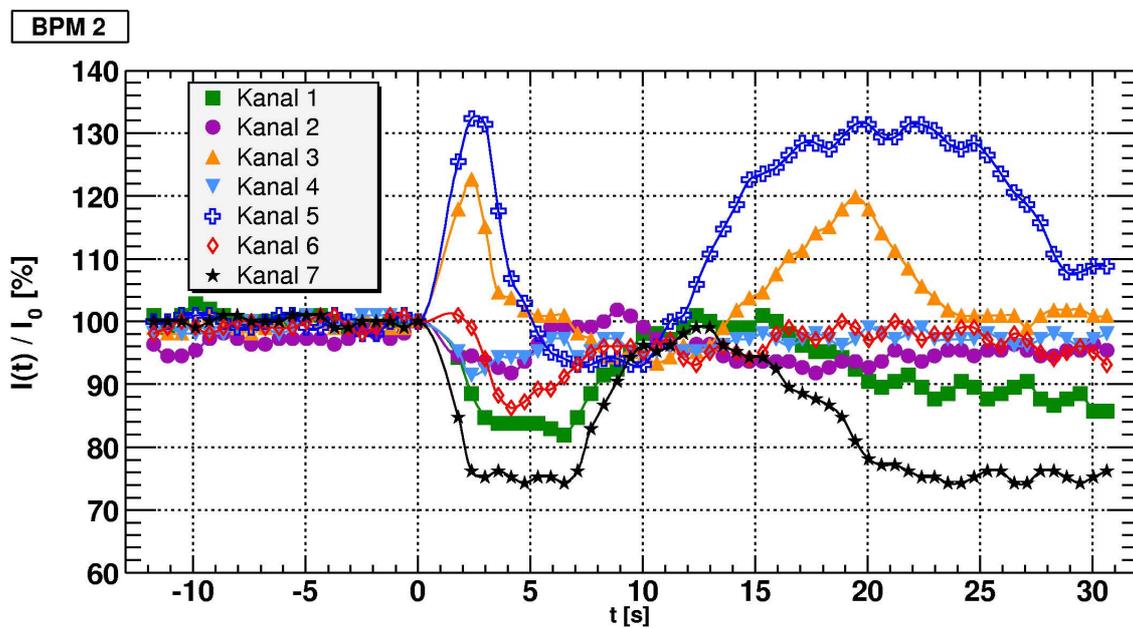


Abbildung 5.21: Entwicklung des PIN-Stroms nach dem Abschaltvorgang bei geöffneten Spalten des optischen Abschwächers ($I_0 = 10 \mu A$)

5.4 Messungen der Eigenschaften der VCSEL-Signale eines Optoboards

5.4.1 Messung der optischen Leistung

Die Kontrollmessung der optischen Leistung der VCSEL eines Optoboards wird bei Raumtemperatur nach vorhergehendem 20-minütigem Betrieb der VCSEL, wobei diese ein 40 MHz-Taktsignal senden, durchgeführt. Zusätzlich zu den Schwankungen der VCSEL-Leistung beeinflusst die optische Verbindung zwischen VCSEL und Messdiode die gemessene Leistung. Dazu gehören der Leistungsverlust an der Verbindungsstelle zweier Faserbänder durch einen MPO-Stecker, Verluste durch Biegung der Fasern und Ein- bzw. Auskopplungsverluste an den Faserenden.

Als Leistung der VCSEL wird der, in eine optische Leistung umgerechnete, gemessene PIN-Strom der PIN-Diode auf der Messkarte VCSEL (vgl. Kapitel 4.1.3) angegeben. Die optischen Signale laufen dabei von den VCSEL des Optoboards durch das 0.5 m lange Faserband des aufgesetzten MT8-Steckers über eine MPO-Steckverbindung in ein weiteres 0.5 m langes Faserband, das auf dem PIN-Dioden-Array der Messkarte VCSEL endet.

Mehrfach wiederholte Leistungsmessungen der VCSEL eines Optoboards unter Veränderung der äußeren Parameter (Raumtemperatur $\pm 10^\circ\text{C}$, Austausch der optischen Faser, Variation der vorhergehenden Betriebsdauer) streuen mit $\pm 20\%$ um einen Mittelwert. Dieser Wert beschreibt die Messgenauigkeit dieses Aufbaus und wird als Fehler auf eine einmalig gemessene optische Leistung angegeben (siehe genauer in [AR05]).

Für die Durchführung der Qualitätsuntersuchungen an der Sendeeinheit eines Optoboards wird die optische Leistung jedes VCSELs bei einem 40 MHz-Taktsignal, einem 20 MHz-Taktsignal und einer zufälligen Bitfolge als Ausgangssignal gemessen. Aufgrund dieser hohen Frequenzen misst das Strommessgerät den Mittelwert des PIN-Stroms. Durch Multiplikation mit dem Faktor 2 wird die optische Leistung für Logisch 1 als Messwert angegeben.

5.4.2 Messung der Anstiegs- und Abfallzeiten der VCSEL-Signale

Die Anstiegs- und Abfallzeiten der optischen Signale eines VCSELs werden an einem 40 MHz-Taktsignal mit dem PIN-Dioden Array der Messkarte VCSEL gemessen. An diesem liegt eine Depletionsspannung von $V_{\text{PIN}} = 10\text{ V}$ an. Abbildung 5.22 zeigt die Pulsform eines 40 MHz Taktsignals, aufgenommen mit dem Oszilloskop im Messaufbau gemäß Abbildung 4.17. Überlagert ist die gleiche Pulsform, aufgenommen nach einer Erhöhung der Depletionsspannung auf $V_{\text{PIN}} = 20\text{ V}$.

Die Flanken der mit $V_{\text{PIN}} = 10\text{ V}$ aufgenommenen Pulsform zeigen ein Unterschwingen. Das bedeutet, das Signal erreicht nach der steigenden Flanke die maximale Amplitude (100 % in Abb. 5.22) erst direkt vor der abfallenden Flanke. Ebenso wird die minimale Amplitude (0 % in Abb. 5.22) nicht direkt nach der fallenden Flanke erreicht. Die Niveaus 0 %, 20 %, 80 % und 100 % wurden manuell in das Diagramm eingefügt und entsprechen daher nicht den entsprechenden Niveaus, die die Messroutine des Oszilloskops errechnen würde.

Durch die Erhöhung der Depletionsspannung auf 20 V wird das Unterschwingen reduziert. Daher ist anzunehmen, dass das Unterschwingen ein Effekt ist, der durch die PIN-Diode verursacht wird. Eine Erklärung könnte sein, dass bei 10 V die PIN-Diode nicht ausreichend verarmt ist.

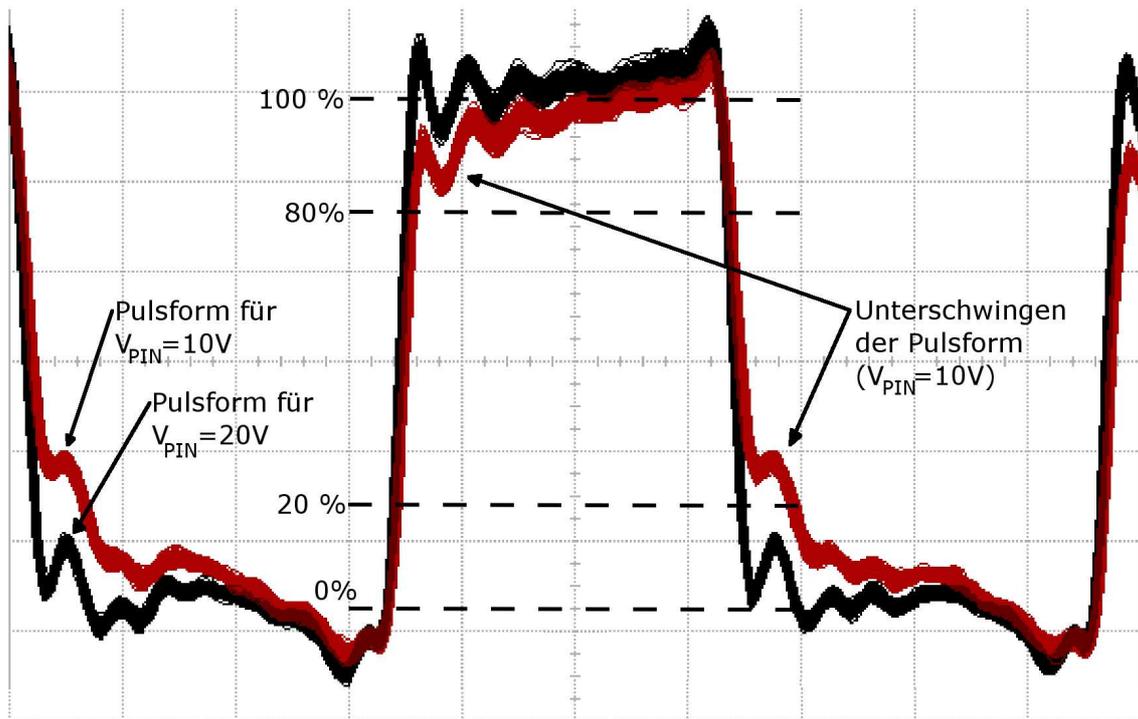


Abbildung 5.22: Vergleich der Pulsform des VCSEL-Signale aufgenommen bei 10 V und 20 V Depletionsspannung am PIN-Dioden Array der Messkarte VCSEL

In der Messprozedur wird die Anstiegs- bzw. Abfallzeit von 20 % bis 80 % der Signalamplitude gemessen. Wie in Abbildung 5.22 ersichtlich, fällt das Niveau 20 % in den Bereich des Unterschwingens der fallenden Flanke für $V_{PIN} = 10\text{ V}$. Das bedeutet, dass mit dieser Depletionsspannung die korrekte Anstiegs- bzw. Abfallzeit des optischen Signals nicht gemessen werden kann. Das Niveau 80 % liegt in dieser Abbildung unterhalb des Bereichs des Unterschwingens der steigenden Flanke. Da der Abstand nur gering ist (+5 %), kann es vorkommen, dass die Messroutine des Oszilloskops das Niveau 80 % höher legt und die Anstiegszeit falsch misst.

Wie durch Abbildung 5.22 verdeutlicht, reduziert die Erhöhung der Depletionsspannung auf $V_{PIN} = 20\text{ V}$ das Unterschwingen. Die Messniveaus 20 % und 80 % der Signalamplitude liegen nicht mehr im Bereich des Unterschwingens.

Die Umrechnungsfaktoren in Gleichung (4.3) (auf Seite 45) wurden für $V_{PIN} = 10\text{ V}$ (siehe [AR05]) ermittelt. Diese sind ebenfalls für $V_{PIN} = 20\text{ V}$ gültig [ARmdl]. Daher kann die komplette Untersuchung der VCSEL-Signale mit der erhöhten Depletionsspannung ausgeführt werden.

Eine weitere mögliche Lösung ist die Messung der Anstiegszeit mit den veränderten Niveaus 20 % auf 60 % und der Abfallzeit mit 80 % auf 40 %. Die erhaltenen Messwerte können durch Multiplikation mit dem Faktor 1.5 auf die korrekten Niveaus angepasst werden.

6 Untersuchung der Qualität von Optoboards aus der Produktion

Für ein Optoboard (BeO2097) werden in Kapitel 6.1 zunächst die Ergebnisse der Messungen zur Qualitätsüberprüfung ausführlich dargestellt. Die zu erfüllenden Qualitätsanforderungen der Empfangseinheit (PIN-Dioden und Digital-Opto-Receiver-Integrated-Circuits, DORIC) sowie der Sendeeinheit (VCSEL-Driver-Chip, VDC und Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL) eines Optoboards sind in Kapitel 3.3 angegeben. Die Messungen wurden mit dem Optoboard-Testsystem durchgeführt, dessen Bestandteile in Kapitel 4 diskutiert wurden. In Anhang D sind die Ergebnisse der gleichen Untersuchungen mit neun weiteren Optoboards dargestellt.

Daran anschließend werden in Kapitel 6.2 Ergebnisse von Untersuchungen mit den Optoboards BeO2097 und BeO3093 bei verschiedenen Betriebstemperaturen dargestellt. Bei Umgebungstemperaturen zwischen $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ wurden Optoboardparameter (Bitfehler-Schwellen und Bitfehlerrate der DORIC-Kanäle, optische Leistung der VCSEL) gemessen, um deren Temperaturabhängigkeiten zu bestimmen.

6.1 Qualitätsuntersuchungen am Optoboard BeO2097

6.1.1 Qualitätsuntersuchung der Ausgangssignale des DORICs

Die Qualitätsuntersuchungen der DORIC-Ausgangssignale wurden, wie in Kapitel 4.2 diskutiert, mit dem Aufbau des Testsystems gemäß Abbildung 4.13 durchgeführt. Mit einer speziellen Messkarte DORIC, auf der jeder Ausgang des DORICs mit einem Paar der Messkopfbuchsen für die Messköpfe des Oszilloskops¹ (siehe Kapitel 4.1.3) bestückt ist, konnten die Messungen an allen DORIC-Kanälen gleichwertig durchgeführt werden.

Die vorzunehmenden Messungen, wie z.B. die Messung des Duty-Cycles des Taktsignals, sind als Messroutinen in das Oszilloskop einprogrammiert. Durch interne Subtraktion der LVDS-Signale negativer von denen positiver Polarität rekonstruiert das Oszilloskop die Takt- und Steuersignale. Eine aufgerufene Messroutine führt Einzelmessungen der zugehörigen Messgröße an diesen Signalen fortlaufend durch. Aus den Ergebnissen dieser Einzelmessungen bildet es den Mittelwert und die Standardabweichung.

Um alle Größen gleichwertig zu messen, wird vom Messprogramm auf dem Rechner eine einheitliche Messdauer vorgegeben. Zur Optimierung dieser Messdauer wurden die DORIC-Qualitätsmessungen an einem Optoboard unter Variation der Messzeit zwischen 0.5 s bis 10 s durchgeführt. Die erhaltenen Ergebnisse zeigten sich dabei als unabhängig von der eingestellten Messdauer. Daher wird als Standard eine Messdauer von 1 s verwendet. Diese erlaubt es einem erfahrenen Benutzer des Testsystems, den Messvorgang auf dem Display zu verfolgen.

In den Diagrammen dieses Kapitels 6.1.1² sind die, durch die Messroutine des Oszilloskops

¹HP InfiniumTM54825A

²Auf einigen Seiten dieses Kapitels sind mehrere Diagramme untereinander dargestellt. Dabei ist die Legende des obersten Diagramms für alle folgenden Diagramme auf der Seite zu übernehmen.

berechneten, Mittelwerte mit der Standardabweichung eingetragen. Im Fall der Bitfehler-Schwellen der DORIC-Kanäle sind als Fehler die in Kapitel 5.3.3 diskutierten Werte eingezeichnet. Die Fehler des gemessenen Jitters des Taktsignals werden diskutiert (s.u.).

Das Messprogramm nutzt eine Standardprozedur, die bei allen drei PIN-Strömen $I_{PIN} = 50 \mu A$, $100 \mu A$ und $1000 \mu A$ in der PIN-Diode des Optoboards aufgerufen wird und die Messungen aller Parameter aus Tabelle 3.2 durchführt. Daher werden neben den vorgeschriebenen Messungen bei $50 \mu A$ und $1000 \mu A$ zusätzlich diejenigen durchgeführt, die nur für $100 \mu A$ durch die Qualitätsanforderungen verlangt sind. Das bedeutet zusätzlich gemessen werden bei $50 \mu A$ und $1000 \mu A$ die LVDS-Durchschnittsspannung U_{av} , die LVDS-Amplitude U_{amp} , die Anstiegs- und Abfallzeiten der rekonstruierten Taktsignal- und der Steuersignalfanken sowie der Jitter des Taktsignals.

6.1.2 Qualität der Taktsignale

Zunächst werden im Folgenden die Ergebnisse der Untersuchung der rekonstruierten Taktsignale des Optoboards BeO2097 dargestellt.

Qualität der LVDS-Signale

Die folgenden Diagramme (Abb. 6.2 und 6.3) zeigen die Ergebnisse der Messungen der zeitlichen Mittelwerte und der Amplituden der LVDS-Signale beider Polaritäten. Zusätzlich sind die von den Qualitätsanforderungen zulässigen Bereiche, in denen die Messwerte liegen sollten, eingezeichnet (Maximalwert und Minimalwert).

Die Fehlerbalken der LVDS-Amplitude sind von den Messpunkten überdeckt, sie haben jeweils eine relative Größe von unter 0.5 % des Mittelwerts. Der relative Fehler der gemessenen Signalamplituden beträgt bis zu 15 %. Der Grund für diesen größeren Fehler liegt im Überschwingen des Messsignals. Für eine genauere Erklärung soll erläutert werden, wie das Oszilloskop eine Einzelmessung vornimmt.

Durchführung einer Einzelmessung durch die Messroutine des Oszilloskops

Abbildung 6.1 (a) zeigt als Beispiel eine Aufnahme der LVDS-Signale beider Polaritäten des Taktsignals.

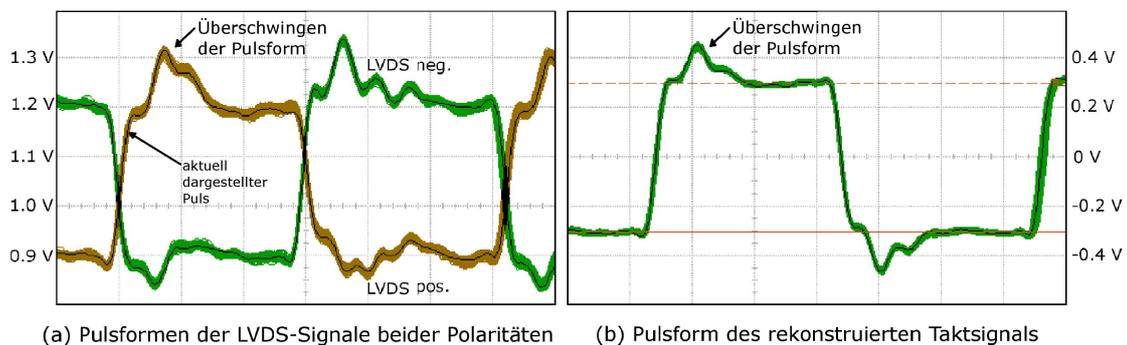


Abbildung 6.1: Pulsformen der LVDS-Signale und des daraus rekonstruierten Taktsignals

Die in Abbildung 6.1 dargestellten Pulsformen sind Überlagerungen vieler nacheinander aufgenommener Einzelpulse. Die zu dem Zeitpunkt dargestellte Pulsform, in dem die Aufnahme genommen wurde, ist in der Abbildung schwarz hervorgehoben.

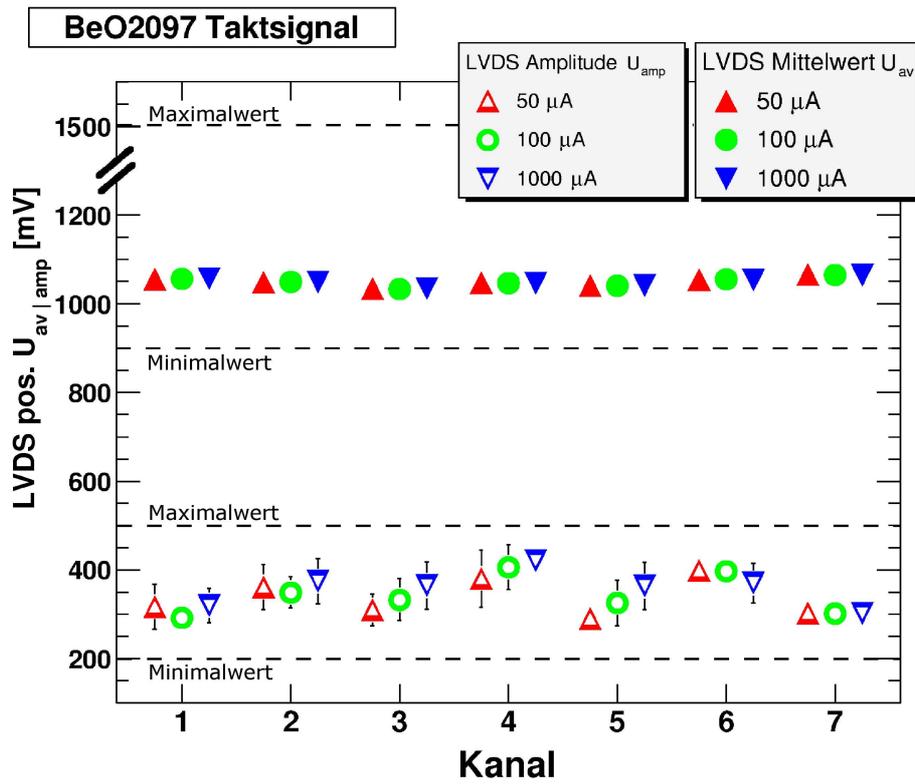


Abbildung 6.2: Amplituden und Mittelwerte der LVDS-Signale positiver Polarität

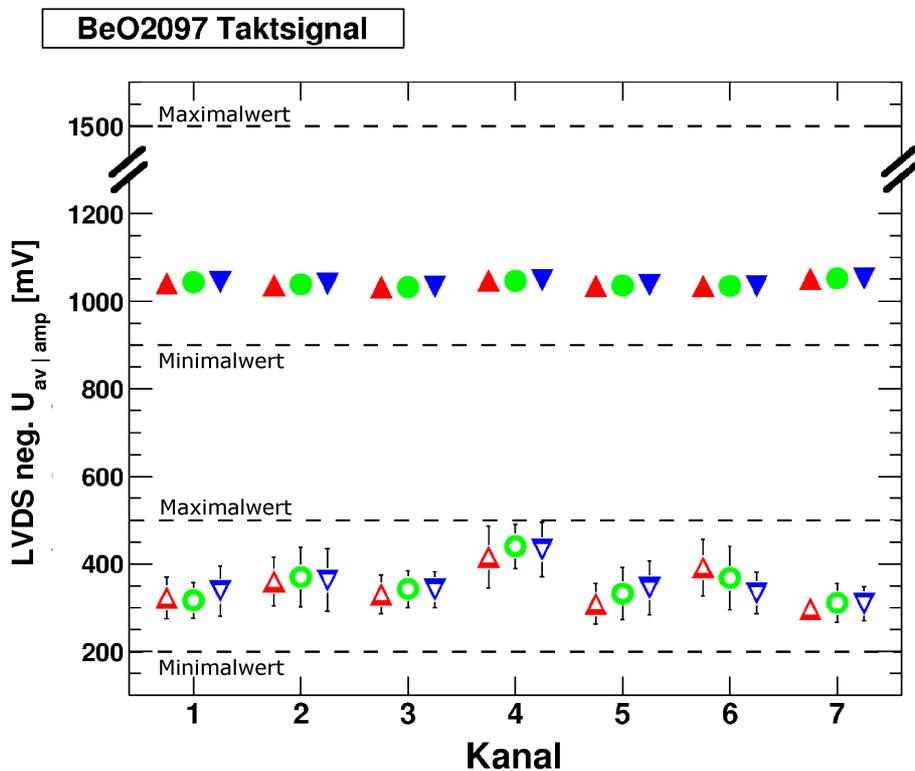


Abbildung 6.3: Amplituden und Mittelwerte der LVDS-Signale negativer Polarität

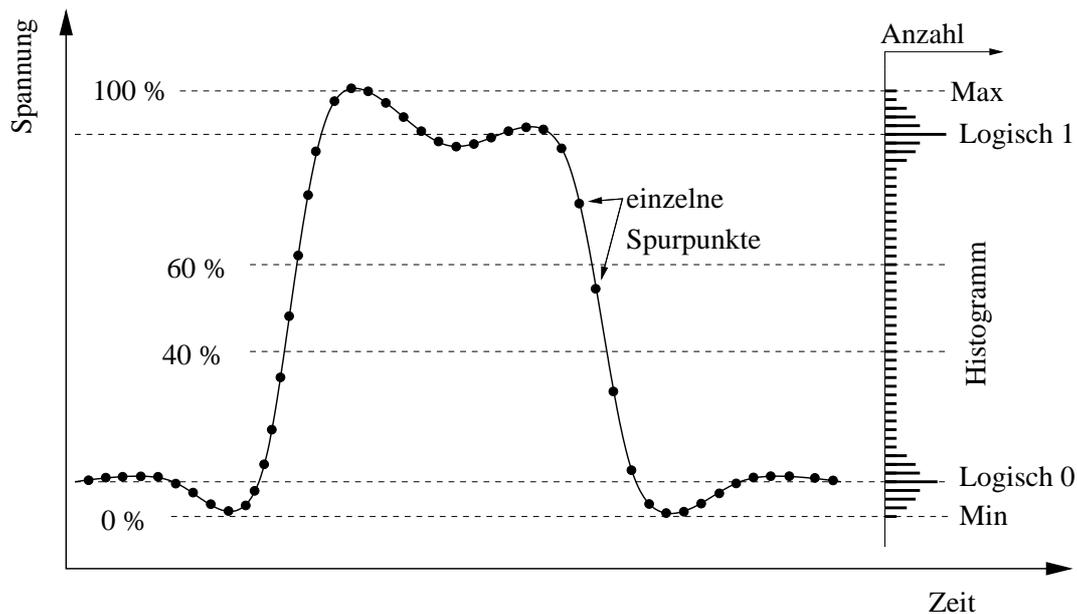


Abbildung 6.4: Durchführung einer Einzelmessung durch die Messroutine des Oszilloskops (schematisch)

Das Überschwingen variiert in aufeinander folgenden Pulsen. Für jeden Einzelpuls, an dem eine Einzelmessung vorgenommen wird, errechnet die Messroutine die Niveaus Logisch 0 und Logisch 1 und ordnet diesen eine Messspannung zu (s.u). Anhand der Abbildung 6.4 soll erläutert werden, wie dieses geschieht.

Das Oszilloskop misst die momentane Spannung des Messsignals im zeitlichen Abstand von 0.5 ns , was einer Abtastfrequenz (Sampling Rate) von $2 \frac{\text{GS}}{\text{s}}$ entspricht. Diese Messpunkte sind Spurpunkte der Pulsform. Sie werden zur Darstellung der Pulsform auf dem Display interpoliert und sind zur Verdeutlichung in Abbildung 6.4 eingetragen. Jeder Einzelmesswert der Spannung, die zu jeweils einem Spurpunkt einer auf dem Display dargestellten Pulsform gehört, wird in ein Histogramm aufgenommen. D.h., die Messroutine ermittelt die Anzahl der Punkte pro Intervall der Spannung.

Der größte Messwert der Spannung (Max in Abb. 6.4) legt das Spannungsniveau 100 %, der niedrigste das Spannungsniveau 0 %, im Histogramm fest. Die oberen 60 % werden daraufhin nach einem Maximum der Zählrate durchsucht, die zugehörige Spannung als Logisch 1 interpretiert. Analog werden die unteren 40 % nach einem Maximum der Zählrate durchsucht und die zugehörige Spannung als Logisch 0 interpretiert. Nachdem die Niveaus Logisch 0 und Logisch 1 ermittelt sind, kann die Messroutine z.B. die Amplitude von 20 % bis 80 % des Messsignals errechnen.

In einer Pulsform, die überschwingt, sind die Maxima der Zählrate im Histogramm geringer ausgeprägt, als bei einem Messsignal, das kein Überschwingen zeigt. Da das Überschwingen in den aufeinander folgenden Pulsformen, an denen jeweils eine Einzelmessung vorgenommen wird, unterschiedlich stark ausgeprägt ist, verändern sich die Spannungsniveaus 100 % bzw. 0 %. Damit schwanken ebenso die Spannungsniveaus 40 % und 60 %. Infolgedessen unterscheiden sich in aufeinander folgenden Messungen die Werte der Spannung, die Logisch 1 und Logisch 0 zugeordnet werden. Dadurch vergrößert sich die Standardabweichung bei der Messung der LVDS-Amplitude.

Abbildung 6.1 (b) zeigt das aus den beiden Signalen (LVDS pos. und LVDS neg. in

Abb. 6.1 (a)) durch das Oszilloskop rekonstruierte Taktsignal. Dieses zeigt weiterhin ein Überschwingen, das aber reduziert ist, da sich das Überschwingen der beiden LVDS-Signale durch die Subtraktion (vgl. Kapitel 3.1) gegenseitig aufhebt. Die Messroutine errechnet hierfür stets gleiche Spannungen für die Niveaus Logisch 0 und Logisch 1.

Qualität des rekonstruierten Taktsignals

Die folgenden Diagramme (Abb. 6.6) zeigen die Messwerte der Untersuchungen des rekonstruierten Taktsignals des Optoboards BeO2097. Das sind die Anstiegs- und Abfallzeiten sowie der Duty-Cycle des Taktsignals. Die von den Qualitätsanforderungen erlaubten Bereiche sind in diesen Diagrammen wiederum eingezeichnet.

Messung des Jitters

In Abbildung 6.5 ist schematisch die Pulsform des 40 MHz Taktsignals dargestellt.

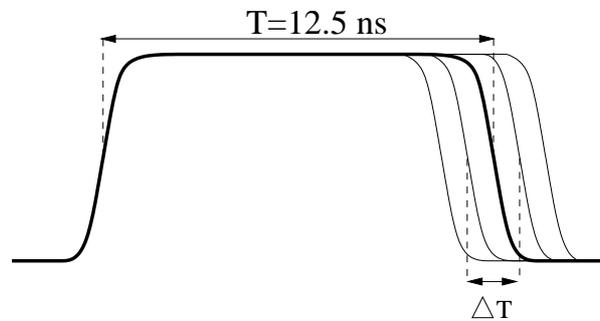
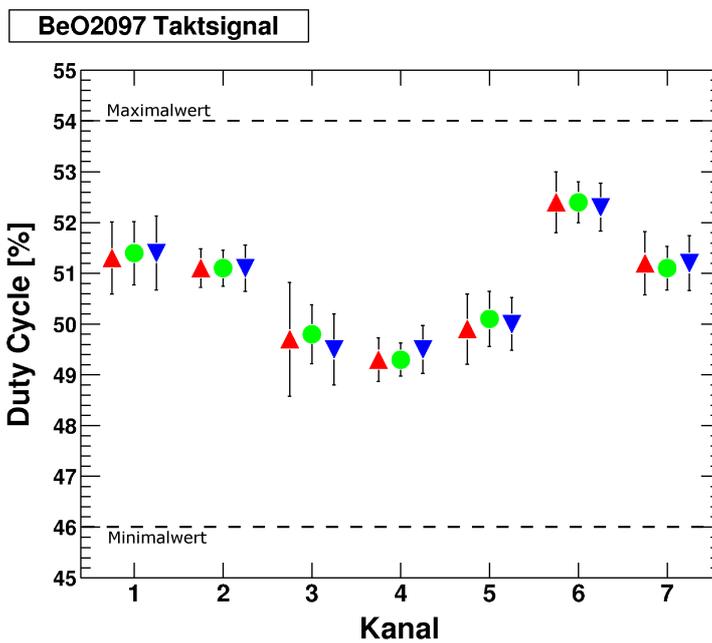
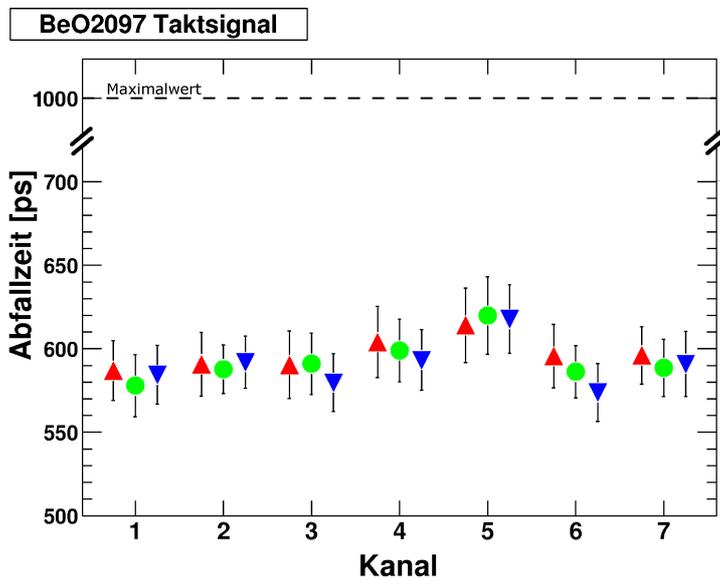
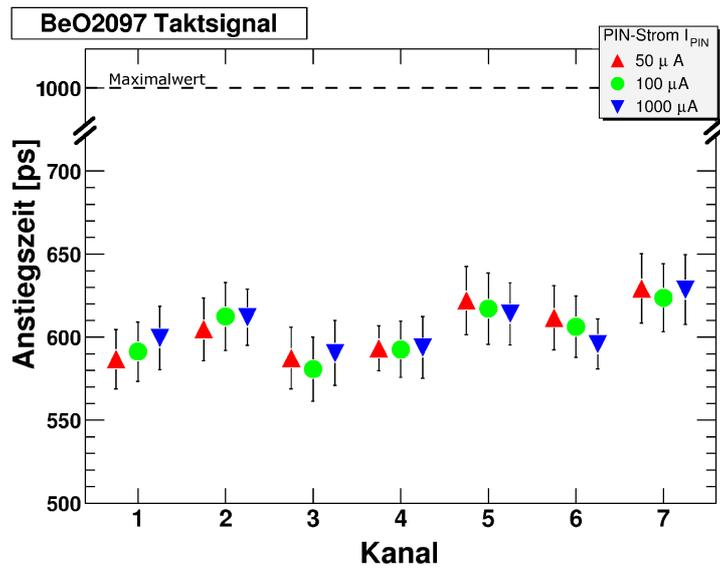


Abbildung 6.5: Messung des Jitters (schematisch)

Die Breite T des Zustands Logisch 1 soll 12.5 ns betragen (das entspricht einem 40 MHz-Takt). Die Standardabweichung ΔT , die die Messroutine des Oszilloskops bei der Messung von T ermittelt, wird als Jitter ausgelesen. Um einen Fehler auf den gemessenen Jitter angeben zu können, wurde er an neun DORIC-Kanälen verschiedener Optoboards bei PIN-Strömen von $50 \mu\text{A}$, $100 \mu\text{A}$ und $1000 \mu\text{A}$ jeweils 200 mal gemessen. Die Standardabweichung dieser Messwerte beträgt zwischen 5 % und maximal 10 % vom ihrem Mittelwert. Für einen einmalig gemessenen Jitter wird daher ein relativer Fehler von 10 % angegeben.



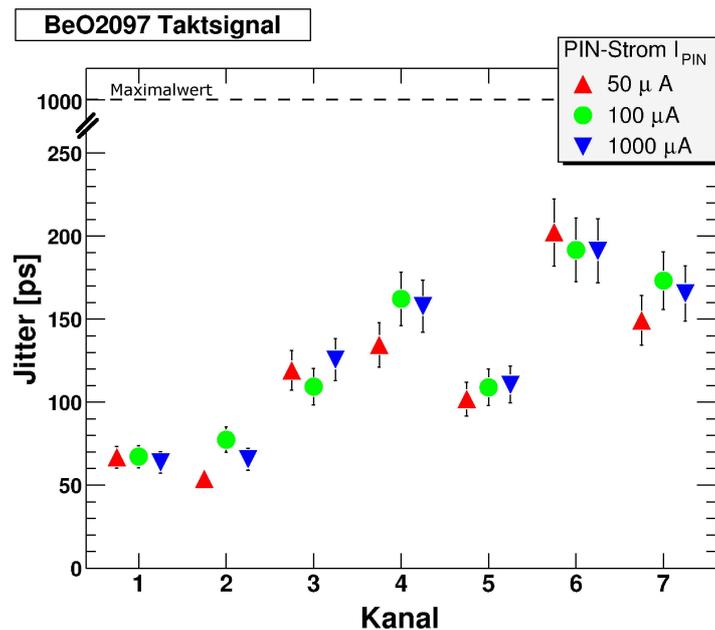


Abbildung 6.6: Anstiegs- und Abfallzeiten sowie Duty-Cycle und Jitter des Taktsignals

6.1.3 Qualität der Steuersignale

Qualität der LVDS-Signale

Die Diagramme in den Abbildungen 6.7 und 6.8 zeigen für das Optoboard BeO2097 die Ergebnisse der Messungen der zeitlichen Mittelwerte und der Amplituden der LVDS-Signale beider Polaritäten, die zu den rekonstruierten Steuersignalen gehören. Der Messfehler der Amplitude ist wie im Fall der LVDS-Signale, die zum Taktsignal gehören, durch das Überschwingen der Signalfanken vergrößert.

Qualität der rekonstruierten Steuersignale

Die Diagramme in Abbildung 6.9 zeigen die Messwerte der Anstiegs- und Abfallzeiten der Steuersignalfanken und der Verzögerungszeiten der Taktsignal- zu den Steuersignalfanken (s.u.) sowie die gemessenen Bitfehler-Schwellen der DORIC-Kanäle des Optoboards BeO2097. Die von den Qualitätsanforderungen erlaubten Bereiche sind in diesen Diagrammen wiederum eingezeichnet. Die angegebenen Fehler auf die gemessenen Bitfehler-Schwellen wurden in Kapitel 5.3.3 diskutiert.

Messung der Verzögerungszeit der Taktsignal- zu den Steuersignalfanken

In Abbildung 6.10 sind schematisch die Pulsformen des 40 MHz-Taktsignals und der Steuersignale dargestellt.

Der Modul-Control-Chip (MCC) auf einem Pixel-Modul (siehe Kapitel 1.2.3 und 3.4) übernimmt die Steuersignale mit steigender Flanke des Taktsignals. Daher muss zur steigenden Flanke des Taktsignals an der Leitung der Steuersignale der richtige logische Zustand zur Übernahme anliegen. Damit dieses gewährleistet ist, setzt der DORIC die logischen Zustände der Steuersignale zu den fallenden Flanken des Taktsignals, wie in Abbildung 6.10 schematisch dargestellt.

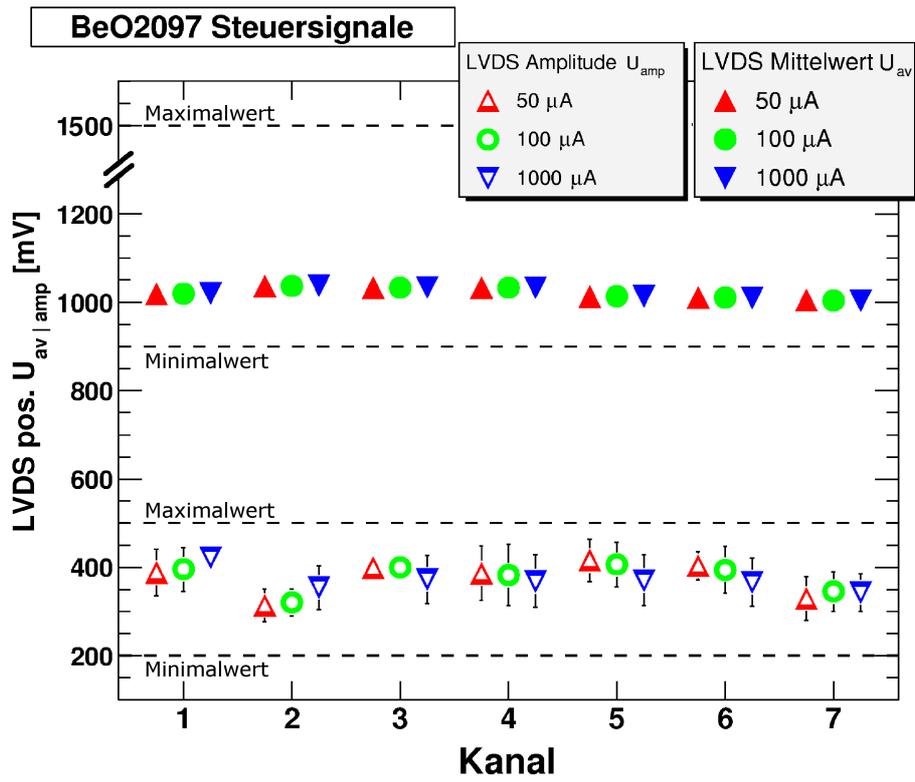


Abbildung 6.7: Amplituden und Mittelwerte der LVDS-Signale positiver Polarität

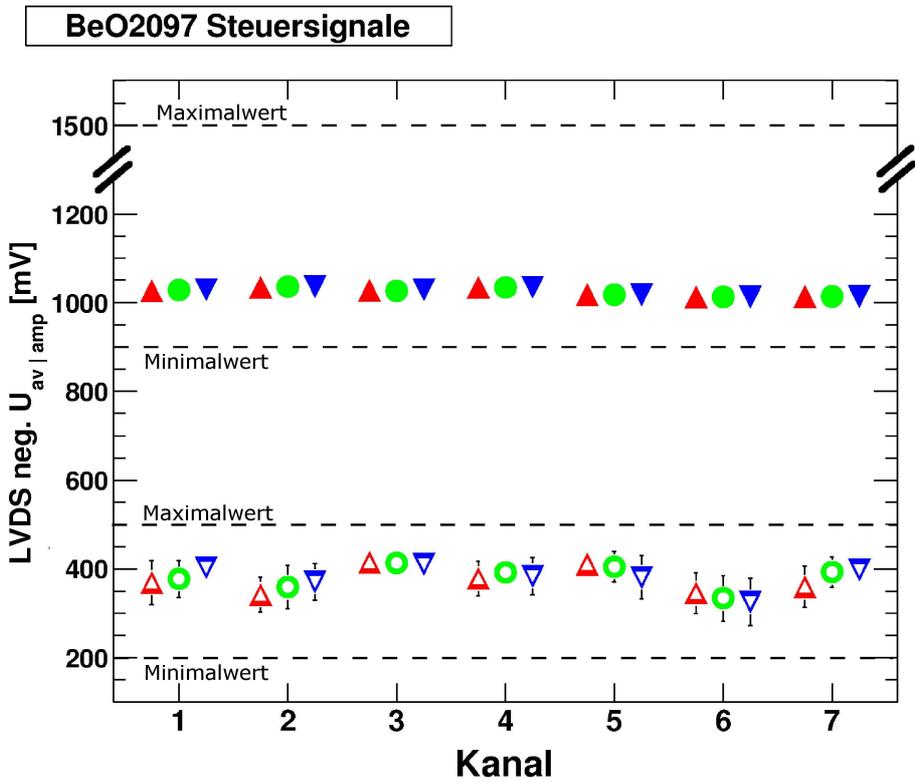
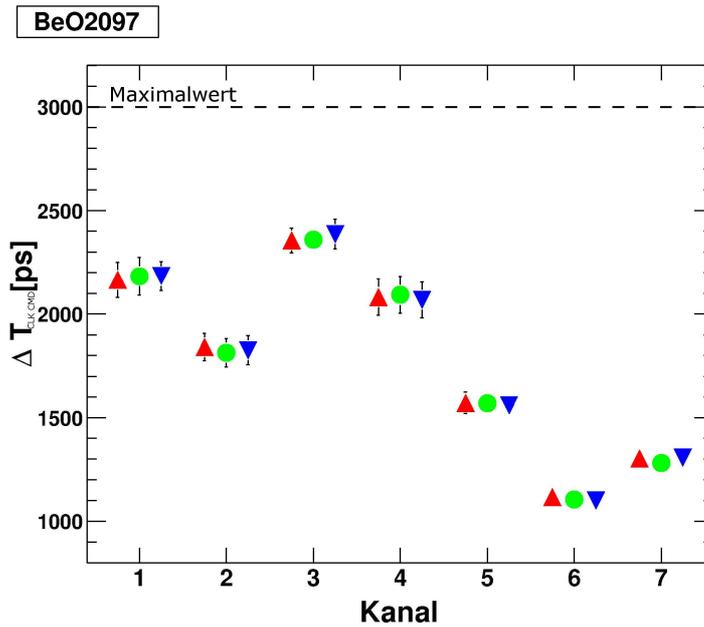
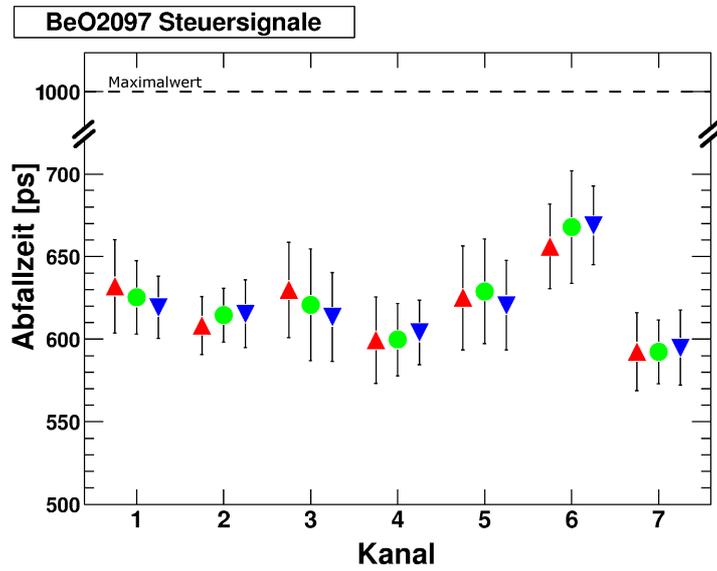
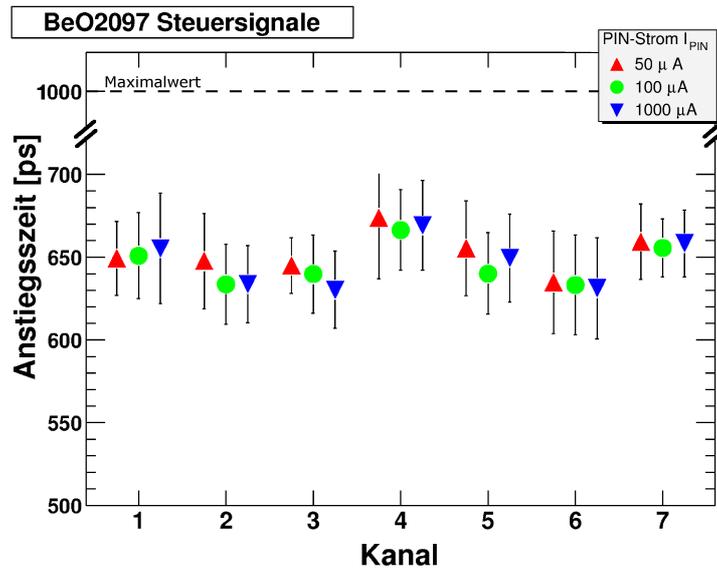


Abbildung 6.8: Amplituden und Mittelwerte der LVDS-Signale negativer Polarität



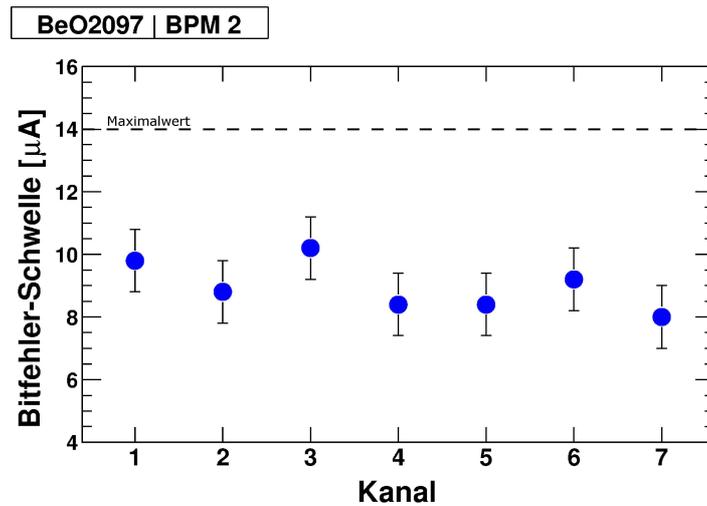


Abbildung 6.9: Anstiegs- und Abfallzeiten der Steuersignale sowie Verzögerungszeiten der Steuersignal- zu den Taktsignalfanken und die Bitfehler-Schwellen

Damit die korrekte Übernahme der Steuersignale durch den MCC sichergestellt ist, darf der zeitliche Abstand zwischen einer fallenden Flanke des Taktsignals zu einer steigenden Flanke der Steuersignale nicht zu groß werden (≤ 3 ns). Zur Messung dieser Verzögerungszeit $\Delta T_{\text{CLK CMD}}$ an einem DORIC-Kanal wird eine Folge von abwechselnd Logisch 0 und Logisch 1 (20 MHz-Takt) als Steuersignale gesendet. Das Oszilloskop subtrahiert intern dieses Signal vom 40 MHz-Taktsignal. Wie in Abbildung 6.10 verdeutlicht, enthält das resultierende Signal (Differenzsignal) Pulse, die eine Breite der zu messenden Verzögerung haben. Diese Breite wird durch die Messroutine des Oszilloskops gemessen. Dazu werden die Pulse verwendet, die zu den fallenden Flanken beider Signale gehören (durchgezogen gezeichneter Puls in Abbildung 6.10). Die entsprechende Messung an den Pulsen, die zu den steigenden Flanken beider Signale gehören, kann an der gestrichelt gezeichneten Pulsform vorgenommen werden. Damit das Differenzsignal diese Pulse enthält, müssen die Steuersignale invertiert werden, bevor das Taktsignal von diesen invertierten Signalen subtrahiert wird. Dieses war aufgrund von Softwareproblemen des Oszilloskops nicht möglich.

Alle Messwerte der DORIC-Kanäle dieses Optoboards erfüllen die Anforderungen der Qualitätskontrolle. Es ist weiterhin auffällig, dass der eingestellte PIN-Strom ($50 \mu\text{A}$, $100 \mu\text{A}$ oder $1000 \mu\text{A}$) das Ergebnis der Messung einer Größe nicht beeinflusst.

6.1.4 Untersuchung der VCSEL-Signale

Die Messungen an den VCSEL-Signalen von BeO2097 wurden mit dem Aufbau, der in Abbildung 4.17 dargestellt ist, durchgeführt. Die Messungen wurden, wie im dazugehörigen Kapitel 4.2.3 diskutiert, vorgenommen.

Die folgenden Diagramme (Abb. 6.11 und 6.12) zeigen die gemessenen optischen Leistungen und die Anstiegs- sowie Abfallzeiten der VCSEL-Signale. Zur Messung wurde der Strom $I_{\text{set}} = 1.1$ mA, das entspricht 0.55 mA pro VDC (siehe Kapitel 3.3), an das Opto-board angelegt.

Bei beiden Messungen lag eine Spannung von $V_{\text{PIN}} = 10$ V am PIN-Dioden-Array der Messkarte VCSEL an. Die Möglichkeit, die Messung mit $V_{\text{PIN}} = 20$ V durchzuführen, wie in Kapitel 5.4.2 diskutiert, war zum Zeitpunkt dieser Messung noch nicht gegeben. Die

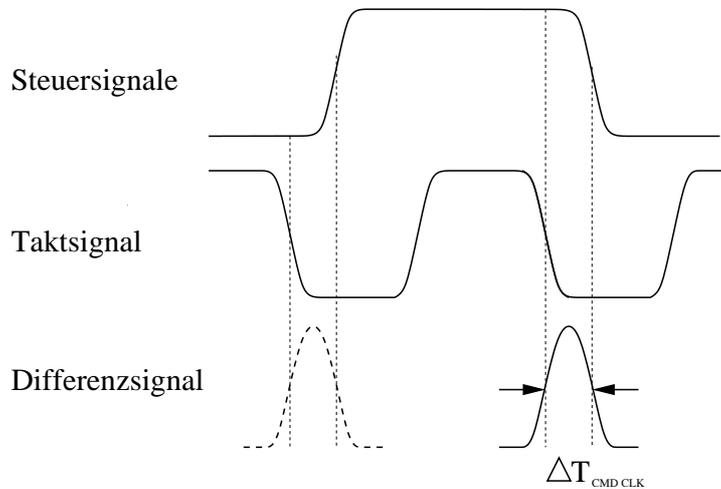


Abbildung 6.10: Prinzip der Messung der Verzögerungszeit von den Taktsignal- zu den Steuersignalfanken (schematisch)

Anstiegszeiten wurden mit den Messniveaus 20 % auf 60 %, die Abfallzeiten mit 80 % auf 40 % der Signalamplitude gemessen und beide durch Multiplikation mit dem Faktor 1.5 auf die korrekten Niveaus 20 % bis 80 % umgerechnet.

Die gemessene Anstiegszeiten der VCSEL-Signale des Kanals 6 liegen unterhalb des maximal zulässigen Werts von 1 ns, erreichen diesen aber innerhalb der Fehlergrenzen. Eine Nachmessung dieser Werte nach der Durchführung von Temperaturtests (s.u.) wird zeigen, ob dieser Kanal die Qualitätsanforderungen erfüllt. Die übrigen Messwerte der Anstiegs- und Abfallzeiten erfüllen die Qualitätsanforderungen.

Die gemessenen optischen Leistungen haben einen Fehler von 20 %, der die Messgenauigkeit des Aufbaus beschreibt (siehe Kapitel 5.4.2). Sie liegen für alle Kanäle über dem verlangten Wert von $500 \mu\text{W}$.

Alle Kanäle der Sendeeinheit erfüllen somit ebenso wie die der Empfangseinheit die Vorgaben der Qualitätssicherung.

Vor dem Einbau in den ATLAS-Detektor durchläuft jedes Optoboard zwei Temperaturtests. Im ersten wird es bei 60°C Umgebungstemperatur über drei Tage betrieben, d.h. Versorgungsspannungen und -ströme liegen am Optoboard an. Im zweiten wird es während zehn Temperaturzyklen betrieben, in denen die Umgebungstemperatur des Optoboards zwischen $+50^\circ\text{C}$ und -25°C periodisch variiert wird. Jeder Zyklus dauert etwa eineinhalb Stunden³. Die Messungen zur Qualitätsüberprüfung werden vor und nach diesen Temperaturtests durchgeführt. Die hier dargestellten Ergebnisse des Optoboards BeO2097 wurden vor den Temperaturtests gemessen. Erfüllt das Optoboard die Qualitätsanforderungen ebenso nachher, ist es für den Einbau in den Detektor qualifiziert.

³Die Temperaturtests werden an der Bergischen Universität Wuppertal durchgeführt.

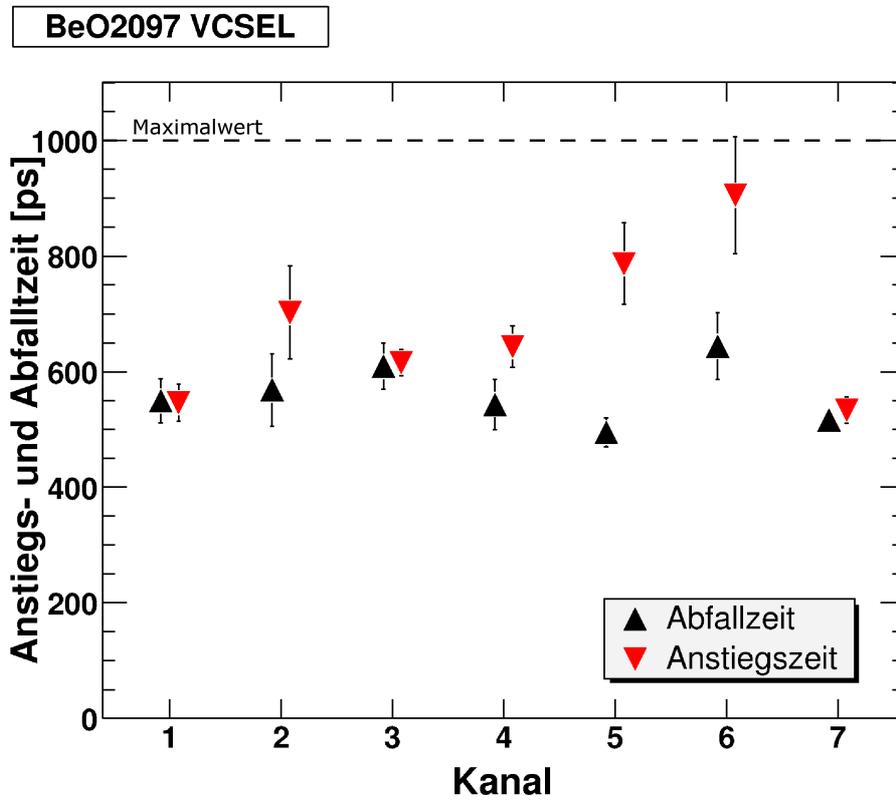


Abbildung 6.11: Anstiegs- und Abfallzeiten der VCSEL-Signale

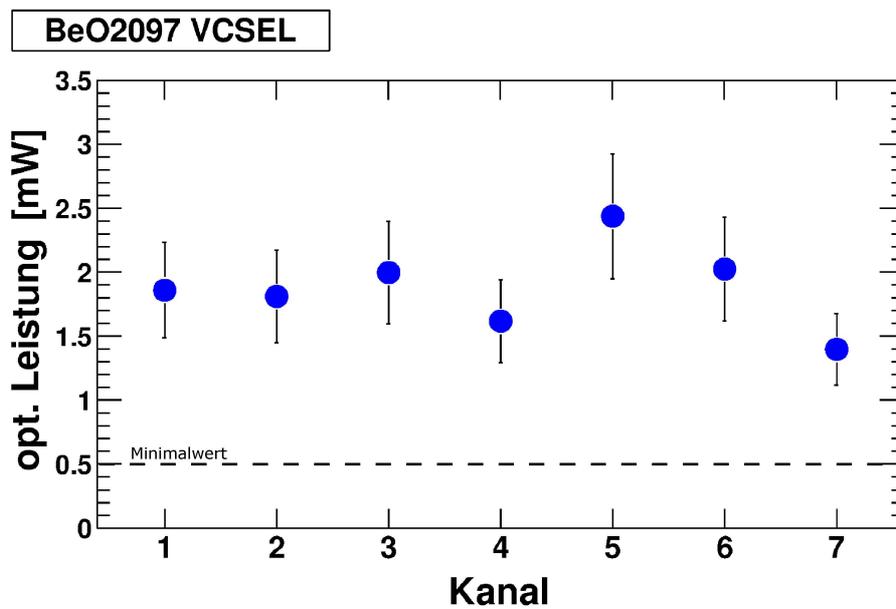


Abbildung 6.12: Optische Leistungen der VCSEL

6.2 Optoboard-Betrieb bei verschiedenen Betriebstemperaturen

Im ATLAS-Detektor werden die Optoboards auf $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ [MiZio] Betriebstemperatur gehalten. Das erfolgt durch den Kontakt ihrer Berylliumoxid-Platine (vgl. Kapitel 3.2) mit einem Rohr, in dem eine Kühlflüssigkeit fließt. Die Temperatur der Optoboards kann mit ihrem temperaturabhängigen Widerstand (NTC) kontrolliert werden.

Während des Betriebs von ATLAS ist es denkbar, dass die Betriebstemperatur verändert werden muss. Zum Beispiel könnte es nötig werden, die Temperatur der Kühlflüssigkeit zu senken, weil andere Komponenten, die mit dem selben Kühlkreislauf verbunden sind, auf eine niedrigere Betriebstemperatur gebracht werden müssen. Denkbar ist auch ein kurzzeitiger Ausfall des Kühlsystems.

Um das Verhalten der Optoboards bei erhöhten und verringerten Betriebstemperaturen zu studieren, wurden Untersuchungen an drei Optoboards (BeO2036⁴, BeO2097 und BeO3093) in einer Klimakammer⁵ durchgeführt. Den zugehörigen Aufbau zeigt Abbildung 6.13.

Messaufbau

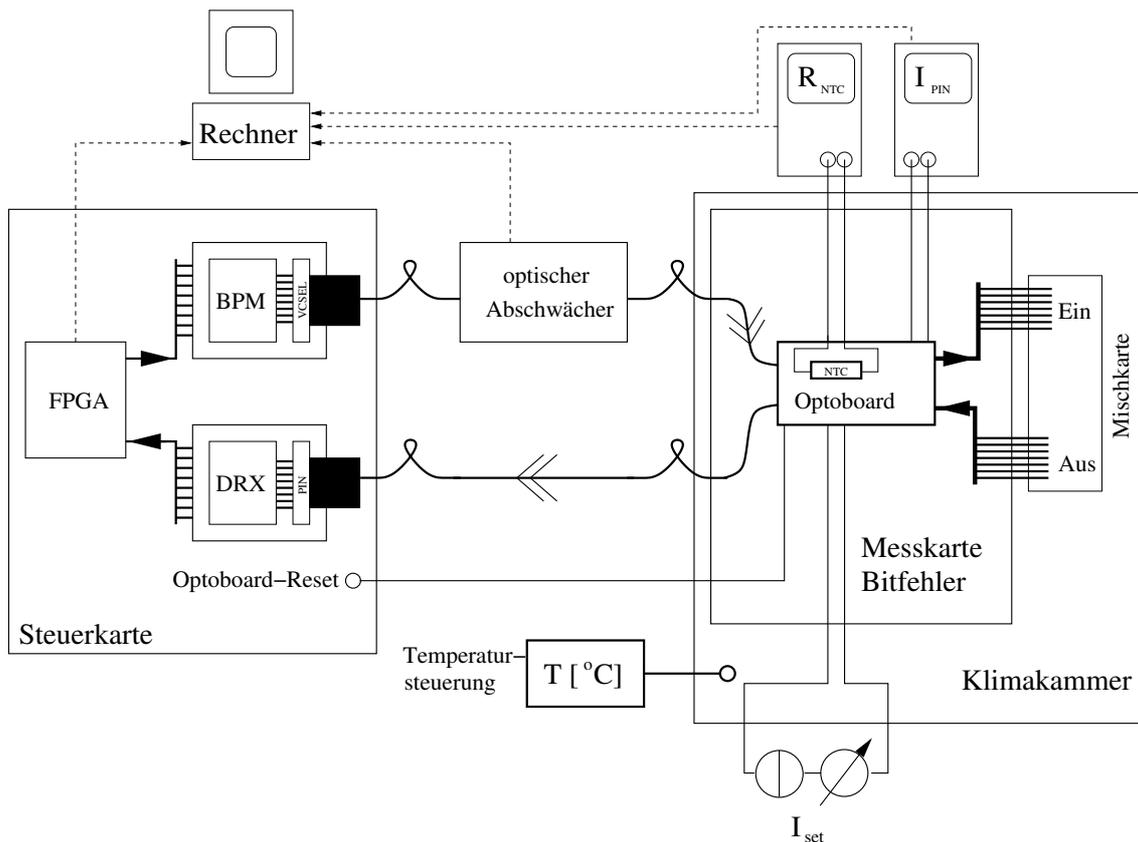


Abbildung 6.13: Aufbau zur Durchführung von Temperaturuntersuchungen an den Optoboards

In der Klimakammer befindet sich ein Optoboard auf der Messkarte Bitfehler. (Die Kom-

⁴Mit diesem Optoboard wurden Voruntersuchungen vorgenommen und nicht alle Messungen durchgeführt, wie mit BeO2097 und BeO3093.

⁵BinderTMMK 53

ponenten des Optoboard-Testsystems wurden in Kapitel 4 diskutiert.) Es empfängt über den optischen Abschwächer Signale der BPM-Karte (BPM 2), die sich auf der Steuerkarte außerhalb der Kammer befindet. Diese werden nach der Dekodierung durch die Empfangseinheit des Optoboards (PIN-Dioden und DORIC-Chips) von der Sendeeinheit (VDCs und VCSEL) optisch zurück zur DRX-Karte auf der Steuerkarte gesendet. Für die Rückspeisung der Signale von den Ausgängen der Empfangseinheit zu den Eingängen der Sendeeinheit des Optoboards wird die Mischkarte benötigt (die optische Bitfehler-Schwellenmessung ist beschrieben in Kapitel 4.2.2).

Durch den Strom I_{set} kann die optische Leistung der VCSEL des Optoboards so eingestellt werden, dass die optischen Ausgangssignale von der DRX-Karte korrekt empfangen werden. Dazu muss zu gegebenem PIN-Strom $I_{\text{PIN DRX}}$ ein passender DRX-Wert gesetzt werden, der anhand der Gleichung (5.1) errechnet werden kann.

Neben der Rückspeisung der optischen Signale des Optoboards zur DRX-Karte kann ihre Leistung mit der Messkarte VCSEL gemessen werden.

Das Strommessgerät eines Multimeters⁶ misst den PIN-Strom I_{PIN} , den die optischen Eingangssignale im PIN-Dioden-Array des Optoboards erzeugen. Ein weiteres Multimeter des gleichen Typs den Widerstandswert des NTCs. Aus dem Widerstandswert errechnet der Rechner mit den Koeffizienten aus Anhang B.2 die Temperatur des Optoboards.

Jedes Optoboard wurde bei Raumtemperatur (etwa 25 °C) auf die Messkarte in der Klimakammer aufgesetzt und in Betrieb genommen. Die Betriebsspannungen und -ströme lagen während der gesamten Dauer der Messung an. Nachdem die Klimakammer eine vorgegebene Umgebungstemperatur erreicht hatte, wurde zunächst das Erreichen einer konstanten Temperatur des Optoboards abgewartet. Danach wurde ein Messprogramm (s.u.) gestartet. Um Kondensation während der Veränderung der Temperatur in der Kammer zu verhindern, wurde diese mit getrockneter Luft geflutet.

Durchgeführte Untersuchungen

Bei den Temperaturen +50 °C, +25 °C, +10 °C, −5 °C und −20 °C in der Klimakammer wurde jeweils eine einheitliche Messprozedur durchgeführt. Ein Messprogramm auf einem Rechner führte nacheinander die Messungen der Bitfehler-Schwellen aller DORIC-Kanäle bei Betrieb nur eines VCSELs der BPM-Karte und bei Betrieb aller VCSEL, wie in Kapitel 5.3.4 diskutiert, der Bitfehlerrate über 10^{10} Bits und der optischen Leistung der VCSEL des Optoboards durch.

Zwischen den einzelnen Messungen wurde die Temperatur des Optoboards regelmäßig mit dem NTC gemessen.

6.2.1 Temperatur der Optoboards

Das folgende Diagramm (Abb. 6.14) zeigt die Temperatur der untersuchten Optoboards im Betrieb bei vorgegebener Temperatur in der Klimakammer.

Die Klimakammer hat ein eingebautes Thermometer, das die Temperatur im Inneren mit einem Fehler von unter ± 1 °C messen kann. Da ständig trockene Luft von etwa Raumtemperatur (20 °C) einfließt und ein Optoboard im Betrieb Wärme erzeugt, herrscht keine homogene Temperaturverteilung in der Kammer, d.h. die Temperatur kann lokal stärker als ± 1 °C vom Messwert des Thermometers abweichen.

In den folgenden Diagrammen wird daher stets die durch das Thermometer der Klimakammer und die durch den NTC des Optoboards gemessene Temperatur angegeben.

⁶Voltcraft™M3860

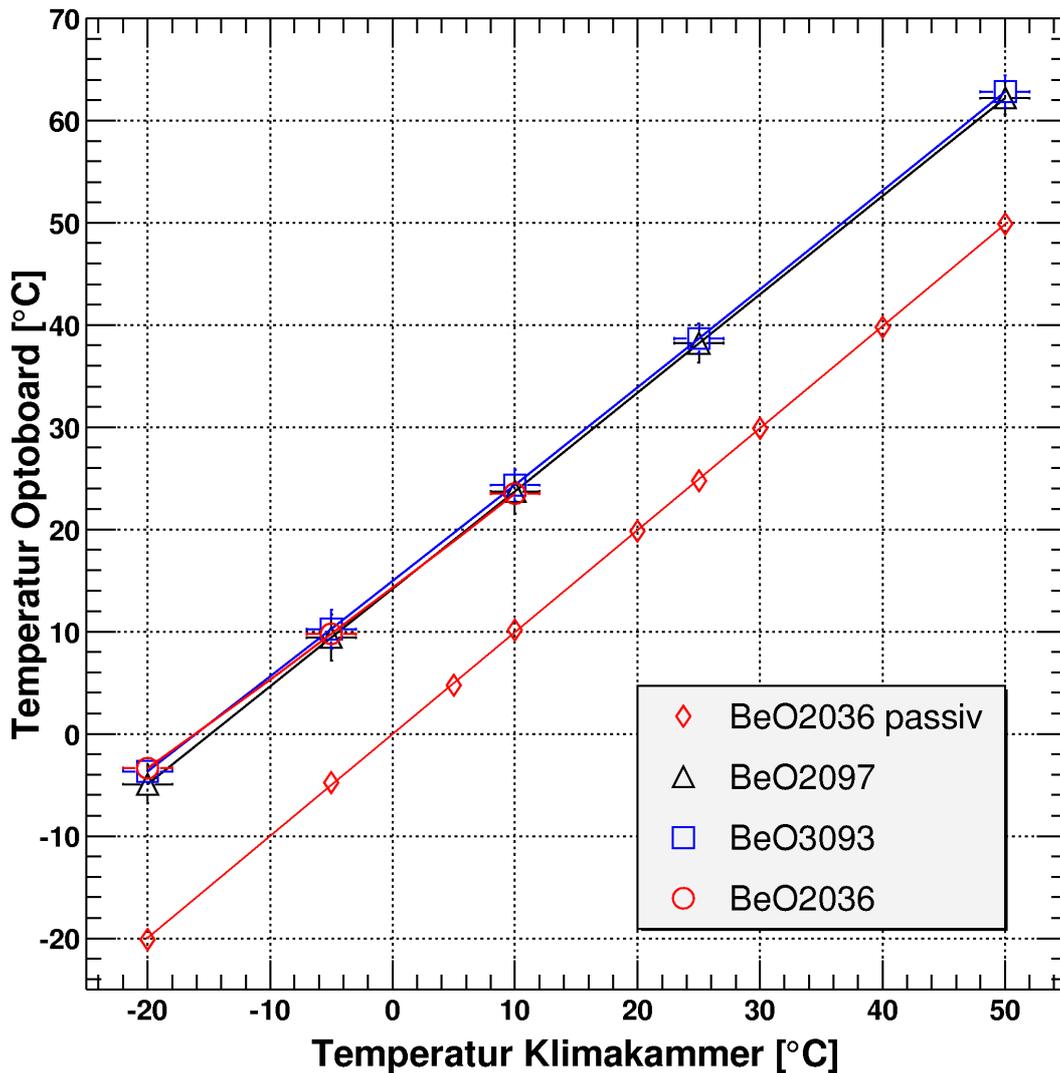


Abbildung 6.14: Betriebstemperatur der Optoboards

Dazu wurde mit dem Optoboard BeO2023 eine Vergleichsmessung vorgenommen. Die Temperatur in der Klimakammer wurde durch den NTC des passiven (ohne angelegte Betriebsspannungen oder -ströme) Optoboards gemessen, um so die Vergleichbarkeit der Temperaturmesswerte der Klimakammer mit den durch den NTC genommenen zu überprüfen. Die vorgegebene Temperatur der Klimakammer stimmt mit der nach ausreichender Ausgleichszeit durch den NTC des Optoboards gemessenen innerhalb von $\pm 0.5^\circ\text{C}$ überein (siehe Abb. 6.14). Da alle Optoboards die gleichen NTCs tragen, ist sichergestellt, dass diese die Temperatur mit einer Abweichung von höchstens $\pm 1.1^\circ\text{C}$ genau messen. Diese Abweichung ergibt sich aus der quadratischen Addition der Messgenauigkeit des Thermometers der Klimakammer $\pm 1^\circ\text{C}$ mit der Abweichung von 0.5°C zwischen den durch das Thermometer und durch den NTC gemessenen Temperaturen. Die Temperatur eines Optoboards im Betrieb liegt stets etwa 12°C bis 15°C über der Umgebungstemperatur. Sie verändert sich mit der Variation des Stroms I_{set} um $\pm 3^\circ\text{C}$. Der Strom I_{set} musste für die korrekte Rückspeisung der Signale der VCSEL zwischen $0.4\ \mu\text{A}$ und $0.6\ \mu\text{A}$ eingestellt werden. Die Messung der optischen Leistung wurde mit

$I_{\text{set}} = 1.1 \mu\text{A}$ und $0.5 \mu\text{A}$ vorgenommen.

Da die Leistungsaufnahme verschiedener Optoboards durch Fertigungstoleranzen leicht unterschiedlich ist (zwischen 0.6 W und 0.7 W), variiert die Temperatur zwischen ihnen bei vorgegebener Umgebungstemperatur und gleichem I_{set} um $\pm 2^\circ\text{C}$.

Unter dem Schutzdeckel der Trägerkarte (vgl. Abb. 4.8) kann ein Optoboard eine erhöhte Temperatur erreichen, als es ohne den Deckel annehmen würde. Es ist anzunehmen, dass die Erhöhung der Temperatur des Optoboards gegenüber der Umgebung ohne diesen Deckel geringer ist. Um eine Beschädigung der Optoboards zu vermeiden wurde auf eine Überprüfung verzichtet.

6.2.2 Bitfehler-Schwellen

Das folgende Diagramm (Abb. 6.15) zeigt das Ergebnis der Messung der Bitfehler-Schwellen bei verschiedenen Temperaturen der Klimakammer für die DORIC-Kanäle 1, 5 und 6 des Optoboards BeO2097. Jeder Messpunkt entspricht dem Mittelwert von fünf einzelnen Messungen mit der Standardabweichung als Fehler. Als Konstante ist zusätzlich jeweils der Mittelwert der fünf Messpunkte eines Kanals eingezeichnet. Der Fehler der Temperatur ist, wie oben diskutiert, $\pm 1.1^\circ\text{C}$.

Die gemessenen Bitfehler-Schwellen liegen jeweils unter $14 \mu\text{A}$ und erfüllen damit die Qualitätsanforderungen. Wie anhand der eingezeichneten Mittelwerte ersichtlich, sind sie unabhängig von der Temperatur. Das zeigen auch die übrigen Kanäle von BeO2097 und die entsprechenden Messwerte von BeO3093.

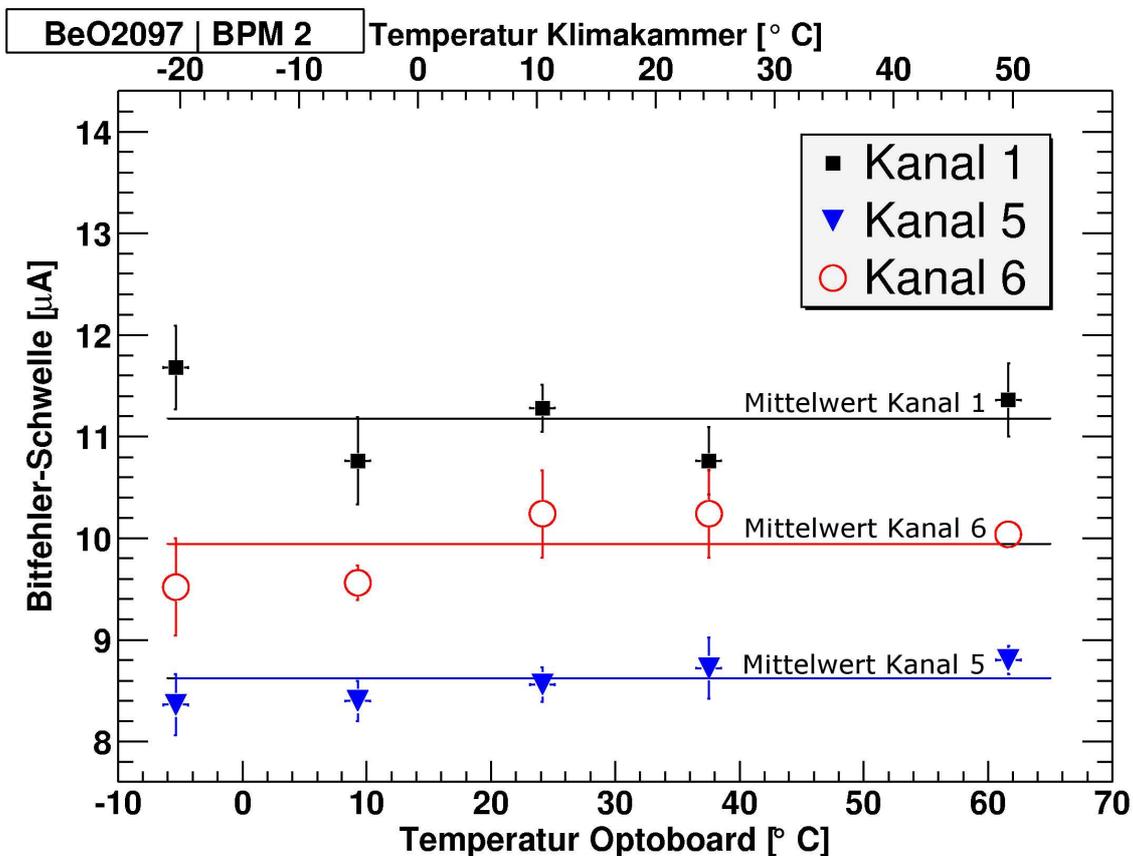


Abbildung 6.15: Bitfehler-Schwellen bei verschiedenen Temperaturen

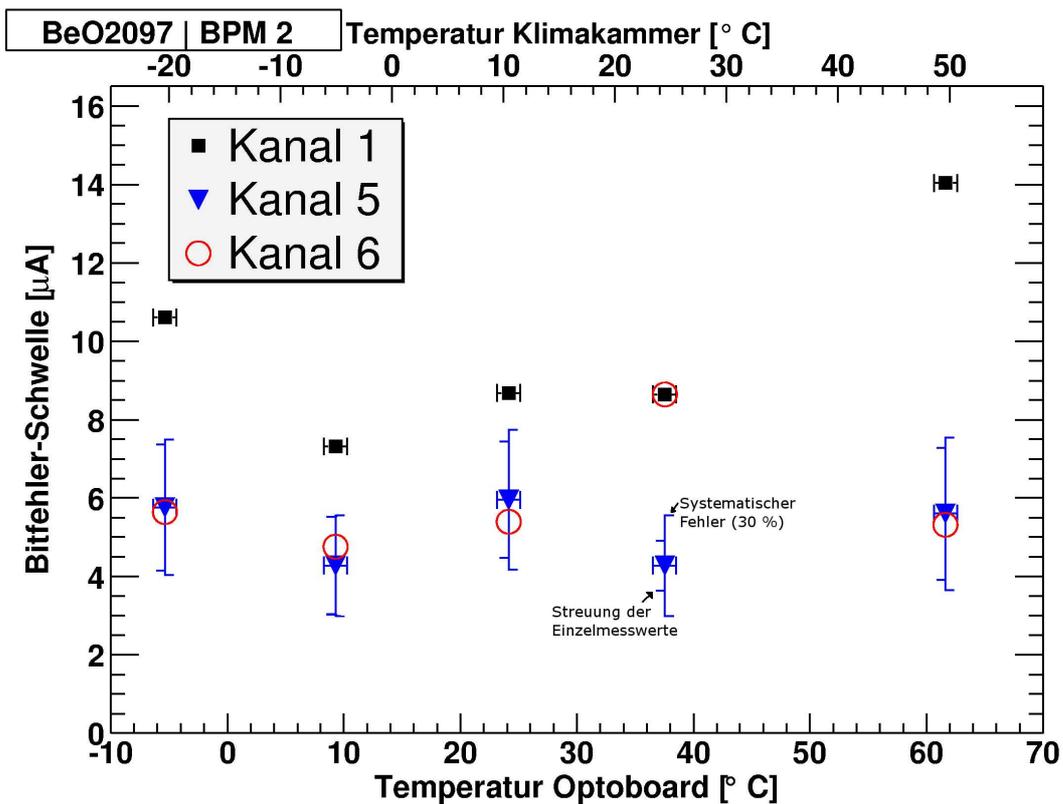


Abbildung 6.16: Bitfehler-Schwellen bei gleichzeitigem Betrieb der Nachbarkanäle bei verschiedenen Temperaturen

Zusätzlich wurden die Bitfehler-Schwellen unter gleichzeitigem Betrieb der Nachbarkanäle, wie in Kapitel 5.3.4 diskutiert, fünfmal gemessen. Das Diagramm in Abbildung 6.16 zeigt die Mittelwerte dieser Messungen für die gleichen DORIC-Kanäle, die auch im Diagramm in Abbildung 6.15 dargestellt sind. Alle Messpunkte haben einen systematischen 30-%igen Fehler, der in Kapitel 5.3.4 begründet wurde. Die zugehörigen Fehlerbalken sind nur für Kanal 5 ins Diagramm eingezeichnet. Unter Berücksichtigung dieses Fehlers sind die gemessenen Bitfehler-Schwellen jedes Kanals bei Variation der Temperatur konstant. Zusätzlich sind an die Messpunkte von Kanal 5 die Fehlerbalken der Streuung der fünf Einzelmessungen eingetragen. Diese hat jeweils etwa die gleiche Größe wie der systematische Fehler.

Für den Kanal 1 stimmen die durch beide Messmethoden ermittelten Werte innerhalb ihrer Fehlergrenzen überein. Für die beiden anderen Kanäle werden mit der Messmethode bei gleichzeitigem Betrieb der Nachbarkanäle (Abb. 6.16) bis zu 50 % niedrigere Schwellen gemessen.

Es gibt dafür zwei mögliche Erklärungen:

- Die Bitfehler-Schwelle eines DORIC-Kanals könnte bei gleichzeitigem Betrieb seiner Nachbarkanäle niedriger sein.
- Im Fall eines Optoboards, auf dem die PIN-Diode direkt mit den Eingängen der DORICs verbunden ist, könnte der Abschaltvorgang (vgl. Kapitel 5.3.4) den PIN-Strom stärker als 30 % fallen lassen.

Gemittelt über alle Kanäle der beiden untersuchten Optoboards liegen die Werte der

Bitfehler-Schwellen, die bei gleichzeitigem Betrieb der Nachbarkanäle gemessen wurden, 25 % unterhalb den entsprechenden Messwerten, die mit der Methode gemessen wurden, bei der nur ein DORIC-Kanal Signale empfängt.

Dieser Wert ist durch den 30 %-igen systematischen Fehler der Messmethode bei gleichzeitigem Betrieb der Nachbarkanäle erklärbar, so dass beide Messmethoden miteinander verträgliche Werte liefern.

6.2.3 Optische Leistung der VCSEL

Das Diagramm in Abbildung 6.17 zeigt die Ergebnisse der Leistungsmessungen der VCSEL des Optoboards BeO2097. Das entsprechende Diagramm für BeO3093 ist nicht dargestellt, da es gleichwertige Ergebnisse zeigt. Die Leistungen der VCSEL des Optoboards BeO2036 wurden nicht untersucht.

Die Leistung wurde bei Strömen $I_{set} = 1.1 \mu A$ (entspricht $I_{set} = 0.55 \mu A$ pro VDC) und $I_{set} = 0.5 \mu A$ (entspricht $I_{set} = 0.25 \mu A$ pro VDC) gemessen.

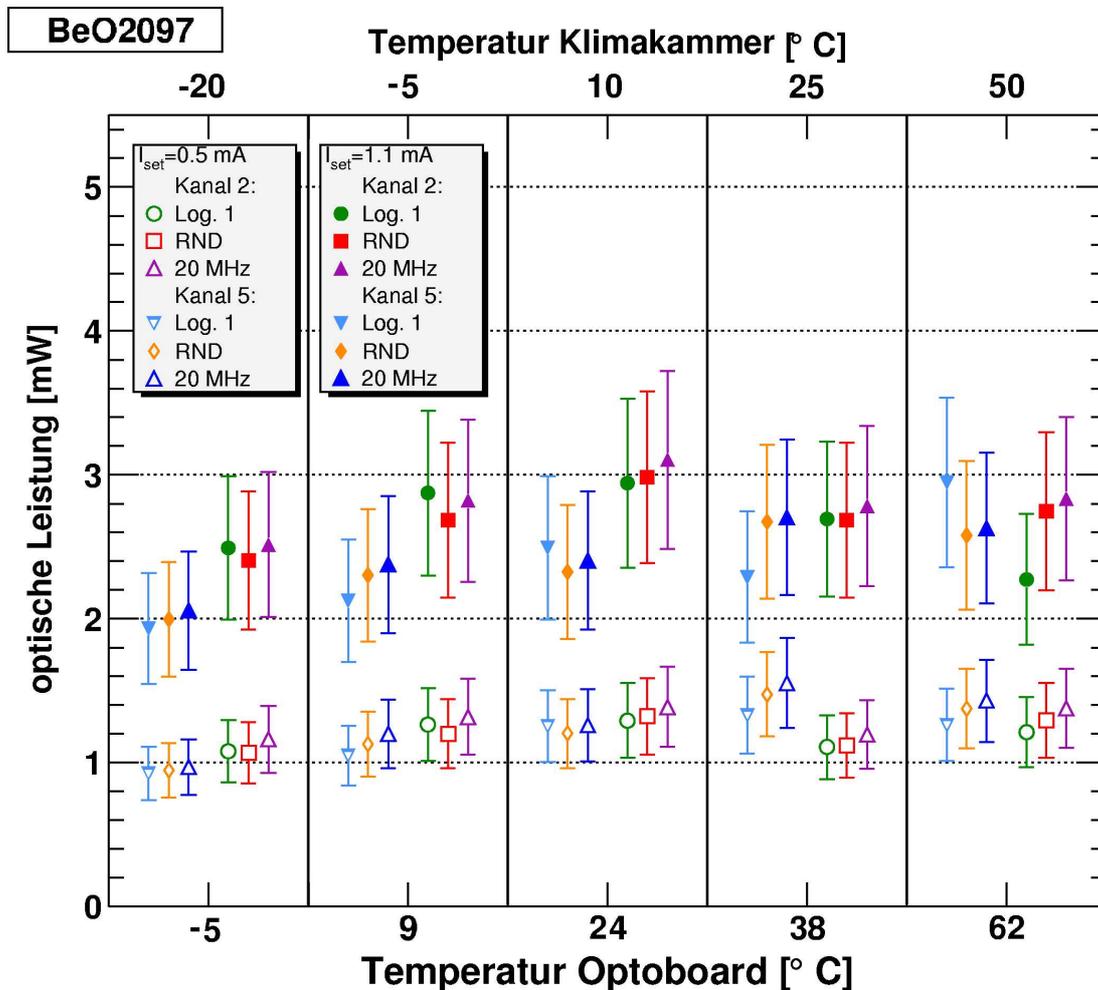


Abbildung 6.17: Optische Leistungen bei verschiedenen Temperaturen

In dem obigen Diagramm (Abb 6.17) ist als Fehler jedes Messpunkts der systematische Messfehler von 20 %, der die Messgenauigkeit des Messaufbaus beschreibt, eingezeichnet

(vgl. Kapitel 5.4.2). Als Temperatur des Optoboards ist der Mittelwert der mit dem NTC vor und nach der Messung bestimmten Temperatur des Optoboards eingetragen.

Die eingetragenen Messpunkte entsprechen einmaligen Messungen der optischen Leistung. Diese wurde für drei Ausgangssignale der VCSEL (Logisch 1, zufällige Signale und einen 20 MHz-Takt) gemessen. Dabei ist die Amplitude der optischen Leistung, d.h. die Leistung für Logisch 1 des Messsignals gezeigt. Die Messwerte, die zu den zufälligen Signalen und dem 20 MHz-Taktsignal gehören, wurden mit dem Faktor 2 multipliziert, um die Leistung für Logisch 1 zu errechnen. Durch die Rückspeisung senden die VCSEL die Signale, die das Optoboard zuvor von der BPM-Karte empfangen hat. Da die BPM-Karte kein 40 MHz-Taktsignal senden kann, konnte die von den Vorgaben der Qualitätssicherung vorgeschriebene Messung der optischen Leistung an einem 40 MHz-Taktsignal (siehe Tabelle 3.1) nicht vorgenommen werden.

Die gemessene optische Leistung für den nominalen Strom $I_{\text{set}} = 1.1 \mu\text{A}$ beträgt für die gemessenen Signale jedoch stets mehr als 0.5 mW, dem Wert der Qualitätsanforderung. Da dieser geforderte Wert bei den Messungen der optischen Leistung für alle drei Signalformen und bei allen Temperaturen um mindestens einen Faktor 3 übertroffen wird, ist anzunehmen, dass die Qualitätsanforderung jeweils auch für ein 40 MHz Taktsignal erfüllt ist.

Aufgrund der zu kleinen Messgenauigkeit kann keine Aussage zur Abhängigkeit der optischen Leistung von der Umgebungstemperatur getroffen werden. Zusätzlich ist nicht erkennbar, dass für ein bestimmtes Ausgangssignal der VCSEL systematisch höhere optische Leistungen gemessen werden. Das wäre der Fall, wenn z.B. die optische Leistung für das Niveau Logisch 1 z.B. bei dem 20 MHz-Taktsignal nicht mehr das Niveau von permanent Logisch 1 erreichen würde.

Um eine genauere Aussage der Temperaturabhängigkeit der optischen Leistung machen zu können, müsste ihre Entwicklung über längere Zeiträume bei unverändertem Aufbau und unter stetiger Variation der Umgebungstemperatur gemessen werden. Die hier vorgenommenen Einzelmessungen erfolgten mit ständig verändertem Aufbau, da das Faserband auf der DRX-Karte zur Messung in die Messkarte VCSEL umgesteckt werden musste.

6.2.4 Bitfehlerrate

Die Bitfehlerrate der Optoboards (BeO2036, BeO2097 und BeO3093) wurde bei PIN-Strömen in die DORIC-Kanäle von $100 \mu\text{A}$ und $50 \mu\text{A}$ gemessen. Dabei wurden alle DORIC-Kanäle mit optischen Eingangssignalen betrieben, d.h. der durch das Multimeter gemessene Gesamt-PIN-Strom im PIN-Dioden-Array des Optoboards hat in diesem Fall $700 \mu\text{A}$ bzw. $350 \mu\text{A}$ betragen. Durch eine Ausgleichsprozedur für die optische Leistung der VCSEL der BPM-Karte (BPM 2) im Programmablauf konnte erreicht werden, dass dieser Gesamt-PIN-Strom sich aus etwa gleich großen Teilströmen in den einzelnen sieben Dioden des PIN-Dioden-Arrays zusammensetzte. Nach Ausführung dieser Ausgleichsprozedur zur Einstellung von $I_{\text{PIN}} = (100 \pm 30) \mu\text{A}$ in jeder Diode, wurde mit jedem DORIC-Kanal eine Bitfehlerzählung durchgeführt. Anschließend wurde die gleiche Ausgleichsprozedur erneut aufgerufen und eine weitere Bitfehlerzählung jedes DORIC-Kanals bei $I_{\text{PIN}} = (50 \pm 20) \mu\text{A}$ vorgenommen.

Das Diagramm in Abbildung 6.18 zeigt die gemessenen Bitfehlerraten und gezählten Bitfehlerzahlen der Optoboards BeO2097, BeO3093 und BeO2036 für den PIN-Strom $I_{\text{PIN}} = (100 \pm 30) \mu\text{A}$. Dabei entspricht jeder eingetragene Messpunkt der Bitfehlerrate und Bitfehlerzahl des Empfangskanals, dessen Bitfehlerrate unter den sieben DORIC-Kanälen eines Optoboards am größten war. D.h., die Bitfehlerrate jedes DORIC-Kanals

eines Optoboards ist kleiner oder gleich der eingetragenen Bitfehlerrate.

Traten keine Bitfehler auf, so ist die Bitfehlerzahl mit 80 %-Konfidenzniveau kleiner als 1.8 [Reg]. Die Bitfehlerrate liegt dann (mit 80 % Konfidenzniveau) unter $1.8 \cdot 10^{-10}$ (siehe auch Kapitel 5.3.1). In diesem Fall ist $1.8 \cdot 10^{-10}$ als obere Grenze angegeben und die zugehörigen Messpunkte mit 0 Bitfehler bezeichnet. Das darauf folgende Diagramm (Abb. 6.19) zeigt die entsprechende Untersuchung für PIN-Ströme von $I_{\text{PIN}} = (50 \pm 20) \mu\text{A}$.

BeO2036

Mit dem Optoboard BeO2036 wurde eine Voruntersuchung nur bei Temperaturen der Klimakammer von $+10^\circ\text{C}$, -5°C und -20°C durchgeführt. Aufgrund des Messaufbaus und äußerer elektrischer Einflüsse (Aktivieren und Deaktivieren der Leuchtstoffröhren der Deckenbeleuchtung verursachte Bitfehler) liegt die Bitfehlerrate der Empfangskanäle dieses Optoboards oberhalb von 10^{-8} . Eine entsprechende Vergleichsmessung, die vor und nach dieser Untersuchung außerhalb der Klimakammer durchgeführt wurde, ergab keine Bitfehler in 10^{10} Bits, so dass die erhöhte Bitfehlerrate nicht auf eine Beschädigung des Optoboards zurückzuführen ist. Für die Messungen der Optoboards BeO3093 und BeO2097 wurde der Messaufbau optimiert (insbesondere die elektrischen und optischen Verbindungen).

BeO2097

Für den PIN-Strom $I_{\text{PIN}} = (100 \pm 30) \mu\text{A}$ liegt die Bitfehlerrate aller DORIC-Kanäle von BeO2097 unter $1.8 \cdot 10^{-10}$. Für die Umgebungstemperaturen 25°C und 50°C trat ein einziger Bitfehler auf. Insgesamt ist die Anzahl gezählter Bits jedoch zu gering, um einen Einfluss der Umgebungstemperatur auf die Bitfehlerrate nachzuweisen.

Für den halbierten PIN-Strom von $I_{\text{PIN}} = (50 \pm 20) \mu\text{A}$ ist die Fehlerrate bei -5°C erhöht. Ein DORIC-Kanal (3) hat bei dieser Temperatur fünf Bitfehler gezählt. Es wurde nicht festgestellt, ob diese Fehler durch ein einmaliges Ereignis auftraten oder verstreut gemessen wurden. Für 50°C Umgebungstemperatur wurde eine erhöhte Bitfehlerrate (etwa 10^{-8}) gemessen (Kanal 1: 74 Bitfehler, Kanal 3: 47 Bitfehlerfehler, alle übrigen Kanäle fehlerfrei).

BeO3093

Analog zu BeO2097 liegt für den PIN-Strom von $I_{\text{PIN}} = (100 \pm 30) \mu\text{A}$ die Bitfehlerrate aller DORIC-Kanäle von BeO3093 unter $1.8 \cdot 10^{-10}$. Es traten keine Bitfehler auf.

Bei dem verringerten PIN-Strom von $I_{\text{PIN}} = (50 \pm 20) \mu\text{A}$ und Umgebungstemperatur 10°C beträgt die Bitfehlerrate $2 \cdot 10^{-9}$. Für einen DORIC-Kanal wurden 20 Bitfehler gezählt, die übrigen Kanäle hatten keine Bitfehler. Die Messung bei der Temperatur von 50°C in der Klimakammer lieferte erhöhte Bitfehlerraten. Zwar traten für die DORIC-Kanäle 1 und 2 keine Bitfehler auf, die nachfolgend gemessenen Kanäle (3 bis 7) wiesen jedoch eine stark erhöhte Bitfehlerzahl auf. Durch eine Vergleichsmessung mit elektrischer Rückspeisung konnte der korrekte Betrieb der DORIC-Kanäle überprüft werden.

Beide Optoboards weisen bei 50°C und $I_{\text{PIN}} = (50 \pm 30) \mu\text{A}$ eine erhöhte Bitfehlerrate auf. Da die Nachmessung mit elektrischer Rücksspeisung für BeO3093 keine Bitfehler ergab, könnte der Grund für die erhöhte Bitfehlerzahl in der Sendeeinheit des Optoboards liegen. Zur ursprünglichen Messung wurde das Optoboard jedoch zeitlich deutlich länger

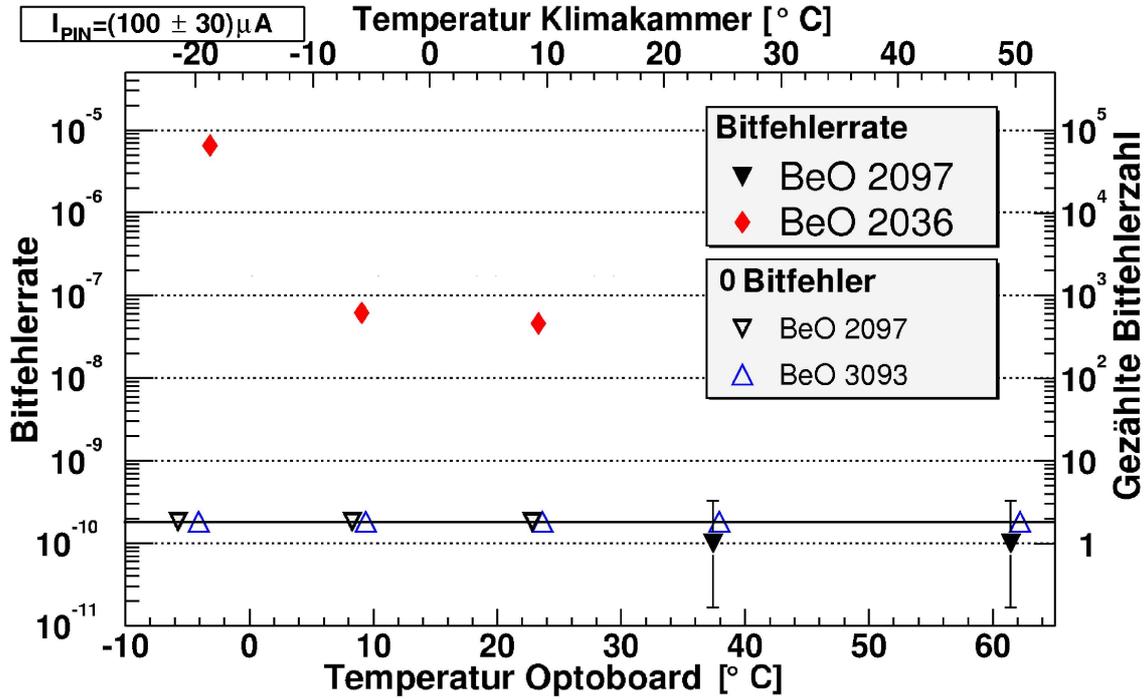


Abbildung 6.18: Bitfehlerraten bei verschiedenen Temperaturen für $I_{PIN} = (100 \pm 30) \mu A$

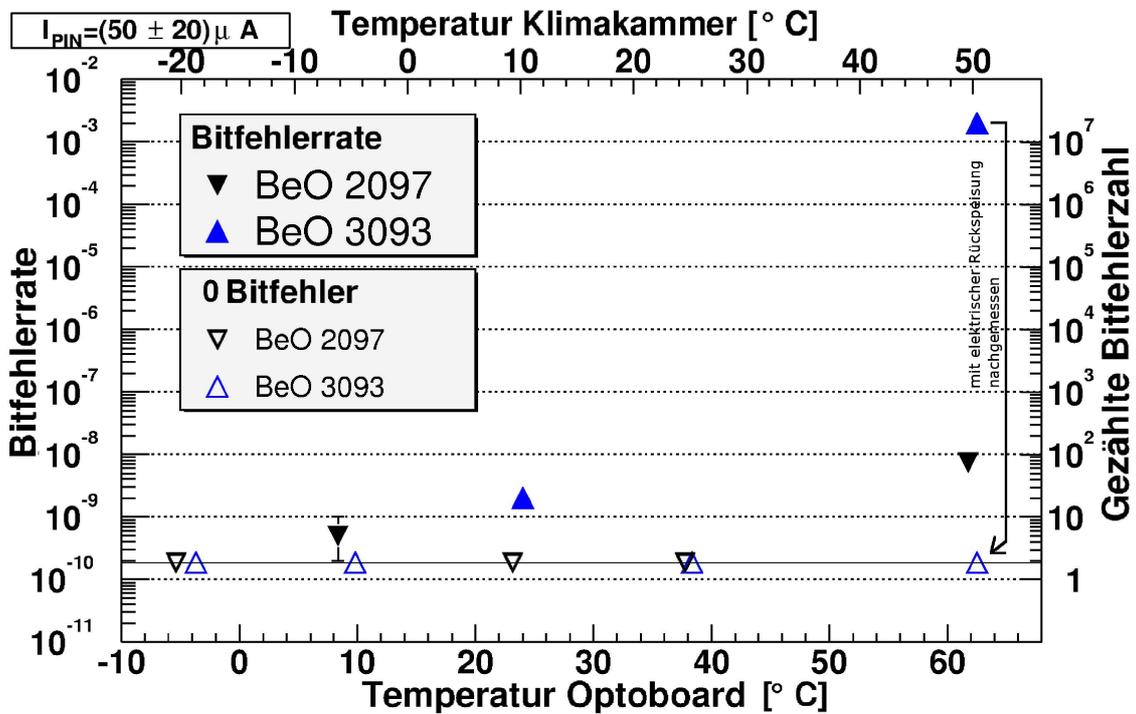


Abbildung 6.19: Bitfehlerraten bei verschiedenen Temperaturen für $I_{PIN} = (50 \pm 20) \mu A$

(etwa zwei Stunden) bei der hohen Temperatur betrieben, im Fall der Nachmessung wurde mit der Bitfehlerzählung direkt nach Erreichen von $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ begonnen. Daher ist auch eine Beeinträchtigung der Empfangseinheit des Optoboards durch langen Betrieb bei hohen Temperaturen eine mögliche Erklärung.

Eine Schwachstelle der Messung ist es, dass nicht ermittelt wurde, ob Bitfehler durch einmalige Ereignisse oder verstreut auftraten. Wenn der korrekte Betrieb des Optoboards durch die Umgebungstemperatur eingeschränkt wird, sind verstreut über die 10^{10} Bits auftretende Bitfehler zu erwarten.

Ziel dieser Untersuchungen war es, festzustellen, ob sich der Wert der Bitfehler-Schwelle eines DORIC-Kanals mit Veränderung der Temperatur erhöht. In Kapitel 6.2.2 konnte die Konstanz der Bitfehler-Schwelle für Temperaturen des Optoboards von $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ festgestellt werden. Die bei Raumtemperatur, d.h. $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ Umgebungstemperatur und $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ Betriebstemperatur des Optoboards, im Labor gemessenen Bitfehler-Schwellen sind somit die gleichen wie für $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ im Detektor.

Die Messung der Bitfehlerrate über 10^{10} Bits hat gezeigt, dass bei nominalem PIN-Strom von $100\text{ }\mu\text{A}$ auch bei kurzzeitigem Betrieb bei der erhöhten Temperatur von $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ keine erhöhte Fehlerrate zu erwarten ist. Für diese Messungen wurde ein Optoboard etwa 2.5 h bei jeder Umgebungstemperatur gehalten. Dieses ist zu kurz, um langfristige Folgen des Betriebs bei extremen Temperaturen zu beobachten.

Bei dem halben nominalen PIN-Strom wurden jedoch für $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ erhöhte Fehlerraten gemessen, daher kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Bitfehler-Schwelle durch längeren Betrieb des Optoboards (mehr als drei Stunden) bei diesen Temperaturen ansteigt.

Da die Optoboards im Experiment nicht bei solch hohen Temperaturen betrieben werden, wurde auf eine langfristige Messung verzichtet.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Der ATLAS-Detektor (A Torodial LHC Apparatus) wird im Jahr 2007 am Large-Hadron-Collider (LHC) am europäischen Zentrum für Teilchenphysik CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) in Betrieb gehen. Im Zentrum dieses Teilchendetektors werden gegenläufige Protonen mit einer Schwerpunktsenergie von 14 TeV wechselwirken. Die dem Wechselwirkungspunkt am nächsten liegende Detektorkomponente ist ein Silizium-Pixel-Detektor. Die fein segmentierten Pixel-Module dieses Pixel-Detektors werden es ermöglichen, die Flugbahnen der Teilchen zu rekonstruieren, die vom Wechselwirkungspunkt der Protonen ausgehen.

Die Übertragung der dafür genommenen Daten zur Datennahmestation mit stetig niedriger Fehlerrate ($< 5 \cdot 10^{-10}$) ist eine Voraussetzung für den Erfolg des ATLAS-Experiments. Diese Kommunikation der Pixel-Module mit den externen Steuereinheiten wird über eine optische Datenübertragungsstrecke erfolgen, die im Zentrum dieser Arbeit stand.

Im Kapitel 1 wurden zunächst die physikalischen Ziele des ATLAS-Experiments und der Aufbau seiner Detektoren behandelt. Dabei wurde insbesondere der Aufbau des Pixel-Detektors und der Pixel-Module erläutert.

Die optische Datenübertragungsstrecke für den Betrieb des Pixel-Detektors, ermöglicht beide Richtungen der Datenübertragung: Aus dem Detektor werden über einen Sendekanal pro Pixel-Modul Messdaten ausgelesen und im Detektor für jedes Pixel-Modul über einen Empfangskanal Steuersignale und das Taktsignal von den externen Kontrolleinheiten übernommen. Die dafür benötigten detektorseitigen Sendeeinheiten bestehen aus Halbleiterlasern (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL) und speziellen strahlungsresistenten Treiber-Chips (VCSEL-Driver Chip, VDC), die Empfangseinheiten aus PIN-Dioden und ebenfalls strahlungsresistenten Chips zur Dekodierung der empfangenen Steuersignale (Digital-Opto-Receiver-Integrated-Circuit, DORIC). Diese beiden Typen Chips wurden von der Universität Siegen in Kooperation mit der Ohio-State-University für die Anforderungen im ATLAS-Detektor entwickelt. Sie werden auf speziellen keramischen Platinen montiert.

An den beiden oben genannten Universitäten findet im Jahr 2005 auch die Produktion dieser detektorseitigen Bestandteile der Datenübertragungsstrecke statt. Diese besteht im Bestücken der vorgefertigten Platinen mit den Chips sowie den Dioden und Lasern. Die fertig gestellten Einheiten, Optoboards genannt, werden standardisierten Qualitätsuntersuchungen unterzogen, die die korrekte Funktion der Optoboards im späteren Betrieb im ATLAS-Detektor sicherstellen sollen.

Das Funktionsprinzip der Datenübertragungsstrecke und der Aufbau der Optoboards wurden im Kapitel 3 erläutert.

In Siegen werden 100 von etwa 300 benötigten Optoboards gefertigt. Zur Durchführung der Qualitätsuntersuchungen wurde ein Testsystem entwickelt. Dieses bietet die Möglichkeit, der Empfangseinheit eines Optoboards optische Signale zu senden und die elektrischen Signale zu untersuchen, die das Optoboard aus diesen Eingangssignalen erzeugt. Ebenso erlaubt das Testsystem, die Sendeeinheit eines Optoboards mit elektrischen Signalen zu

versorgen und die optischen Signale, die daraus erzeugt werden, zu untersuchen. Zusätzlich können mit dem Testsystem Bitfehleranalysen an der Empfangseinheit eines Optoboards durchgeführt werden.

Die zentrale Steuereinheit des Testsystems (Steuerkarte) verwendet als optische Sende- und Empfangseinheiten Bauteile, die für den Betrieb der Datenübertragungsstrecke auf der Seite außerhalb des ATLAS-Detektors entwickelt wurden. Der Großteil seiner Bestandteile, insbesondere die Steuerkarte, und ein Abschwächer für optische Signale wurden speziell für die Durchführung der Qualitätsuntersuchungen entwickelt.

Zusätzlich zur Entwicklung dieser Hardware wurden passende Programme erstellt, mit denen das Testsystem von einem Rechner aus gesteuert werden kann. Die standardisierten Qualitätskontrollen können mit Hilfe dreier Messprogramme automatisiert durchgeführt werden, was an einem Optoboard in etwa 40 Minuten möglich ist. Daneben können mit dem Testsystem und weiteren Steuerprogrammen verschiedenste weitergehenden Untersuchungen der Eigenschaften der Optoboards vorgenommen werden.

Das Optoboard-Testsystem und die automatisierte Durchführung der Qualitätskontrollen wurden in Kapitel 4 diskutiert. Elementare Funktionen, wie z.B. einem Empfangskanal eines Optoboards zu Testzwecken optische Signale zu senden, sind in Unterprogrammen der Steuersoftware realisiert. Diese sind in Anhang C dokumentiert.

Um die Qualitätskontrollen an fertig gestellten Optoboards korrekt durchführen zu können, wurden die Eigenschaften der Komponenten des Testsystems, insbesondere die des optischen Abschwächers und der Empfangseinheit für optische Signale auf der Steuerkarte, untersucht.

Dabei konnte die optimale Methode bestimmt werden, die Leistung der optischen Signale, die von der zentralen Steuereinheit zu einem Optoboard laufen, auf Sollwerte einzustellen. Es zeigte sich, dass der speziell entwickelte optische Abschwächer in der Lage ist, die Intensität optischer Signale unter Beibehaltung der Signalqualität zu reduzieren. Mit diesem Abschwächer ist es möglich, die Bitfehlerrate der Empfangseinheit eines Optoboards in Abhängigkeit der optischen Eingangsleistung zu messen. Insbesondere die Bitfehlerschwelle, d.h. der Minimalwert der Eingangsleistung für den korrekten Empfang, kann bestimmt werden.

Diese Untersuchungen ermöglichen es, die Qualitätsmessungen der produzierten Optoboards den Messvorschriften entsprechen auszuführen.

Zusätzlich wurden Parameter für den fehlerfreien Empfang optischer Signale durch die Empfangseinheit auf der Steuerkarte bestimmt. Die Kenntnis dieser Parameter ist eine Voraussetzung zur Durchführung von Bitfehleranalysen im Loop-Back-Modus. Das bedeutet, von der Steuerkarte können der Empfangseinheit eines Optoboards optische Signale gesendet werden, die von der Sendeeinheit des Optoboards optisch zur Steuerkarte zurückgespeist werden. Auf der Steuerkarte können die zum Optoboard gesendeten Signale mit den, von der Sendeeinheit des Optoboards zurück empfangenen Signalen verglichen werden. Aus beiden Signalen kann die Zahl falsch übertragener Bits ermittelt werden. Auf diese Weise kann die korrekte Funktion der Sende- und der Empfangseinheit eines Optoboards gleichzeitig überprüft werden.

Diese Untersuchungen wurden in Kapitel 5 vorgestellt.

Mit dem Testsystem wurden von April bis September 2005 etwa 60 Optoboards den Testroutinen der Qualitätssicherung unterzogen. Etwa 10 % dieser Optoboards erfüllen die Anforderungen nicht, da bei diesen in der Montage der Chips sowie der Laser und Di-

oden Fehler aufgetreten sind, die nur zum Teil reparabel waren. Alle fehlerfrei gefertigten Optoboards erfüllen die Qualitätsanforderungen.

Diese korrekt arbeitenden Optoboards sind für den Einbau in den Detektor qualifiziert. Ihre Betriebstemperatur wird dort bei etwa $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ [MiZio] liegen und durch ein Kühlsystem, mit dem weitere Detektorkomponenten verbunden sind, konstant gehalten. Um den Einfluß einer Veränderung der Betriebstemperatur zu untersuchen, wurden Funktionstests von drei Optoboards im Loop-Back-Modus bei Umgebungstemperaturen zwischen $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ in einer Klimakammer durchgeführt. Die Temperatur eines Optoboards mit angelegten Betriebsspannungen und -strömen liegt aufgrund der Leistungsaufnahme stets etwa $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ über der Umgebungstemperatur.

Die Bitfehler-Schwellen wurde für Betriebstemperaturen von $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ des Optoboards konstant gemessen. Bei stark erhöhten Temperaturen des Optoboards von über $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ kann der korrekte Betrieb aller Empfangs- und Sendekanäle über längere Zeiträume jedoch nicht garantiert werden.

Diese Messungen in der Klimakammer haben gezeigt, dass mit dem in Siegen entwickelten Optoboard-Testsystem Loop-Back-Messungen zuverlässig möglich sind.

In Kapitel 6 wurden die Ergebnisse der standardisierten Qualitätsuntersuchungen für ein Optoboard (BeO2097) ausführlich dargestellt, in Anhang D die Ergebnisse der analogen Untersuchung an 9 weiteren Optoboards. Zusätzlich beinhaltet dieses Kapitel die Ergebnisse der Untersuchungen des Betriebs der drei Optoboards (BeO2097, BeO3093 und BeO2036) unter veränderten Umgebungstemperaturen.

Die Produktionsphase der Optoboards wird im November 2005 beendet sein. Ihr Einbau in den ATLAS-Detektor wird in den darauf folgenden Monaten geschehen. Bestandteile des in Siegen entwickelten Testsystem, insbesondere die Steuerkarte und der optische Abschwächer, werden zur Durchführung von Funktionskontrollen der eingebauten Optoboards dienen. Dabei werden Funktionstests im Loop-Back-Modus durchgeführt werden.

A Verwendete Abkürzungen

Hier sind die in dieser Arbeit verwendeten Abkürzungen in alphabetischer Reihenfolge aufgelistet:

Abkürzung	Bedeutung
ALICE	A Large Ion Collider Experiment
ATLAS	A Torodial LHC Apparatus
BPM	Biphase-Mark Encoded
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
CLK	Taktsignal
CMD	Steuersignale
CMS	Compact Myon Solenoid
DBR	Distributed Bragg Reflector
DORIC	Digital-Opto-Receiver-Integrated-Circuit
FE	Frontend-Chip
FPGA	Field Programmable Gate Array
GRIN	Gradientenindex-Faser
GPIO	General-Purpose-Interface-Bus
LHCb	Large Hadron Collider beauty experiment
LSP	Large-Surface-Photodiode
LVDS	Low Voltage Differential Signal
MCC	Modul-Control-Chip
NTC	Negative Temperatur Gradient
PBRs	Pseudo Random Bit Stream
PIN	p-dotiert intrinsisch n-dotiert
PP0	Patch Panel 0
PP1	Patch Panel 1
PP2	Patch Panel 2
SIMM	Stufenindex-Multimode-Faser
SCT	Semiconductor Tracker
SMD	Surface Mounted Device
ST	Straight Tip
TRT	Transition Radiation Tracker
VDC	VCSEL-Driver-Chip
VCSEL	Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser

B Technische Details der Optoboards und des Optoboard-Testsystems

B.1 Belegung des 80-Pin Steckers der Messkarten

Auf den Messkarten Bitfehler und DORIC (siehe Kapitel 4.1.3) kann ein Optoboard aufgesetzt und betrieben werden. D.h., über die Messkarten liegen die Betriebsspannungen an und laufen die Betriebsströme sowie der Datentransfer. Die Verbindung erfolgt über die Buchse auf der Unterseite des Optoboards. Dafür ist der Stecker auf der Oberseite einer Trägerkarte (vgl. Kapitel 4.1.3), auf dem ein Optoboard sitzt, mit einer Buchse auf der Unterseite der Trägerkarte verbunden. Diese passt zu einem Stecker auf den Messkarten. Abbildung B.2 zeigt die Belegung dieses Steckers der Messkarten. Die Pin-Belegung der Buchse auf der Unterseite eines Optoboards ist dazu gespiegelt, wenn man diese von der Unterseite des Optoboards betrachtet (vgl. Abb. B.1).

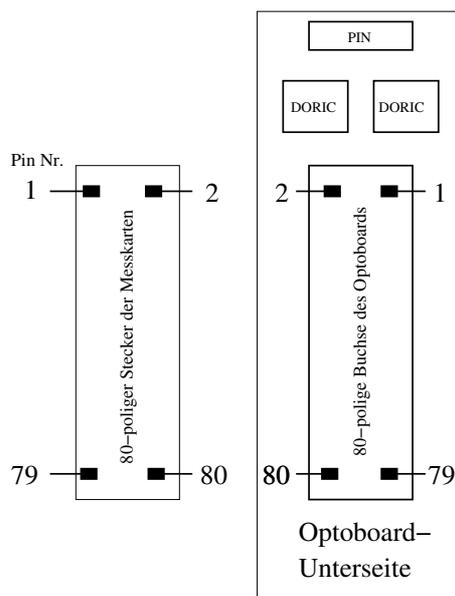


Abbildung B.1: Übertragung der Pin-Belegung des Steckers der Messkarten zur Buchse der Optoboards

Ein Optoboard hat sieben Empfangs- und Sendekanäle. Jedes dieser zusammen gehörenden Paare (z.B. Empfangskanal 1 und Sendekanal 1) wird über 8 Pins des Steckers auf einer Messkarte verbunden (siehe Abb. B.2). Das sind z.B. die Pins mit den Nummern 17, 19, 21,...31 für Kanal 1. Die Pin-Belegung ist am Beispiel des Kanals 1 in der Tabelle B.1 erläutert.

Mit Hilfe der beiden Sense-Leitungen (Pins mit Nummern 65 und 67) kann kontrolliert werden, ob die 2.5 V-Versorgungsspannung tatsächlich am Optoboard anliegt. Das Sense-Signal dient dazu, die über die Versorgungsleitungen an das Optoboard angelegte Span-

male

1	VPIN	DTO2N_4	2
3	VPINRET	DTO2P_4	4
5	VISET	DTON_4	6
7	VISETRET	DTOP_4	8
9	NTC_OPTO	DCIN_4	10
11	NTC_OPTO_RET	DCIP_4	12
13	OPTO_RST_RETURN	CKN_4	14
15	OPTO_RST	CKP_4	16
17	CKP_1	DTO2N_5	18
19	CKN_1	DTO2P_5	20
21	DCIP_1	DTON_5	22
23	DCIN_1	DTOP_5	24
25	DTOP_1	DCIN_5	26
27	DTON_1	DCIP_5	28
29	DTO2P_1	CKN_5	30
31	DTO2N_1	CKP_5	32
33	CKP_2	DTO2N_6	34
35	CKN_2	DTO2P_6	36
37	DCIP_2	DTON_6	38
39	DCIN_2	DTOP_6	40
41	DTOP_2	DCIN_6	42
43	DTON_2	DCIP_6	44
45	DTO2P_2	CKN_6	46
47	DTO2N_2	CKP_6	48
49	CKP_3	DTO2N_7	50
51	CKN_3	DTO2P_7	52
53	DCIP_3	DTON_7	54
55	DCIN_3	DTOP_7	56
57	DTOP_3	DCIN_7	58
59	DTON_3	DCIP_7	60
61	DTO2P_3	CKN_7	62
63	DTO2N_3	CKP_7	64
65	VVDC4SENSE	VVDC4	66
67	VVDC4RETSENSE	VVDC4RET	68
69	VVDC1	VVDC5	70
71	VVDC1RET	VVDC5RET	72
73	VVDC2	VVDC6	74
75	VVDC2RET	VVDC6RET	76
77	VVDC3	VVDC7	78
79	VVDC3RET	VVDC7RET	80

Abbildung B.2: Belegung des 80-Pin Steckers auf den Messkarten

Pin	Name	Signal	Funktion
1	VPIN	+10 V	Spannung an PIN-Dioden Arrays
3	VPINRET	GND	
5	VISET	max. 1.4 mA	Eingangsstrom I_{set} $I_{set} = 1.1 \mu\text{A}$ für die Messung der opt. Leistung
7	VISERET	GND	
9	NTC_OPTO		Anschlüsse des NTCs
11	NTC_OPTO_RET		
13	OPTO_RST		Eingang für das RESET-Signal an die DORICs
15	OPTO_RST_RET	GND	
17	CKP_1	LVDS pos.	DORIC-Ausgang des rek. Taktsignals (LVDS-Signale pos. und neg. Polarität)
19	CKN_1	LVDS neg.	
21	DCIP_1	LVDS pos.	DORIC-Ausgang der rek. Steuersignale (LVDS-Signale pos. und neg. Polarität)
23	DCIN_1	LVDS neg.	
25	DTOP_1	LVDS pos.	VDC-Eingänge für LVDS-Signale (LVDS-Signale pos. und neg. Polarität) (s.u.)
27	DTON_1	LVDS neg.	
29	DTO2P_1	LVDS pos.	
31	DTO2N_1	LVDS neg.	
65	VVDC4SENSE		Anschlüsse für die Sense-Leitungen (s.u.)
67	VVDC4RETSSENSE		
69	VVDC1	2.5 V	Anschlüsse für die Versorgungsspannung an die VDCs und DORICs
71	VVDC1RET	GND	

Als GND ist das Referenzsignal (Masse) bezeichnet.

Tabelle B.1: Pin-Belegung des 80-Pin Steckers der Messkarten (beispielhaft für den Sendekanal und den Empfangskanal 1 des Optoboards).

nung so einzustellen, dass am Optoboard 2.5 V anliegen und damit der Spannungsabfall über den Zuleitungen ausgeglichen ist.

Jeder Kanal besitzt zwei Eingänge, die zur Sendeeinheit gehören (im Fall des Kanals 1 sind das die Pins 25, 27, 29, 31). Über diese werden die LVDS-Signale positiver Polarität (z.B. DTOP_1 an Pin 25) und negativer Polarität (DTON_1 an Pin 27) angelegt. Bei einem Optoboard des B-Lagen-Typs (Optoboards mit einer Seriennummer zwischen 1000 und 1999, vgl. Kapitel 3.2) mit zwei VCSEL-Arrays, d.h. 14 Sendekanälen, gehört einer der zwei Eingänge z.B. von Kanal 1 (Pins 25, 27) zu ersten Kanal des ersten VCSEL-Arrays, der andere Eingang (Pins 29, 31) zum ersten Kanal des zweiten VCSEL-Arrays. Für ein Optoboard mit nur sieben Sendekanälen (Optoboards mit einer Seriennummer zwischen 2000 und 3999) sind nur zwei der vier Pins verbunden.

B.2 Kenndaten des temperaturabhängigen Widerstands auf den Optoboards

Auf jedem Optoboard befindet sich ein temperaturabhängiger Widerstand¹ (NTC), der es erlaubt, die Temperatur des Optoboards im Detektor zu messen (siehe Abb. 3.10). Der NTC ist Teil eines Sicherheitssystems, das den Pixel-Detektor im Betrieb laufend überwachen wird [APCS].

Der auf den Optoboards eingebaute NTC ist in SMD-Technologie ausgeführt [TeDICS]. Er muss hoher Strahlung widerstehen und im 2.6 T Magnetfeld im Detektor arbeiten. Sein Widerstandswert ist groß gegen den Widerstand der Zuleitungen [ReICS]. Die Umrechnung von der Temperatur T auf den Widerstandswert $R(T)$ erfolgt gemäß

$$R(T) = R_{25} \cdot e^{B \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{25}}\right)}. \quad (\text{B.1})$$

Dabei ist $R_{25} = 10 \text{ k}\Omega$ der Widerstandswert bei $T = 298.15 \text{ K}$, was $T[^\circ\text{C}] = 25^\circ\text{C}$ entspricht. Der Faktor B ist $B = 3435 \text{ K} \pm 1\%$.

Der Widerstandswert für eine gegebene Temperatur kann mit Gleichung B.1 im Temperaturbereich von -10°C bis 25°C mit einer Genauigkeit von $\Delta R = \pm 0.5 \text{ k}\Omega$ bestimmt werden.

Um aus einem gemessenen Widerstandswert die Temperatur bestimmen zu können, verwendet die Steuersoftware des Optoboard-Testsystems die Steinhart-Hart-Gleichung [PK]

$$T(R) = \frac{1}{A_0 + A_1 \cdot \ln(R) + A_3 \cdot (\ln(R))^3}, \quad (\text{B.2})$$

mit den Werten

$$\begin{aligned} A_0 &= 0,66103 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}, \\ A_1 &= 0,28957 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}, \\ A_2 &= 0,30692 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}. \end{aligned}$$

B.3 Betriebsparameter der Steuerkarte

Die Steuerkarte befindet sich zu ihrem Schutz in einer Metallbox. Durch MPO-Stecker in den Wänden dieser Box können optische Fasern zu der BPM-Karte und der DRX-Karte im Inneren verbunden werden. Die 14 LVDS-Ausgänge der Steuerkarte können über zwei, in die Wände eingelassene Buchsen für zwei Flachbandkabel mit 20 Adern abgegriffen werden. Analog dazu können den sieben LVDS-Eingängen der Steuerkarte über eine entsprechende Buchse Signale zugeführt werden.

Das FPGA der Steuerkarte benötigt 5 V-Betriebsspannung. Diese wird durch eine externe Spannungsquelle geliefert. Die Anschlüsse sind als Buchsen in die Metallbox eingelassen. Die BPM-Karte erhält ihre 5 V-Versorgungsspannung direkt von der Steuerkarte.

Die DRX-Karte benötigt 3.3 V-Betriebsspannung für den DRX-Chip und 10 V am PIN-Dioden-Array. Die elektrische Versorgung ist unabhängig von der übrigen Steuerkarte und wird durch externe Spannungsquellen, ebenfalls über Buchsen im Metallgehäuse geliefert.

¹SEMITEC™103KT1608

C Programme zur Automatisierung der Messprozeduren

Die Programme zur automatisierten Ausführung der Messprozeduren zur Qualitätssicherung der Optoboards (siehe Kapitel 3.3) wurden in einem Programm mit graphischer Programmieroberfläche¹ erstellt. Die Messprogramme (Virtual Instrument, VI) heißen "Messe_Board.vi" zur Durchführung der Qualitätsuntersuchung an den Ausgangssignalen der DORICs eines Optoboards und "Messe_Schwellen.vi" zur Ermittlung der Bitfehler-Schwellen der DORIC-Kanäle sowie "Messe_VCSEL.vi" zur Untersuchung der optischen Ausgangssignale der VCSEL. Die Programmieroberfläche erlaubt die Benutzung bereits vorhandener Programme als Unterprogramme (SubVIs). Diese Unterprogramme können in neue Programme als graphische Programmbestandteile eingefügt werden.

Zur Steuerung des Optoboard-Testsystems wurden Unterprogramme erstellt, die elementare Funktionen des Testsystems ausführen und ausgelesene Daten verarbeiten. Diese Unterprogramme werden zunächst kurz erläutert. Die oben genannten Messprogramme nutzen diese elementaren Unterprogramme und werden im Anschluss anhand von Flussdiagrammen diskutiert.

C.1 Elementare Steuerprogramme des Testsystems

In den folgenden Tabellen sind die Unterprogramme (SubVIs) zur Ausführung elementarer Funktionen des Testsystems einzeln dokumentiert. Dabei werden jeweils die Programmsymbole dargestellt, mit den Eingangsvariablen zur Ausführung des Unterprogramms auf der linken Seite und Ausgangsvariablen, die ein Unterprogramm ausgibt, auf der rechten Seite des Symbols des SubVIs.

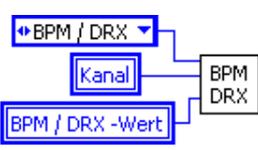
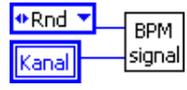
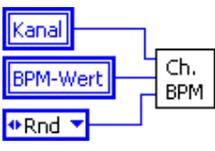
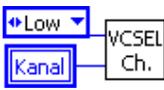
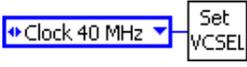
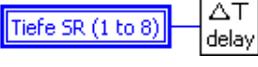
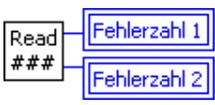
1. Programme zur Steuerung des optischen Abschwächers² (siehe Kapitel 4.1.2).

Symbol	Name	Funktion
	Move_X_Steps.vi	Schliesst bzw. öffnet die Spalte um die eingegebene Anzahl von 10 µm-Schritten. Das Vorzeichen der Eingangsvariablen bestimmt die Richtung ("+" für die Öffnung, "-" für die Schließung).
	Read_Position.vi	Fragt die aktuelle Position des linearen Tisches ab. Mit dem SubVI "Go_2_Position.vi" kann diese Position wieder eingestellt werden.
	Go_2_Position.vi	Bewegt den linearen Tisch zur eingegebenen Position.

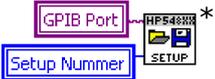
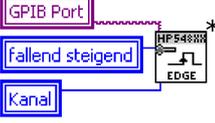
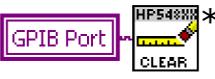
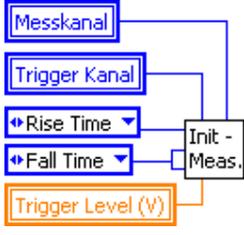
¹Labview™6.1

²Die Steuerung des linearen Tisches erfolgt mit einem Mercury™DC-Motor Controller

2. Programme zur Steuerung der Bestandteile der Steuerkarte

Symbol	Name	Funktion
	BPM-DRX-Function.vi	Setzt den BPM- oder DRX-Wert eines Kanals (Kanal) der BPM- bzw. DRX-Karte auf den Wert der Eingangsvariablen BPM/DRX-Wert.
	BPM.Signal.vi	Setzt das Ausgangssignal eines VCSELs (Kanal) der BPM-Karte (hier auf zufällige Signale (Rnd)).
	Set_Channel_BPM.vi	Aktiviert den VCSEL der BPM-Karte (mit BPM-Wert), der durch die Eingangsvariable Kanal angegeben wird. Die übrigen VCSEL werden deaktiviert. Das Ausgangssignal sind hier zufällige Signale.
	All_BPM_off.vi	Deaktiviert alle VCSEL der BPM-Karte.
	Set_DRX.vi	Setzt den DRX-Wert aller Kanäle der DRX-Karte auf den Wert der Eingangsvariablen DRX (0 bis 255).
	VCSEL_Ch.vi	Setzt die Ausgangssignale eines der 14 LVDS-Ausgänge der Steuerkarte (hier Logisch 0). Diese Signale gibt der VCSEL eines angeschlossenen Optoboards aus.
	Set_VCSEL.vi	Gibt auf alle 14 LVDS-Ausgänge der Steuerkarte das Ausgangssignal, das durch die Eingangsvariable vorgegeben wird, hier ein 40 MHz-Taktsignal.
	Set_Delay.vi	Setzt die Tiefe des Schieberegisters des FPGAs zur Bitfehler-Zählung auf den durch "Tiefe_SR" gegebenen Wert.
	Set_Compare.vi	Setzt den Kanal, für den eine Bitfehler-Zählung (optisch oder elektrisch) durchgeführt werden soll.
	Count.vi	Startet (nach Setzen des Kanals durch "Set_Compare.vi") eine Bitfehler-Zählung (lang oder kurz).
	Read_Errors.vi	Liest das Ergebnis der Bitfehler-Zählung ("Count.vi") aus. Das Vi gibt zwei Zählraten aus. Der Wert der kleineren Zählrate ist die Anzahl der Bitfehler.
	Optoboard_Reset.vi	Sendet den DORICs eines Optoboard ein Reset-Signal.

3. Programme zur Steuerung des Oszilloskops

Symbol	Name	Funktion
	Measure_Channel.vi	Führt die Messungen zur Qualitätssicherung an den Ausgangssignalen an einem Kanal (Kanal) des DORICs mit dem Oszilloskop aus.
	Oszi_Setup.vi	Lädt bzw. speichert ein Setup des Oszilloskops. Ein Setup ist ein Satz von Mess- und Darstellungseigenschaften des Oszilloskops.
	Oszi_Timebase.vi	Stellt die Zeitbasis der Darstellung einer Pulsform auf dem Display des Oszilloskops ein.
	Oszi_Trigger.vi	Wählt den Eingangskanal des Oszilloskops (Kanal), der als Triggersignal verwendet wird. Zusätzlich wird eingegeben, ob die fallende oder die steigende Flanke als Triggersignal verwendet werden soll.
	Oszi_Clear.vi	Setzt im Oszilloskop aufgerufene Messroutinen zurück.
	Initialize_Measurements.vi	Ruft bis zu drei Messroutinen durchzuführender Messungen auf (hier Messung einer Anstiegs- und Abfallzeit). Mit "Oszi_Start_Stop.vi" kann die Ausführung der Messungen gestartet und gestoppt werden. Es müssen stets drei Messungen einprogrammiert werden. Sollen weniger als drei verschiedene Messungen durchgeführt werden, muss an allen drei bzw. zwei der drei Eingänge die gleiche Prozedur eingegeben werden.
	Oszi_Run_Stop.vi	Startet bzw. stoppt die Ausführung einer einprogrammierten Messroutine.

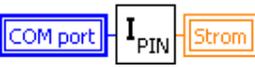
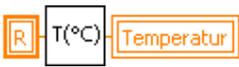
* Diese SubVIs wurden vom Hersteller der Programmiersprache³ für das Oszilloskop⁴ übernommen.

³Labview 6.2TM von National InstrumentsTM

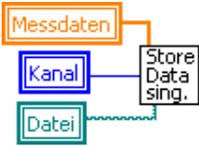
⁴HP InfiniumTM 54825A

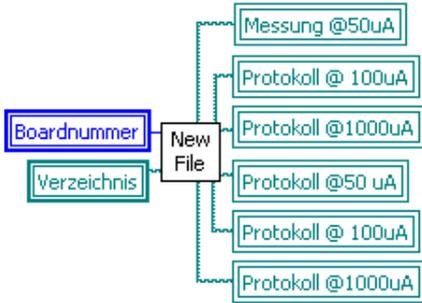
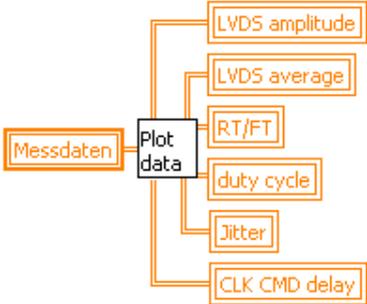
Symbol	Name	Funktion
	Read_out_data.vi	Führt die, durch "Initialize_Measurements.vi" im Oszilloskop aufgerufenen Messprozeduren durch und gibt die Messwerte aus. Die Eingangsvariable "Anzahl" gibt die Zahl einprogrammierter Messroutinen an, die Variable "Dauer" die Messdauer in Sekunden.

4. Sonstige elementare Steuerprogramme

Symbol	Name	Funktion
	Read-Ipin.vi	Liest das Strommessgerät an der seriellen Schnittstelle (COM-Port) des Rechners aus.
	Temperatur.vi	Berechnet aus einem Widerstandswert des NTCs des Optoboards die Temperatur (mit den Konstanten aus Anhang B.2).
	Time.vi	Gibt einen Zahlenwert aus (Zeitpunkt), der dem aktuellen Zeitpunkt entspricht (siehe "Dauer.vi").
	Dauer.vi	Als Eingangsvariable dient der Zahlenwert, den "Time.vi" (s.o.) ausgibt. Als Dauer wird die Zeit in Sekunden angegeben, die seit dem eingegebenen Zeitpunkt vergangen ist.

5. Unterprogramme zur Verwaltung der Messdaten

Symbol	Name	Funktion
	Store_Data.vi	Speichert die im Programm "Messe_Board.vi" (s.u.) genommenen Daten aus dem Zwischenspeicher in die durch "Create_Data_Files.vi" (s.u.) erstellten Dateien zur Aufnahme der Messdaten.
	Store_Data_single.vi	Speichert die genommenen Daten einer Ausführung von "Measure_Channel.vi" in die Protokolldatei.

Symbol	Name	Funktion
	Create_Data_Files.vi	Erstellt Protokolldateien und Dateien zur Aufnahme der Messdaten, die durch das Programm "Messe_Board.vi" (s.u.) genommen wurden.
	Show_data.vi	Stellt während der Ausführung des Programms "Messe_Board.vi" genommene Messdaten während der Ausführung auf der Programmoberfläche dar.

C.2 Dokumentation der Messprogramme

Die Messprogramme zur Durchführung aller Qualitätskontrollen an einem Optoboard sollen im Folgenden anhand von Flussdiagrammen dokumentiert werden. In die Flussdiagramme sind die Programmsymbole verwendeter Unterprogramme (siehe C.1) eingefügt, damit die Flussdiagramme mit dem graphischen Programmcode leichter identifiziert werden können. In den Flussdiagrammen fassen Rechtecke Blöcke im Programmablauf zusammen, Rauten stellen Abfragen dar, Parallelogramme durch den Benutzer einzugebende Werte und Rechtecke mit runden Ecken sind Programmschleifen, die mehrmals durchlaufen werden.

Weiterhin ist der Programmablauf durch durchgezogene gezeichnete Pfeile zu verfolgen. Variablen, die von einer Abfrage oder einem Programmblock übernommen werden, sind durch gestrichelt gezeichnete Pfeile mit dem Variablennamen gekennzeichnet. In den Flussdiagrammen sind ausgelesene PIN-Ströme als Mittelwerte angegeben, wie sie von den Strommessgeräten gemessen werden und in den Programmen z.B. bei Abfragen auftauchen.

C.2.1 Programm "Messe_Board.vi"

Mit dem Programm "Messe_Board.vi" werden die Qualitätsuntersuchungen an den DORICs eines Optoboards durchgeführt. Der Messaufbau ist in Abbildung 4.13 gezeigt. Das Programm justiert für jeden DORIC-Kanal mit dem optischen Abschwächer den PIN-Strom auf $50 \mu\text{A}$, $100 \mu\text{A}$ und $1000 \mu\text{A}$, führt die Messungen (siehe Tabelle 3.2) durch und speichert die Messwerte. Dabei wiederholt sich für jeden Sollstrom eine Routine, die zunächst erläutert werden soll.

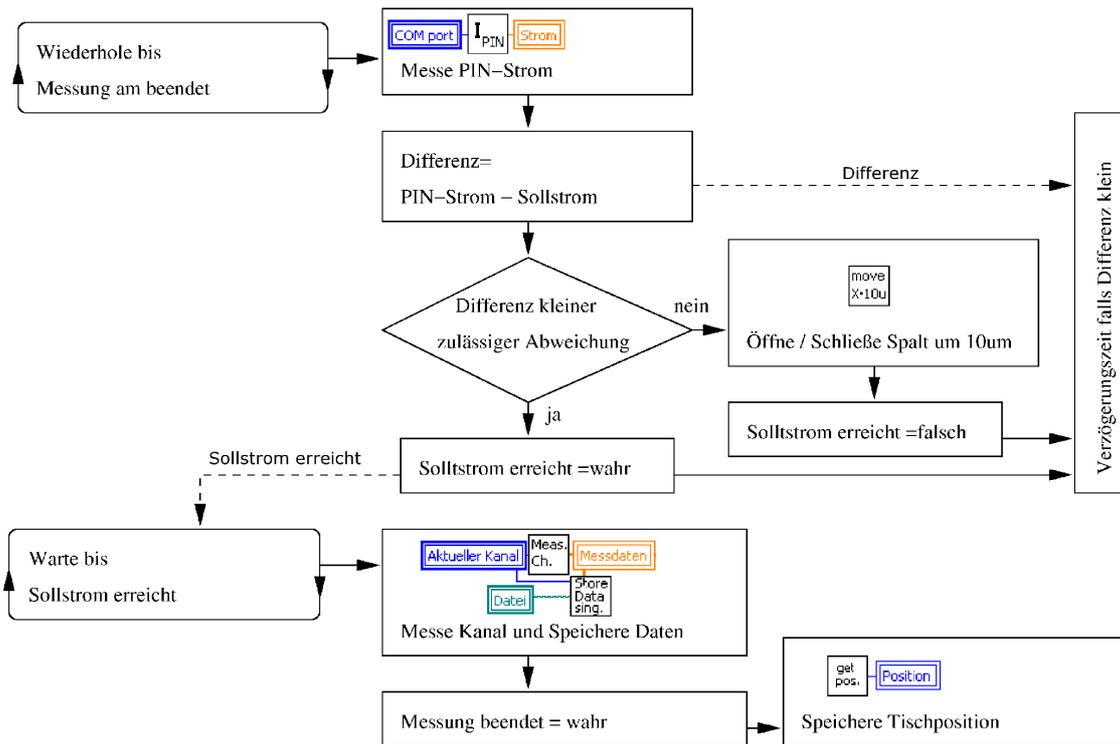


Abbildung C.1: Flussdiagramm der Routine zur Einstellung des Sollstroms und Durchführung der Messungen

Routine zur Einstellung des Sollstroms und Durchführung der Messungen an einem Kanal des DORICs

In Abbildung C.1 ist das Flussdiagramm des Programmteils zur Durchführung der Messungen an einem Kanal des DORICs gezeigt. Dieses wird von links nach rechts gelesen. Das Programm "Messe.Board.vi" nutzt diese Unterroutine.

Zunächst werden zwei Schleifen gestartet. Die erste besteht darin, wiederholend den PIN-Strom zu messen und die Differenz zum Sollstrom zu errechnen. Ist diese Differenz ausreichend klein ($\pm 2 \mu\text{A}$ für die Sollströme $25 \mu\text{A}$ und $50 \mu\text{A}$, $\pm 10 \mu\text{A}$ für den Sollstrom $500 \mu\text{A}$), wird die Variable "Sollstrom erreicht" auf wahr gesetzt, andernfalls die Breite der Spalte des Abschwächers in $10 \mu\text{m}$ -Schritten verändert. Dazu wird eine Vorzeichenfunktion verwendet, die +1 für zu großen PIN-Strom, 0 für exakt erreichten Sollstrom und -1 für zu kleinen PIN-Strom an das Unterprogramm zur Veränderung der Spaltbreite "Move_X.Steps.vi" gibt. Falls der PIN-Strom nahe dem Sollstrom liegt ($\pm 15\%$ für den Sollstrom $25 \mu\text{A}$, $\pm 8\%$ für den Sollstrom $50 \mu\text{A}$ und $\pm 4\%$ für den Sollstrom $500 \mu\text{A}$) wird der Programmablauf verzögert, bevor ein weiterer Schleifendurchlauf startet. Die Verzögerung verhindert, wenn der PIN-Strom z.B. über dem Sollstrom liegt, der Sollstrom im Zuge der Approximation unterschritten wird. Diese Schleife wird erst verlassen, wenn die Messung komplett beendet ist. Damit ist gesichert, dass zur kompletten Messdauer der korrekte PIN-Strom anliegt.

Sobald der Sollstrom erreicht ist, werden die Messungen gestartet, die Messwerte in einer Protokolldatei gesichert (s.u.) und auf dem Monitor dargestellt. Danach wird die Variable "Messung beendet" auf wahr gesetzt und die Schleife zur Einstellung des Sollstroms beendet.

Abschließend wird die Position des Tisches gespeichert. Diese Position kann zur Messung an den folgenden Kanälen wieder eingestellt werden, um den Sollstrom dann zügig zu approximieren. Dies soll anhand von Abbildung C.2 verdeutlicht werden.

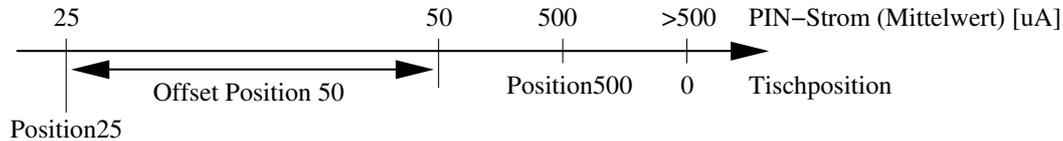


Abbildung C.2: Speicherung der Tischpositionen des Messprogramms “Messe_Board.vi“

Bei geschlossenen Spalten beträgt der PIN-Strom mehr als $500 \mu\text{A}$. Nach einem Durchlauf (s.u.) hat das Programm in den Variablen “Position25“ und “Position500“ die Tischpositionen gespeichert, bei denen die Sollströme $25 \mu\text{A}$ bzw. $500 \mu\text{A}$ erreicht waren.

Das Programm “Messe_Board.vi“ beginnt die Messungen mit dem Sollstrom $25 \mu\text{A}$. In der Variable “Offset Position50“ speichert das Programm einen Zahlenwert, der angibt, um wieviel der Tisch zur Einstellung des Sollstroms $50 \mu\text{A}$ vom Sollstrom $25 \mu\text{A}$ geschlossen werden musste.

Wie das Programm “Messe_Board.vi“ diese gespeicherten Positionen zur schnellen Einstellung eines Sollstroms nutzt, wird in der Diskussion des Programmablaufs deutlich werden.

Programmablauf

In Abbildung C.3 ist das Flussdiagramm des Programms “Messe_Board.vi“ dargestellt. Nach dem Start durch den Benutzer erfolgt zunächst eine Initialisierung, in der ein 40 MHz -Taktsignal auf die LVDS-Ausgänge der Steuerkarte gegeben wird, damit die VCSEL des angeschlossenen Optoboards dieses Signal während der Messung senden. Die Spalte des optischen Abschwächers werden geschlossen, wobei darauf zu achten ist, dass die Nullposition mit dem geschlossenen Spalt übereinstimmen muss. Die Nullposition kann mit der Steuersoftware des Herstellers des linearen Tisches⁵ festgelegt werden. Zusätzlich werden Dateien erstellt, in denen die genommenen Messdaten gespeichert werden (s.u.). Dafür gibt der Benutzer die Seriennummer des Optoboards sowie einen Dateipfad an und das Programm erzeugt in diesem Verzeichnis ein Unterverzeichnis, in dem Dateien zur Aufnahme der Messdaten und drei Protokolldateien erstellt werden (s.u.).

Der Benutzer muss einen Kanal angeben, der als nächster gemessen werden soll. Nach der Messung kehrt der Programmablauf in einer Schleife zu dieser Stelle zurück, bis der Benutzer das Programm beendet. Nachdem der Kanal ausgewählt ist, wird der entsprechende VCSEL der BPM-Karte aktiviert.

Als erstes werden die Messungen für $I_{\text{PIN}} = 25 \mu\text{A}$ durchgeführt. Wurde in einem vorherigen Programmdurchlauf eine Tischposition “Position25“ gespeichert, dann ist der Wert dieser Variablen nicht 0, was der Standard ist. In diesem Fall wird die durch “Position25“ gegebene Position des linearen Tisches angefahren. Anderfalls wird der Tisch vom geschlossenen Zustand der Initialisierung um $500 \mu\text{m}$ geöffnet, was ein empirischer Wert ist (siehe Diagramm in Abb. 5.6). Daran anschließend wird der Kanal mit Sollstrom $25 \mu\text{A}$ in der oben beschriebenen Routine vermessen und die aktuelle Position des linearen Tisches in der Variable “Position25“ gespeichert. Die Messwerte werden in einen Zwischenspeicher übernommen und in eine Protokolldatei geschrieben. Zusätzlich werden sie auf der Bedienoberfläche des Programms graphisch dargestellt. Sie können in einer erneuten Mes-

⁵Mercury™DC Motor Controller

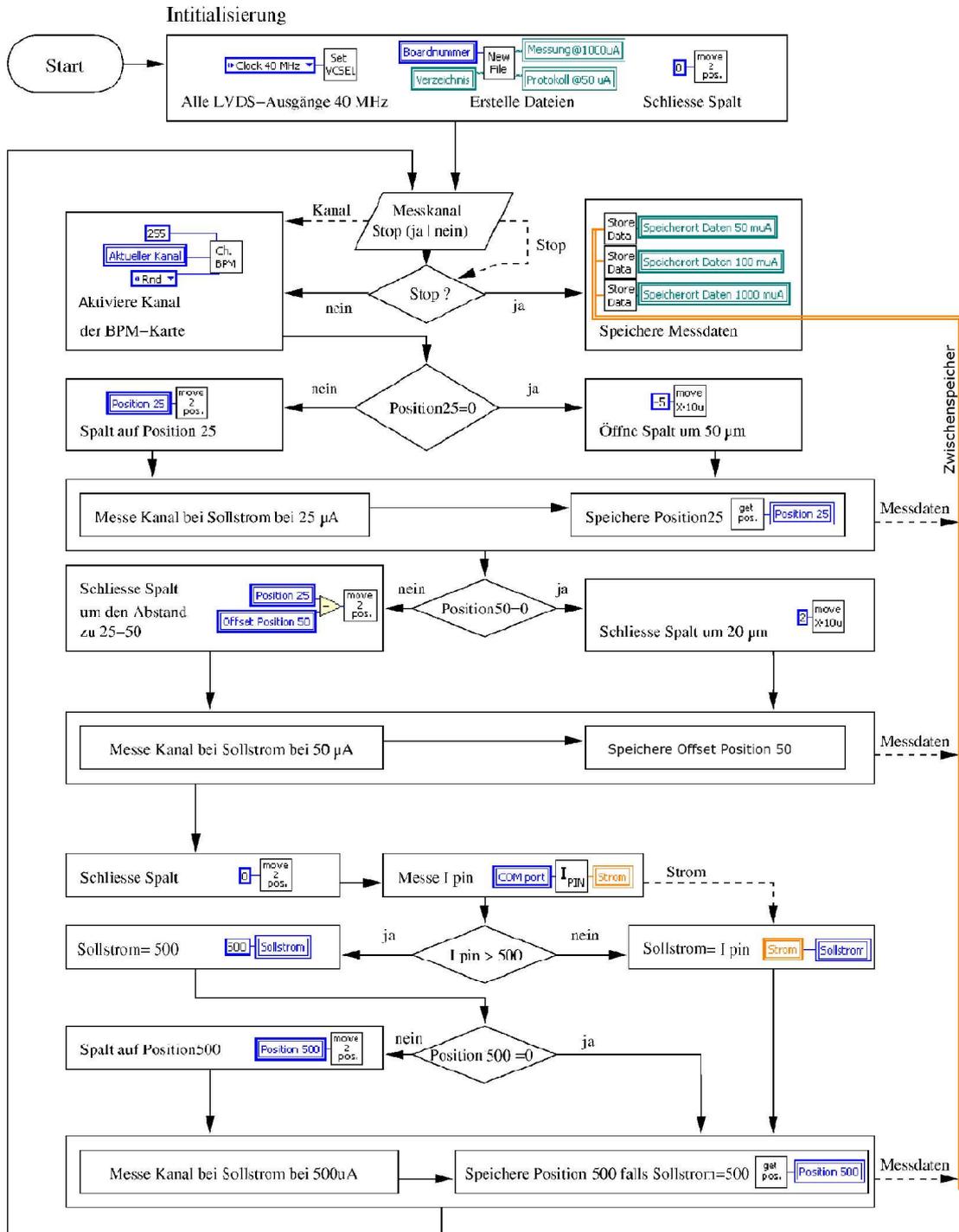


Abbildung C.3: Flussdiagramm des Programms "Messe_Board.vi"

Dateiname	Sollstrom (Amplitude)	Inhalt
BeOxxxx@25uA.txt	50	Messdaten
BeOxxxx@50uA.txt	100	
BeOxxxx@500uA.txt	1000	
BeOxxxx@25uA-Protokoll.txt	50	Protokoll
BeOxxxx@50uA-Protokoll.txt	100	
BeOxxxx@500uA-Protokoll.txt	1000	

Tabelle C.1: Erstellte Dateien für das Optoboard BeOxxx

sung dieses Kanals im Zwischenspeicher überschrieben werden, falls der Kanal aufgrund einer Fehlfunktion fehlerhaft gemessen wurde.

Als nächstes wird der Tisch um den Wert der Variablen "Offset Position 50" geschlossen. Wurde der Wert dieser Variablen noch nicht verändert, so ist er 0 und der Tisch wird um $20\ \mu\text{m}$ geschlossen, was ein geeigneter empirischer Wert ist. Danach wird der Kanal bei dem Sollstrom $50\ \mu\text{A}$ vermessen, die Messwerte in den Zwischenspeicher übernommen, in eine Protokolldatei geschrieben und wiederum für den Benutzer graphisch dargestellt.

Zur abschliessenden Messung bei dem Sollstrom $500\ \mu\text{A}$ wird zunächst der Tisch geschlossen und nach einer Wartezeit von 2 s der PIN-Strom gemessen. Beträgt dieser über $500\ \mu\text{A}$, so wird die "Position 500" durch den linearen Tisch eingestellt, falls der Wert dieser Variablen schon gesetzt wurde und daher nicht 0 ist. Die nachfolgenden Messungen werden dann bei dem korrekten Sollstrom von $500\ \mu\text{A}$ durchgeführt. Hat der VCSEL der BPM-Karte eine zu geringe Leistung, dass er keinen PIN-Strom von $500\ \mu\text{A}$ im PIN-Dioden-Array des Optoboards erzeugen kann, wird als Sollstrom der bei geschlossenen Spalten des Abschwächers gemessene PIN-Strom übernommen. Dann wird der neue Sollstrom in der Protokolldatei vermerkt.

Nach der abschliessenden Messung und der Übernahme der Messwerte in dem Zwischenspeicher und die Protokolldatei sowie ihrer Darstellung auf der Programmoberfläche kehrt das Programm zum Anfang zurück. Der Benutzer wählt entweder einen neuen Kanal zur Messung oder beendet das Programm. Wird ein Kanal erneut vermessen, werden die alten Werte im Zwischenspeicher gelöscht, sie finden sich aber noch in der Protokolldatei. Wird das Programm beendet, dann wird der Inhalt des Zwischenspeichers in die Dateien zur Aufnahme der Messdaten geschrieben.

Die vom Programm "Messe_Board.vi" erstellten Dateien sind in Tabelle C.1 erläutert.

C.2.2 Programm "Messe_Schwellen.vi"

Das Programm "Messe_Schwellen.vi" bestimmt die Bitfehler-Schwellen aller DORIC-Kanäle eines Optoboards. Die zugehörigen Aufbauten des Optoboard-Testsystems für die Messung der Bitfehler-Schwellen mit optischer und elektrischer Rückspeisung wurden in Kapitel 4.2 diskutiert.

In Abbildung C.4 ist das Flussdiagramm dieses Programms dargestellt.

Nach dem Start durch den Benutzer wird in einem Initialisierungsschritt ein 40 MHz-Taktsignal auf die LVDS-Ausgänge der Steuerkarte gegeben. Dieses wird durchgeführt, damit im Fall einer Bitfehler-Schwellenmessung mit elektrischer Rückspeisung alle VCSEL des Optoboards definierte Signale senden. Zusätzlich werden alle DRX-Werte der DRX-Karte auf den vom Benutzer zum Programmstart eingegebenen Wert gesetzt. Das

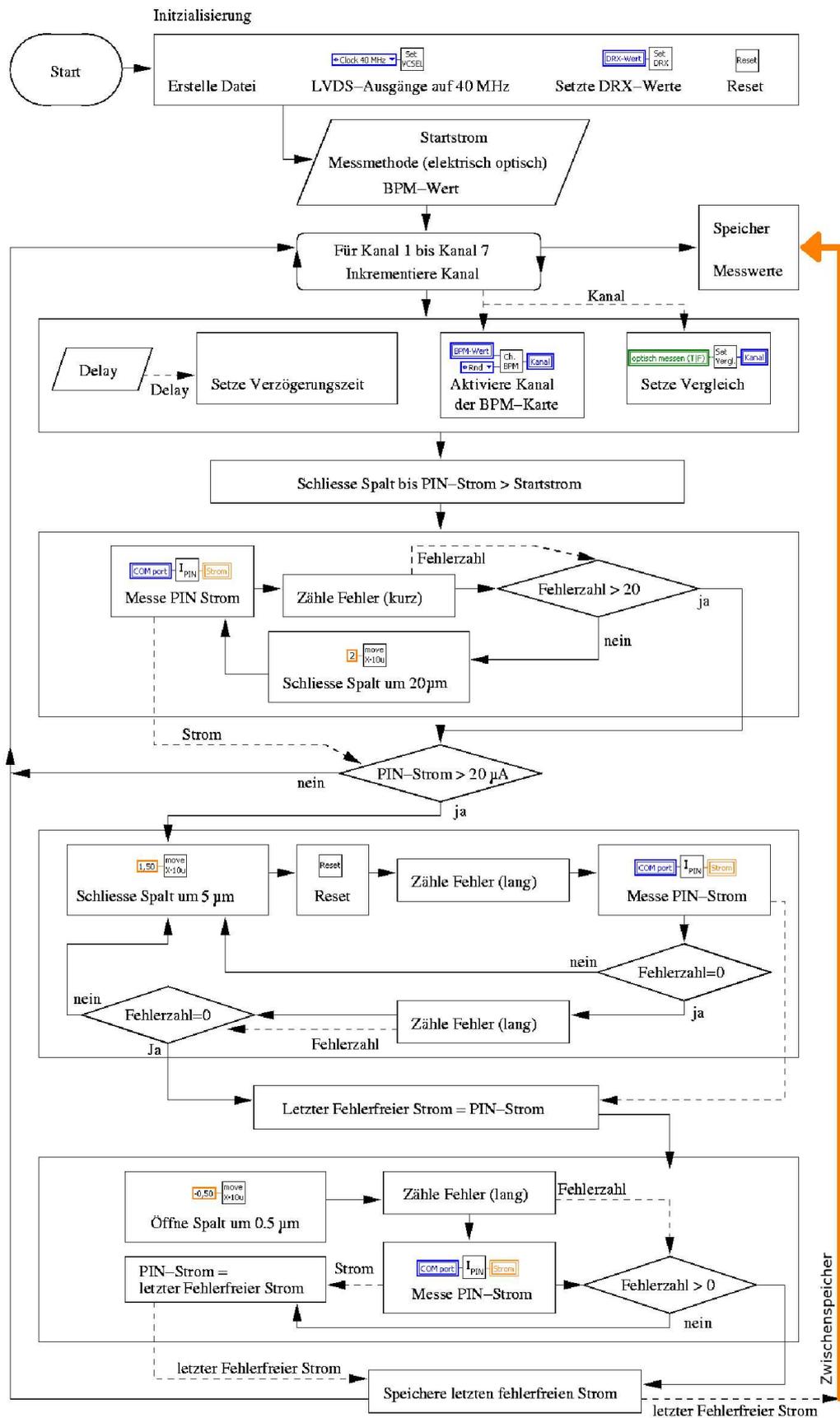


Abbildung C.4: Flussdiagramm des Programms "Messe_Schwellen.vi"

ermöglicht den korrekten Empfang optischer Signale durch die DRX-Karte (siehe Kapitel 5.2 und Gleichung 5.1). Der Benutzer muss die gewünschte Methode der Bitfehler-Schwellenmessung angeben, d.h. ob die Signale elektrisch (Aufbau gem. Abb. 4.15) oder optisch (Aufbau gem. Abb. 4.16) zurück zur Steuerkarte gespeist werden sollen.

Desweiteren muss der BPM-Wert angegeben werden, mit dem die BPM-Karte den VCSEL betreiben soll (Standard ist ein BPM-Wert von 130) und ein Startstrom, für den das Programm die Suche der Bitfehler-Schwellen beginnen soll (s.u.).

Das Programm tritt daraufhin in eine Schleife mit sieben Durchläufen ein. Die Folgenden Programmschritte werden dann siebenmal ausgeführt, wobei die Variable Kanal für jeden Durchlauf inkrementiert wird, d.h. die Bitfehler-Schwellen werden beginnend mit Kanal 1 bis Kanal 7 gemessen.

Der vom Benutzer angegebene Wert "Delay" setzt die Tiefe des Schieberegisters im FPGA. Der VCSEL auf der BPM-Karte, der zum aktuellen Kanal der Messung gehört, wird aktiviert und im FPGA die Messmethode (optische oder elektrische Rückspeisung) und der Kanal zum Vergleich der gesendeten mit der zurückempfungenen Bitfolge einprogrammiert. Anschliessend wird der Spalt des Abschwächers so weit geschlossen, bis der PIN-Strom größer als der vom Benutzer eingegebene Startstrom ist.

Die Ermittlung der Bitfehler-Schwelle beginnt damit, dass der PIN-Strom gemessen wird und die Spalte des optischen Abschwächers in Schritten von $20\ \mu\text{A}$ geöffnet werden. Diese beiden Schritte werden fortlaufend durchgeführt bis in kurzer Zählung (über 2^{15} Bits) mehr als 20 Bitfehler gezählt werden. Dann ist die Bitfehler-Schwelle unterschritten. Ist der PIN-Strom größer als $20\ \mu\text{A}$, wird die Suche der Bitfehler-Schwelle abgebrochen. In diesem Fall ist entweder die Tiefe des Schieberegisters falsch gesetzt, das Optoboard defekt oder der Messaufbau fehlerhaft. In der Datei wird für diesen Kanal dann keine Bitfehler-Schwelle gespeichert.

Im nächsten Block des Programms werden in einer Schleife die Spalte des optischen Abschwächers in kleinen Schritten von $15\ \mu\text{m}$ geschlossen, ein Reset-Signal zum Optoboard gesendet und eine lange Bitfehler-Zählung durchgeführt. Das Reset-Signal ist nötig, um den korrekten Betrieb des DORIC-Kanals oberhalb der Bitfehler-Schwelle wieder herzustellen. Sobald keine Bitfehler mehr auftreten, liegt der PIN-Strom direkt oberhalb der Bitfehler-Schwelle. Der Wert dieses PIN-Stroms wird in der Variable "Letzter Fehlerfreier Strom" gespeichert.

Im letzten Schritt des Programms wird die Bitfehler-Schwelle dadurch ermittelt, dass in einer Schleife die Spalte des optischen Abschwächers in kleinen Schritten von $5\ \mu\text{m}$ geöffnet und lange Bitfehler-Zählungen durchgeführt werden. Sobald ein Bitfehler auftritt, wird diese Schleife beendet. Tritt kein Bitfehler auf, wird der Wert der Variablen "Letzter Fehlerfreier Strom" in jedem Durchlauf durch den aktuellen Messwert des PIN-Stroms ersetzt. Nach Verlassen der Schleife wird der Wert dieser Variablen in einen Zwischenspeicher übernommen.

Der Zwischenspeicher wird in die Datei BeOxxxx@Thres.txt geschrieben, nachdem die globale Schleife, die die genannten Schritte durchführt, für alle Kanäle des DORICs durchlaufen wurde.

C.2.3 Programm "Messe_VCSEL.vi"

Das Messprogramm "Messe_VCSEL.vi" führt die Qualitätsuntersuchungen an den VCSEL-Signalen eines Optoboards durch. Das Flussdiagramm dieses Programms ist in Abbildung C.5 gezeigt. Den entsprechenden Messaufbau zeigt Abbildung 4.17.

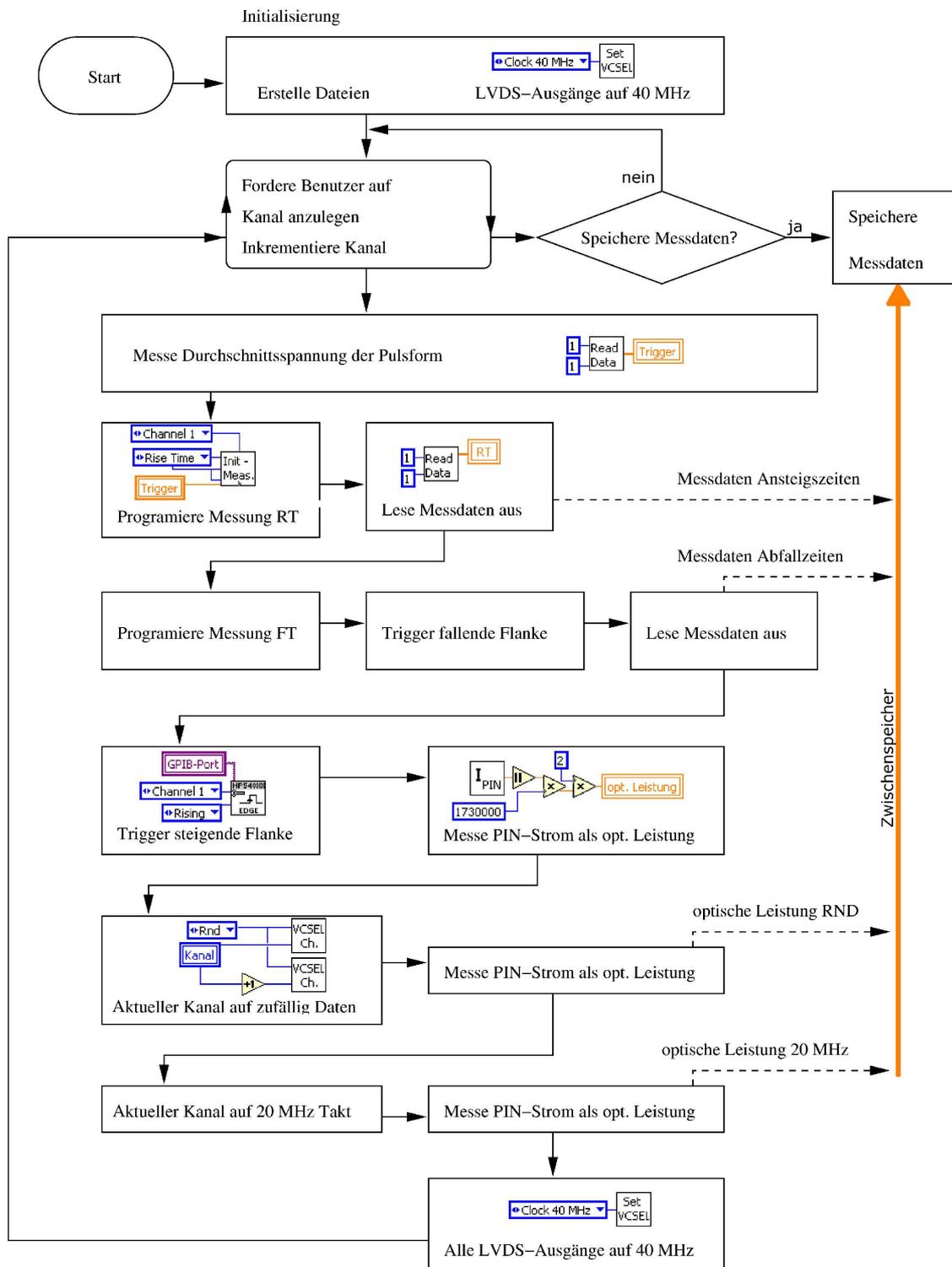


Abbildung C.5: Flussdiagramm des Programms "Messe_VCSEL.vi"

Nach dem Start durch den Benutzer erfolgt eine Initialisierung, in der auf alle LVDS-Ausgänge der Steuerkarte ein 40 MHz-Taktsignal gegeben wird. Dieses geben die VCSEL des Optoboards auf die PIN-Diode der Messkarte VCSEL. Zusätzlich wird ein geeignetes Mes-Setup im Oszilloskop geladen.

Das Programm beinhaltet eine Schleife, die siebenmal durchlaufen wird, wobei bei jedem Durchlauf ein VCSEL vermessen wird. Zu Beginn jedes Durchlaufs wird der Benutzer aufgefordert, an der Messkarte VCSEL den nächsten Kanal zur Messung mit dem dortigen Drehschalter auszuwählen.

Nach der Bestätigung des Benutzers wird zunächst die Durchschnittsspannung der Pulsform auf dem Display des Oszilloskops gemessen.

Das ist das 40 MHz-Taktsignal, das, ausgehen von dem VCSEL des Optoboards, von der PIN-Diode des ausgewählten Kanals auf der Messkarte VCSEL empfangen wird. Dieses Signal liegt auf Kanal 1 des Oszilloskops. Die gemessene Durchschnittsspannung wird ausgelesen, dieser Wert dient für die folgenden Messungen der Anstiegs- und Abfallzeit als Triggerlevel. Nun wird nacheinander das Oszilloskop zur Messung einer Abfallzeit mit bestimmten Triggerlevel programmiert und der Messwert vom Oszilloskop in einen Zwischenspeicher ausgelesen. Vor der nachfolgenden Messung der Abfallzeit dieses Signals wird als Triggersignal die fallende Flanke des 40 MHz-Taktsignals auf dem Display des Oszilloskops ausgewählt. Nach der Messung wird diese Einstellung wieder zur steigenden Flanke geändert, die im Setup des Oszilloskops, das in der Initialisierung geladen wurde, vorgegeben ist. Der Messwert der Abfallzeit wird ebenso in einen Zwischenspeicher übernommen.

Der PIN-Strom, den das 40 MHz-Taktsignal des VCSELS in der PIN-Diode erzeugt, wird im Folgenden gemessen und mit einem Faktor multipliziert, der den Messwert des Stroms mit dem Wert der Responsivität der PIN-Dioden (vgl. Gleichung (4.2)) in eine optische Leistung (in μW) umrechnet. Dieser Wert wird mit 2 multipliziert, was der Leistung für Logisch 1 entspricht.

Nachfolgend wird das Signal, das der VCSEL sendet, auf eine zufällige Bitfolge (RND) geändert. Dafür müssen die Ausgangssignale zweier aufeinander folgender Kanäle der 14 LVDS-Ausgangskanäle der Steuerkarte umgestellt werden. Dies hängt damit zusammen, dass die Eingänge der VDCs der verschiedenen Typen der Optoboards (siehe Kapitel 3.2, Seriennummer) auf verschiedenen Pins der Buchse auf der Unterseite des Optoboards liegen (vgl. Anhang B.1).

Der erzeugte PIN-Strom wird nach einer Wartezeit von 2s gemessen und als optische Leistung in den Zwischenspeicher übernommen. Das gleiche Vorgehen erfolgt mit einem 20 MHz-Takt als Ausgangssignal des VCSELS.

Nach Abschluss der Messungen an diesem Kanal werden die Ausgangssignale wieder auf ein 40 MHz-Taktsignal umgestellt. Dieses geben die übrigen VCSEL während die Messungen permanent aus.

Sobald alle Kanäle vermessen wurden, kann der Benutzer die genommenen Messwerte speichern. Falls bei der Ausführung Bedienungsfehler aufgetreten sind, z.B. der Drehschalter der Messkarte VCSEL falsch bedient wurde, so kann die komplette Messung wiederholt werden. Dies nimmt etwa 1 Minute in Anspruch. Alle Messwerte, die während der Durchführung in den Zwischenspeicher übernommen wurden, werden auf der Bedienungsfläche angezeigt, im Fall der optischen Leistung in einem Diagramm.

Wurde die Messung korrekt durchgeführt, kann das Programm die Messwerte aus dem Zwischenspeicher speichern.

D Ergebnisse der Untersuchung weiterer Optoboards

Die Ergebnisse der Messungen zur Qualitätskontrolle an neun Optoboards sollen hier dargestellt werden. In Kapitel 6.1 wurde die Ergebnisse für das Optoboard BeO2097 ausführlich diskutiert.

Die Darstellung beschränkt sich auf die Untersuchung für den PIN-Strom $I_{\text{PIN}} = 100 \mu\text{A}$. Die Unabhängigkeit der Messergebnisse vom PIN-Strom, wie sie anhand von BeO2097 gezeigt wurde, bestätigen auch die Untersuchungen weiterer Optoboards (ca. 50) aus der Produktion. In jedem Diagramm einer Messgröße sind die Ergebnisse der neun Optoboards zusammengefasst. In Tabelle D.1 wird jedem untersuchten Optoboard, gekennzeichnet durch die Seriennummer (BeOxxxx, siehe Kapitel 3.2) eine Zahl zugeordnet, die als Achsbeschriftung (Optoboard) in den Diagrammen dieses Anhangs angegeben ist. Dabei sind für ein Optoboard die Messergebnisse der sieben Kanäle als Messpunkte nebeneinander bei der durch Tabelle D.1 zugeordneten Zahl eingetragen.

Zahl	Optoboard (BeO)
1	3098
2	3097
3	3093
4	3092
5	3039
6	3038
7	3010
8	2102
9	2094

Tabelle D.1: Zuordnung der Achsbezeichnung zu den untersuchten Optoboards

In den Diagrammen sind die, von den Qualitätsanforderungen (siehe Tabelle 3.1 und 3.2) zulässigen Werte eingezeichnet (Maximalwert und Minimalwert).

D.1 Ergebnisse der Qualitätsuntersuchungen der DORICs

Die folgenden Diagramme fassen die Ergebnisse der Qualitätsuntersuchungen der Ausgangssignale der DORICs zusammen. Dabei sind die Diagramme, die zu den Taktsignalen gehören, den entsprechenden der Steuersignale gegenübergestellt.

Die Diagramme in Abbildung D.1 zeigen die Messergebnisse für die Messungen an den LVDS-Signalen beider Polaritäten. Bei Optoboard 8 (BeO2102) fällt auf, dass für die ersten drei Kanäle gegenüber den Kanälen vier bis sieben ein bis zu 100 mV niedrigerer LVDS-Mittelwerte U_{amp} gemessen wurde. Jedes Optoboard trägt zwei DORICs (vgl. Kapitel 3.2).

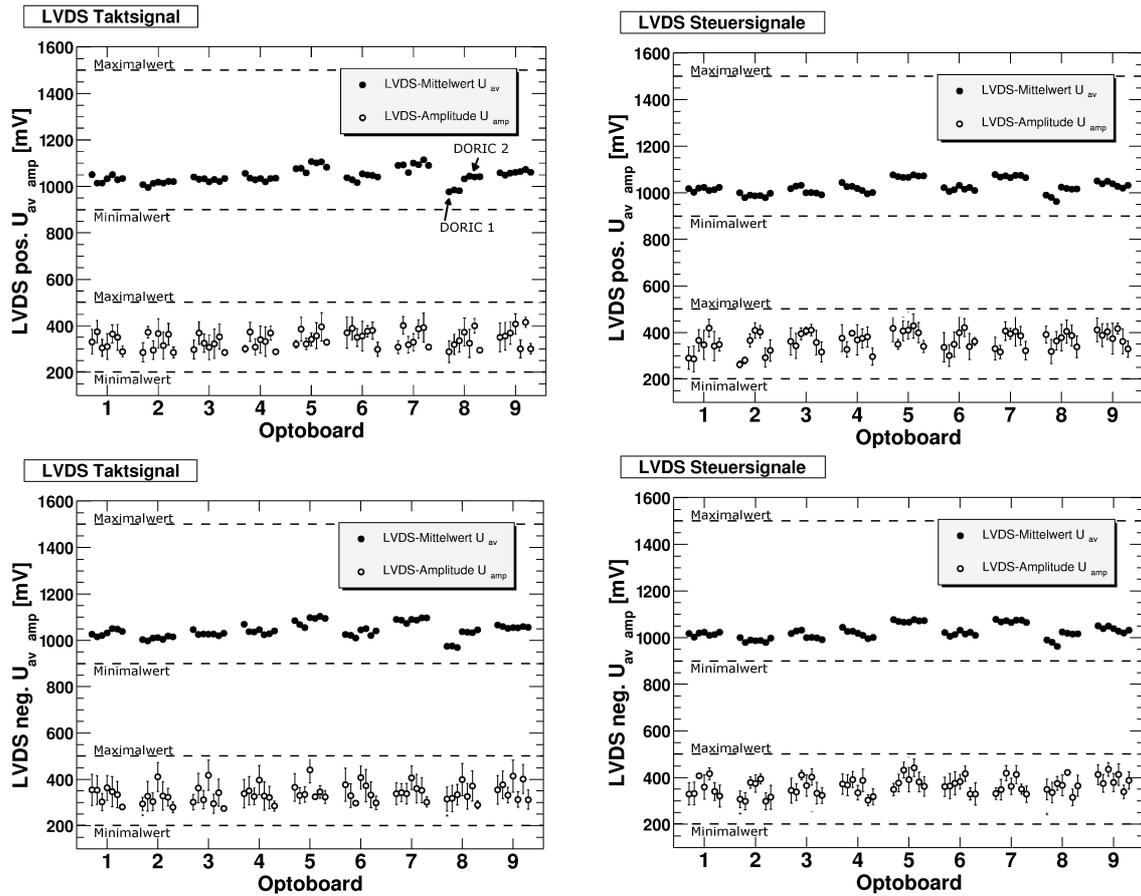


Abbildung D.1: Amplituden und Mittelwerte der LVDS-Signale beider Polaritäten

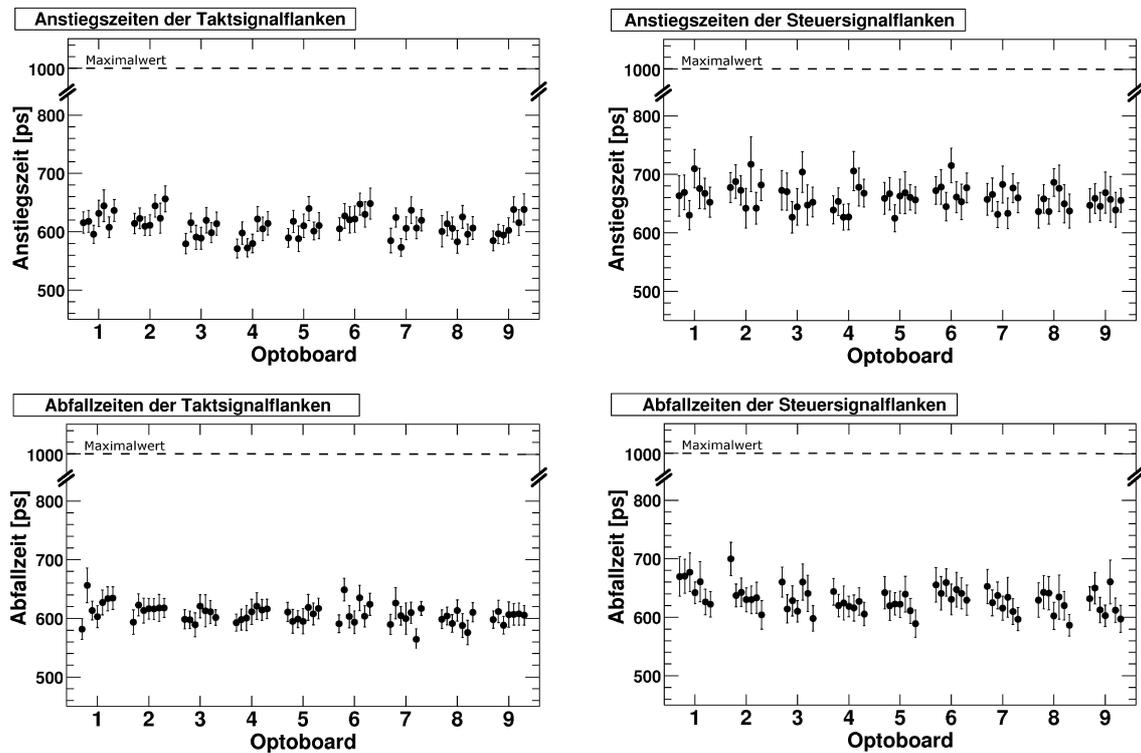


Abbildung D.2: Anstieg- und Abfallzeiten der rekonstruierten Takt- und Steuersignale

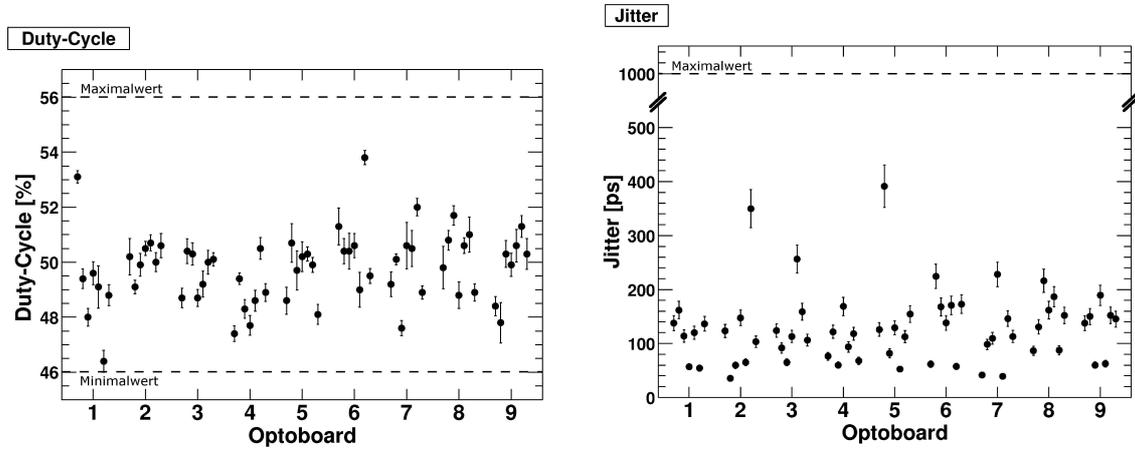


Abbildung D.3: Duty-Cycle und Jitter der rekonstruierten Taktsignale

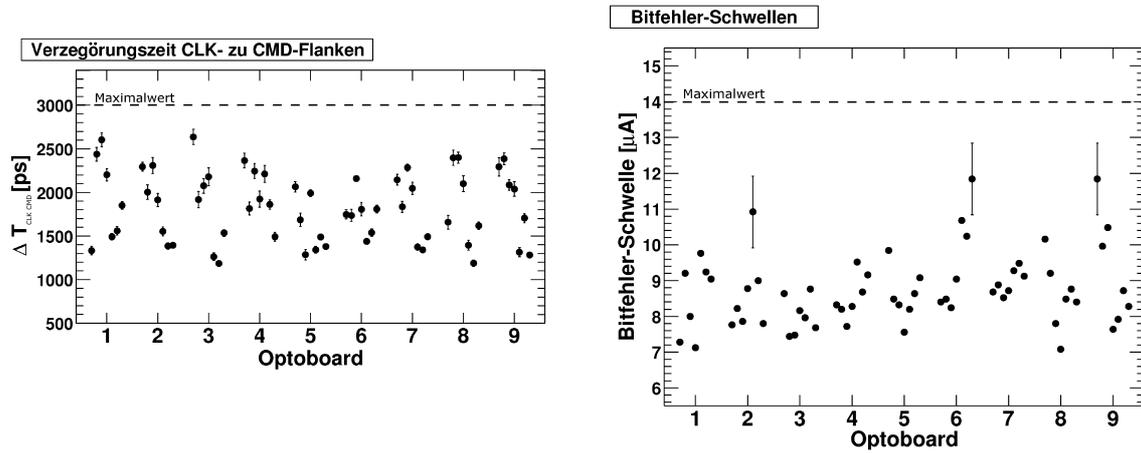


Abbildung D.4: Verzögerungszeiten der Steuersignal- zu den Taktsignalfanken und Bitfehler-Schwellen der DORIC-Kanäle

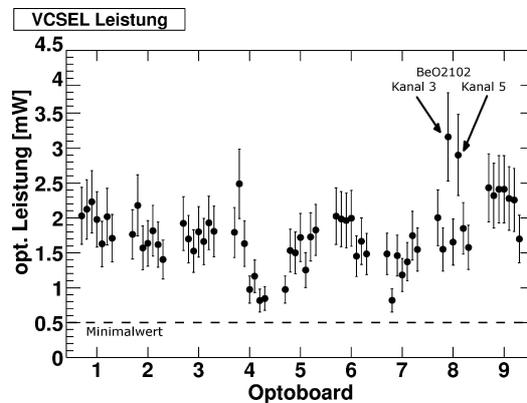


Abbildung D.5: Optische Leistungen der VCSEL

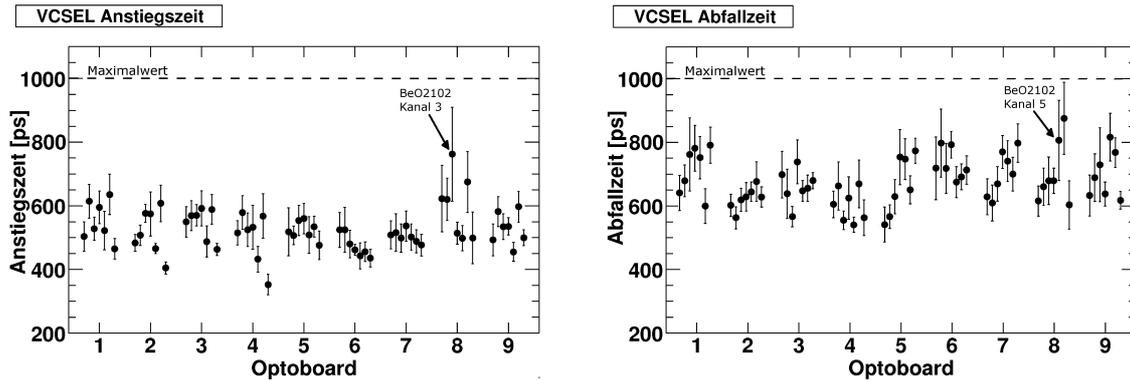


Abbildung D.6: Anstiegs- und Abfallzeiten der VCSEL-Signale

Die ersten drei Kanäle des PIN-Dioden-Arrays auf dem Optoboard werden von einem DORIC (DORIC 1) ausgelesen, die übrigen Kanäle von dem zweiten DORIC (DORIC 2). In Einzelfällen, wie diesem, haben die Ausgangssignale dieser beiden DORICs verschiedene LVDS-Mittelwerte, obwohl die LVDS-Amplituden übereinstimmen. Diese Abweichungen entstehen durch Fertigungstoleranzen und qualitativ nicht gleichwertige Montage der DORICs auf den Optoboards.

Die Diagramme in den Abbildungen D.2 und D.3 zeigen die Anstiegs- und Abfallzeiten der Flanken der rekonstruierten Signale, den Duty-Cycle, den Jitter der Taktsignale, die Verzögerungszeit der Taktsignal- zu den Steuersignalfanken sowie die Bitfehler-Schwellen. Im Diagramm der Bitfehler-Schwellen ist nur für zwei Messpunkte der 10 %-ige Fehler eingezeichnet.

Die Empfangseinheiten aller untersuchter Optoboards erfüllen die Qualitätsanforderungen.

D.2 Ergebnisse der Untersuchungen der VCSEL

Die Diagramme in den Abbildungen D.4 und D.5 zeigen die Ergebnisse der Untersuchungen der VCSEL-Signale der neun Optoboards. Das sind die Anstiegs- und Abfallzeiten der Flanken und die optischen Leistungen. Diese Messungen wurden mit $V_{\text{PIN}} = 10 \text{ V}$ am PIN-Dioden-Array der Messkarte VCSEL gemessen, da die Möglichkeit der Verdopplung von V_{PIN} (siehe Kapitel 5.4.2) zum Zeitpunkt der Messung noch nicht gegeben war. Diese Messungen wurden aufgrund des Unterschwingens mit den Messniveaus 20 % auf 60 % für die steigende Flanke und 80 % auf 40 % für die fallende Flanke gemessen und durch Multiplikation mit 1.5 auf die vorgeschriebenen Niveaus 20 % zu 80 % umgerechnet.

Einige Kanäle weisen erhöhte Anstiegs- und Abfallzeiten mit großer Standardabweichung auf, so z.B. bei Optoboard 8 (BeO2102). Der dritte Kanal dieses Optoboards hat eine erhöhte Anstiegszeit, zugleich wurde eine im Vergleich zum Durchschnitt aller Kanäle große optische Leistung von 3 mW gemessen. Der gleiche Zusammenhang findet sich bei der Abfallzeit des Kanals 5. Bei großen optischen Leistungen kann das Unterschwingen ansteigen und dann nicht mehr durch die Veränderung der Messniveaus umgangen werden. Einzelne Fehlmessungen treten auf, in denen die Messroutine des Oszilloskops die Messniveaus in den Bereich des Unterschwingens legt. Diese Fehlmessungen erhöhen den Mittelwert und vergrößern die Standardabweichung.

Alle Kanäle der Sendeeinheit erfüllen die Qualitätsanforderungen. Kontrollmessungen mit $V_{\text{PIN}} = 20 \text{ V}$ an Optoboard BeO2102 werden zeigen, ob die Anstiegs- und Abfallzeiten geringer als hier gemessen sind.

Literaturverzeichnis

- [ATDe1] ATLAS-Collaboration. *ATLAS DETECTOR AND PHYSICS PERFORMANCE Volume 1*, CERN/LHCC/94-14, Mai 1999.
- [ATDe2] ATLAS-Collaboration. *ATLAS DETECTOR AND PHYSICS PERFORMANCE Volume 2*, CERN/LHCC/94-15, Mai 1999.
- [Perk4] Donald H. Perkins. *Introduction to High Energy Physics*, Cambridge University Press, 4 ed., 2000.
- [ADOL3] The ALEPH Collaboration, the DELPHI Collaboration, the L3 Collaboration, the OPAL Collaboration (The LEP Working Group for Higgs Boson Searches). *Search for the Standard Model Higgs Boson at LEP*, CERN-EP/2003-011, Phys. Lett. B565 (2003) 61-75 2003.
- [FHüg] F. Hügging. *The ATLAS Pixel Detector*, physics/0412138 v2, 2005.
- [APOE] K.E. Arms, K.K. Gan, P.Jackson, et al (Department of Physics , The Ohio State University, Columbus, OH 43210, USA), P. Buchholz, M.Holder, M.Ziolkowski et al. (Fachbereich Physik, Universität Siegen, 57068 Siegen, Germany), *ATLAS Pixel Opto-Elektronics*, 2005.
- [InDe] ATLAS Collaboration. *PIXEL DETECTOR Technical Design Report*, CERN/LHCC/98-13, Mai 1998.
- [PixDe] ATLAS Collaboration. *INNER DETECTOR Technical Design Report*, CERN/LHCC/97-16, April 1997.
- [Gru93] Claus Grupen. *Teilchendetektoren*. Wissenschaftsverlag. 1993.
- [CERN] Internetseite des Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, CERN. www.cern.ch, 2005.
- [Ring] Clemens Ringpfeil. *Testsystem für den optischen Link des ATLAS-Pixeldetektors*, Diplomarbeit Bergische Universität Wuppertal, 2003.
- [GoAg] Govind P. Agrawal. *Fiber-Optic Communication Systems*. 2nd ed. John Wiley & Sons Inc, 1997.
- [Mesch] Dieter Meschede. *Optics, Light and Lasers*. Wiley-VCH, 2004.
- [Jah] Jürgen Jahns. *Photonik*. Oldenburg 2001.
- [VoPe] E. Voges, K. Petermann. *Optische Kommunikationstechnik*. Springer, 2002.
- [Kit] Ch. Kittel. *Einführung in die Festkörperphysik*. 12 Auflage, Oldenburg, 2002.

-
- [LVDS] National Semiconductor LVDS Group. *LVDS Owner's Manual Manual, Low-Voltage Differential Signaling*. National Semiconductor, 3rd Edition, 2004.
- [Kräm02] Michael Krämer. *Entwicklung eines Dekodierchips für optische Signalübertragung im ATLAS Pixel Detektor*, Diplomarbeit, Universität-Gesamthochschule Siegen, Mai 2002.
- [Nico00] Adrian Sorin Niculae. *Design and Implementation of an Optical Readout for the ATLAS Pixel Detektor*, Diplomarbeit, Universität-Gesamthochschule Siegen, 2000.
- [Cil02] Alexander Ciliox. *Radiation hardness tests of the optical data transmission system of the ATLAS pixel detector*, Diplomarbeit Universität-Gesamthochschule Siegen, 2002.
- [VCSEL] True Light. *TSD-8B12-000, High Performance Oxide-Confined VCSEL*, Datenblatt Rev. 2.03.
- [AsPro] K.K. Gan, P.Jackson, M.Ziolkowski et al. *Opto-board Assembly Procedure*, ATLAS Internal Note, ATL-IP-AP-0014, CERN 2005.
- [TestPro] K.K. Gan, P. Jackson, M. Ziolkowski et al. *Opto-board Test Procedure*, ATLAS Internal Note, ATL-IP-QP-0150, CERN 2005.
- [QA] K.K. Gan, P. Jackson, M. Ziolkowski et al. *Pixel Opto-Board QA*, ATLAS Internal Note, ATL-IP-QA-0014, CERN 2005.
- [PP0] E. Anderssen, G. Lenzen et al. *Pixel PP0 Patch Panel Design*, ATLAS Internal Note, ATLIP-ES-0073, CERN 2003.
- [POS] G. Lenzen. *Pixel Opto Services*, ATLAS Internal Note, ATL-IP-ES-0070, CERN 2004.
- [FDR] M. Garcia-Sciveres. *Optical Link FDR, PP0 and PP1*, Presentation, ATLAS Pixel Detektor Optolink FDR, CERN Februar 2003.
- [BPM] N. N. Kundu et al. *Biphase Mark Encoder and VCSEL Drive Control*, Project Code: NP-ALT-ROD-BIPHASE, University of Oxford, Department of Physics, ATLAS-Group, 1999.
- [DRX] D. J. White et al. *RAL232 / DRX-12*, CLRC Technology Department, Project: RAL232 /DRX Version 1.03, 1999.
- [MiZio] Michael Ziolkowski, *Mündliche Mitteilung im Zeitraum August 2004 bis August 2005*.
- [AR05] Axel Roggenbuck. *Untersuchungen zur Strahlenhärte des optischen Datenübertragungssystems für den ATLAS-Pixeldetektor*. Diplomarbeit, Universität-Siegen, in Arbeit.
- [ARmdl] Axel Roggenbuck. *Mündliche Mitteilung*, 2005.
- [APCS] M.Imhäuser, K.H. Becks, S. Kersten et al. *The Control System for the ATLAS Pixeldetector*, Wuppertal University.

- [ReICS] Susanne Kersten, Peter Kind. *Requirements for Interlock Circuit and System of the ATLAS Pixel Detector*, ATLAS Internal Note, ATL-IP-ES-0040, CERN 2004.
- [TeDICS] Susanne Kersten, Peter Kind. *Technical Description of the Interlock Circuit and System of the ATLAS Pixel Detector*, ATLAS Internal Note ATL-IP-ES-0041, CERN 2004.
- [Prak] Torsten Hüner, Eva Kopfer. *Praktikumsbericht*, Bericht des Schülerpraktikums, Universität Siegen, November 2004.
- [Reg] Victor H. Regener. *Statistical Significance of Small Samples of Cosmic-Ray Counts*, Physical Review 84, August 1951, 161.
- [PK] Peter Kind. *Schriftliche Mitteilung*, Universität Wuppertal, Mai 2005.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich zum Abschluss allen Menschen danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt

Prof. Dr. Peter Buchholz, für die Betreuung dieser Arbeit und sein Interesse an meinen Untersuchungen. Ganz besonders möchte ich mich bei ihm für seine engagierte Unterstützung bei der Planung meiner zukünftigen wissenschaftlichen Laufbahn bedanken.

Prof. Dr. Claus Grupen für die Bereitschaft, diese Arbeit als Zweitkorrekteur zu bewerten und dafür, dass er in der Universität immer gerne bereit war, Fragen zu diskutieren (und das sogar an Feiertagen).

Meinem Betreuer *Michael Ziolkowski* für die gute Zusammenarbeit und die anregenden Diskussionen, die oftmals zu fruchtbaren Ergebnissen geführt haben.

Dem Kollegen *Axel Roggenbuck*, ebenfalls für die gute Zusammenarbeit, die vielen kritischen Anmerkungen und für die gemeinsame Zeit des Wohnens im Studentenwohnheim mit vielen gemeinsamen "Analysemeetings", obwohl die dabei ausgearbeiteten Strategien nicht immer im geplanten Sinn funktioniert haben.

Meinen Kommilitonen *Bernhard Lange*, *Delia Brüser*, *Peter Kaufmann*, und *Markus Kuhn*, die mich im Studium begleitet und immer für ein amüsanter Klima gesorgt haben.

Nicolas Sanger, für die provokanten Kommentare eines Maschinenbauers, die den Text an mancher Stelle lesbar gemacht haben.

Meinen Eltern insbesondere dafür, dass ich nicht in den Schulkindergarten musste und auf das Gymnasium gehen durfte. Des Weiteren für den Rückhalt und die Unterstützung während des Studiums.

Ganz besonders möchte ich mich bei der charmanten *Jana Peters* bedanken, die sich so manches mal Kraut und Rüben gewidmet hat, einige längere anstrengend arbeitsreiche Nächte und Wochenenden mit mir am Institut durchlebt und mir geholfen hat, die Tippfehlerrate des Texts hoffentlich unter die Anforderungen der Qualitätssicherung zu drücken.