

Aufbau und Test der
Mikrostreifendetektormodule
für den Upgrade des
DELPHI Vertexdetektors

Dieter Knoblauch

Diplomarbeit

Institut für Experimentelle Kernphysik
Fakultät für Physik
Universität Karlsruhe(TH)

Karlsruhe, 26. Februar 1996

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Standardmodell und DELPHI Experiment	5
2.1	Das Standardmodell	5
2.2	Der LEP Beschleuniger	7
2.3	LEP 200	9
2.4	Das DELPHI Experiment	10
2.5	Das Auslesesystem und der Trigger	13
3	Die Halbleiterdetektoren	16
3.1	Die Eigenschaften von Silizium	16
3.2	Die Wechselwirkungen von Teilchen mit Silizium	18
3.3	Der pn-Übergang	20
3.4	Der Aufbau eines Halbleiterdetektors	22
3.5	Die Detektoren des Vertexdetektors	24
3.6	Die Detektortests	28
3.7	Die Auslese der Halbleiterdetektoren	35
4	Der Vertexdetektor	37
4.1	Der Aufbau des Vertexdetektors	38
4.2	Die Ganzmodule des Outer Layers	40
4.3	Die Montage der Ganzmodule auf Ringe	41
4.4	Die Ausrichtung des Vertexdetektors	43
4.5	Herstellung der mechanischen Trägerelemente	43
5	Das Kleben der Halbmodule	46
5.1	Die ZEISS-Maschine	46
5.2	Das Kleben der Halbmodule	49
5.3	Die Klebeanleitung	51
5.4	Das Kleben der Ganzmodule	59
6	Das Bonden der Halbmodule	61
6.1	Das manuelle Bonden	61

6.2	Die Parameter des Bonders	63
6.3	Der Umbau des Bonders	65
6.4	Das Bondprogramm	66
6.5	Das automatische Bonden	70
7	Die Auslesetests der Halbmodule	74
7.1	Der Ausleseplatz	74
7.2	Der Am^{241} -Test	74
7.3	Der Laser Test	77
7.4	Die Ladungsverteilung	79
7.5	Der Ladungsverlust	79
8	Die Ergebnisse der Halbmodulherstellung	82
8.1	Die Messungen der Koordinaten der Halbmodule	82
8.2	Die Creeping Modules	85
8.3	Die Zugfestigkeit eines Bondes	86
8.4	Die Mount Fujis	88
8.5	Die Ergebnisse der Auslesetests	90
8.6	Die Messungen der mechanischen Bauteile	90
9	Zusammenfassung	93

Kapitel 1

Einleitung

Für die Erforschung des Aufbaus der Materie in ihren kleinsten Dimensionen, die Untersuchung von Elementarteilchen und ihrer Wechselwirkungen, wurde um 1930 der erste Teilchenbeschleuniger gebaut. Später wurden Collider entwickelt, bei denen geladene Teilchen in einem Vakuumrohr entgegengesetzt beschleunigt werden. An bestimmten Punkten, den Interaktionspunkten, treffen die Teilchen aufeinander und es kann zu Kollisionen zwischen den beschleunigten Teilchen kommen. Um diese Interaktionspunkte werden Großexperimente mit vielen verschiedenen Detektorkomponenten angeordnet. In den letzten Jahren wurden in fast allen Großexperimenten Vertexdetektoren eingebaut. Dabei handelt es sich um Spurdetektoren, bestehend aus vielen einzelnen Halbleiterdetektoren, die rund um die Strahlachse präzise platziert werden. Durch ihre Ortsauflösung von wenigen Mikrometern ermöglichen Vertexdetektoren eine sehr präzise Spurrekonstruktion.

Am CERN in Genf wurde ein Elektronen–Positronen Collider, LEP, gebaut und seit 1989 mit Erfolg betrieben. Neben drei weiteren Großexperimenten, befindet sich der DELPHI Detektor an einem der Interaktionspunkte. Der in DELPHI installierte Vertexdetektor, mit seinen 0.42m^2 Detektorfläche und seinen 125 952 Auslesekanäle ermöglichte unter anderem Präzisionsmessungen der Masse und der Lebensdauer des τ Leptons. Ferner wurden Präzisionsmessungen der Lebensdauer von b -Hadronen aus Z^0 Zerfällen mit Erfolg durchgeführt.

Für die Erforschung der geladenen Austauscbosonen der schwachen Wechselwirkung, W^+ und W^- , und für die Suche nach dem Higgs Boson sowie Teilchen, die die supersymmetrische Erweiterung des Standardmodells der Elementarteilchenphysik fordert, wird die Schwerpunktsenergie von LEP schrittweise auf über 200 GeV erhöht und ein verlängerter Vertexdetektor, der Spuren mit kleinen Polarwinkeln erfassen kann, benötigt.

Das Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP) der Universität Karlsruhe hatte unter anderem zur Aufgabe 14 fertige Halbmodule für den '96er Vertexdetektor herzustellen. Ferner wurden verschiedene mechanische Trägerstrukturen in der institutseigenen Werkstatt gefertigt. In jüngster Zeit beschäftigt sich die Vertexgruppe mit dem Aufbau von Pixeldetektormodulen, die in die Endkappen

des Vertexdetektors eingebaut werden.

In Kapitel 2 werden, neben dem Standardmodell der Elementarteilchenphysik, der LEP Beschleuniger und das DELPHI Experiment beschrieben.

Nach der Beschreibung des prinzipiellen Aufbaus und der Funktionsweise von Halbleiterdetektoren, werden in Kapitel 3 die einzelnen Detektorkomponenten des DELPHI Vertexdetektors vorgestellt. Des weiteren enthält dieses Kapitel eine Zusammenfassung der durchgeführten Detektortests.

Das Kapitel 4 beschreibt detailliert den Aufbau des Vertexdetektors sowie seiner Komponenten. In diesem Zusammenhang werden die Schwierigkeiten bei der Herstellung der mechanischen Präzisionsteile aufgezeigt.

In Kapitel 5 wird eine Methode beschrieben, mit der beim Kleben der Halbmodule ein Höchstmaß an mechanischer Präzision erreicht werden kann.

Kapitel 6 beschäftigt sich mit der Herstellung der elektrischen Verbindungen zwischen den einzelnen Komponenten eines Halbmodules mittels Bondtechnologie. Bedingt durch die hohe Anzahl der Verbindungen auf den Halbmodulen, wurde die Automatisierung des Bondens erforderlich. Neben dem Umbau eines manuellen Bonders, wird die hierfür hergestellte Steuerungssoftware erläutert.

Kapitel 7 stellt die wichtigsten Auslestests der fertigen Halbmodule vor und zeigt auf, wie dadurch eine Beurteilung der Funktionstüchtigkeit der Module ermöglicht wird.

In Kapitel 8 werden schließlich die Ergebnisse der mechanischen Messungen der Halbmodule und der Trägerstrukturen und eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Auslestests vorgestellt.

Kapitel 2

Das Standardmodell und das DELPHI Experiment

2.1 Das Standardmodell

Die Elementarteilchenphysik beschäftigt sich mit dem Aufbau der Materie in den kleinsten Dimensionen. Man stellt sich die Materie aufgebaut aus elementaren, unteilbaren Teilchen vor. Diese Teilchen wechselwirken über Kräfte miteinander, schließen sich zu komplexen Strukturen zusammen und bilden somit die Materie, die wir direkt beobachten können und aus der wir selbst bestehen.

Man gliedert die bekannten Teilchen in zwei Gruppen, die Fermionen mit halbzahligem Spin und die Bosonen mit ganzzahligem Spin. Die Familie der Fermionen wird, wie in Tabelle 2.1 dargestellt, in Quarks und Leptonen unterteilt. Mit heutigen Meßmethoden zeigen sie keine Ausdehnung und gelten als elementar. Die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen werden durch Eichtheorien be-

	Ladung	Spin
Leptonen		
$e \ \mu \ \tau$	-1	$+\frac{1}{2}$
$\nu_e \ \nu_\mu \ \nu_\tau$	0	$-\frac{1}{2}$
Quarks		
$u \ c \ t$	$+\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{2}$
$d \ s \ b$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{2}$

Tabelle 2.1: *Die Familie der Fermionen*

schrieben, wobei sich die Teilnehmer einer Wechselwirkung in Gruppen zusammenfassen lassen und die Eichbosonen als Träger der Kräfte gelten. In Tabelle 2.2 sind die bisher bekannten vier Wechselwirkungen aufgeführt. Eine Integration der vierten Wechselwirkung, der Gravitationskraft, in das Standardmodell ist bis

dato noch nicht gelungen. Bei der Beschreibung physikalischer Vorgänge in solch kleinen Dimensionen kann sie allerdings vernachlässigt werden. Auch wurde das Graviton noch nicht nachgewiesen.

Wechselwirkung	Boson	Reichweite
Elektromagnetische WW	Photon	∞
Schwache WW	intermediäre Bosonen W^\pm, Z^0	10^{-18}
Starke WW	Gluon	$\leq 10^{-15}$
Gravitation	Graviton	∞

Tabelle 2.2: *Die verschiedenen Wechselwirkungen und ihre Eichbosonen.*

Die bekannteste Eichtheorie ist die Quanten–Elektro–Dynamik (QED), die die elektromagnetische Wechselwirkung beschreibt und die in der Physik die exaktesten Vorhersagen und Meßergebnisse liefert. Hier wurden die Theorien der Renormierung sowie der lokal eichinvarianten Feldtheorie mit der bis heute größten Präzision bestätigt. Die Störungsrechnung, bei der die Kopplungskonstanten entwickelt werden, wird ebenfalls sehr erfolgreich zur Beschreibung von Reaktionen höherer Ordnung angewendet. Zur Veranschaulichung dieses Verfahrens entwickelte Richard Feynman die Feynmangraphen, in denen die Ordnung durch die Anzahl der Vertices gegeben ist. Die fundamentale Darstellung der QED erfolgt durch die Gruppe $U(1)$. Die Ladung der Teilchen ist die elektrische Ladung e , mit der alle geladenen Teilchen an das Austauschboson, das Photon γ , koppeln. Aufgrund der Tatsache, daß das Photon masselos ist, hat die elektromagnetische Wechselwirkung eine unendliche Reichweite und die Photonen selbst wechselwirken nicht untereinander, da sie elektrisch neutral sind. Sie sind somit nur Vermittler der elektromagnetischen Kraft.

Die beiden anderen Wechselwirkungen können ebenfalls durch Feldtheorien beschrieben werden. Deren Eichbosonen sind aber nicht masselos, wodurch die Reichweite der Kraft begrenzt ist. Die schwache Wechselwirkung beruht auf der $SU(2)$ Gruppe und hat daher 3 Eichbosonen, das W^+ , das W^- und das Z^0 . Die schwache Ladung ist der Isospin. Durch eine Vektor–Axialvektor Kopplung der Wechselwirkung ist die Parität nicht erhalten. Die kleinere Kopplungskonstante unterdrückt die Wahrscheinlichkeit eines schwachen Zerfalls, auch wenn andere Zerfallsmodi möglich sind.

Die starke Wechselwirkung wird durch die Quanten–Chromo–Dynamik (QCD) beschrieben und beruht auf der Gruppe $SU(3)_{\text{colour}}$. Teilchen, die die starke Wechselwirkung erfahren, tragen Farbladungen in den Variationen rot (r), grün (g) und blau (b). Die acht Eichbosonen der QCD, die Gluonen g , tragen selbst Farbladungen. Daher können die Gluonen auch an sich selbst koppeln, was sowohl zum Quarkeneinschluß als auch zur Variation der Kopplungskonstanten α_s führt. α_s ist

für große Abstände klein, so daß die Störungstheorie anwendbar ist. Betrachtet man jedoch kleine Abstände, wie zum Beispiel die Abmessungen eines Protons, so ist $\alpha_s \approx 1$. Durch den Quarkeinschluß existieren keine freien Quarks. Sie treten nur im Zusammenschluß von zwei Quarks, den Mesonen, bzw. drei Quarks, den Baryonen in Erscheinung.

Die Beschreibung aller Kräfte durch das Konzept der Eichtheorien, läßt die Vermutung zu, daß es eine einheitliche Theorie gibt, die alle drei Wechselwirkungen als verschiedene Erscheinungsformen einer einzigen Wechselwirkung beschreibt. Glashow, Salam und Weinberg haben in einem ersten Schritt die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung zu dem GSW-Modell der elektroschwachen Wechselwirkung vereinigt. Das Standardmodell ist die Beschreibung der Natur durch die elektroschwache Wechselwirkung und der starken Wechselwirkung. Es erklärt viele Reaktionen auf dem Gebiet der Hochenergiephysik und ist durch experimentelle Bestätigung allgemein anerkannt. Trotzdem zeigen sich immer wieder Phänomene, die nicht durch das Standardmodell beschrieben werden können, weshalb viele Anstrengungen unternommen werden, das Standardmodell zu erweitern. Ein vielversprechender Weg, ist die Vereinigung der Theorie der Supersymmetrie mit dem Standardmodell, für die es bis heute allerdings keine experimentelle Nachweise gibt.

2.2 Der LEP Beschleuniger

Um das Standardmodell zu überprüfen, wurde am CERN¹ in Genf der LEP² Beschleuniger gebaut. LEP ist ein Ringbeschleuniger mit einem Umfang von 27 km. In ihm werden Elektronen und Positronen in einem Vakuumrohr, dem Strahlrohr, auf Energien von 45.2 GeV entgegengesetzt beschleunigt und gespeichert. Sie laufen in vier Paketen (Bunches) um. Bei dieser Energie erreichen die e^+ und e^- fast Lichtgeschwindigkeit, so daß sie für einen Umlauf ca. 89 μ s benötigen. Ungefähr alle 22 μ s treffen die e^+ - und e^- -Pakete an den vier Interaktionspunkten aufeinander, an denen die Großexperimente ALEPH, DELPHI, L3 und OPAL die Wechselwirkung bei der Vernichtung der Elektronen mit den Positronen beobachten (siehe Abbildung 2.1).

Die Elektronen und Positronen werden in Paketen im Linearbeschleuniger LIL³ erzeugt und auf 600 MeV beschleunigt. Von hier kommen die Pakete in den EPA⁴, um dann im PS⁵ auf 3.5 GeV beschleunigt zu werden. In den LEP Speicherring werden die Pakete mit einer Energie von 22.2 GeV eingespeist, die sie im SPS⁶ erhalten haben. Im LEP werden sie auf die nominelle Energie beschleunigt

¹**CERN:** Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire

²**LEP:** Large Electron Positron Collider

³**LIL :** Lep Injector Linac

⁴**EPA :** Electron Positron Accumulator

⁵**PS :** Proton Synchrotron

⁶**SPS :** Super Proton Synchrotron

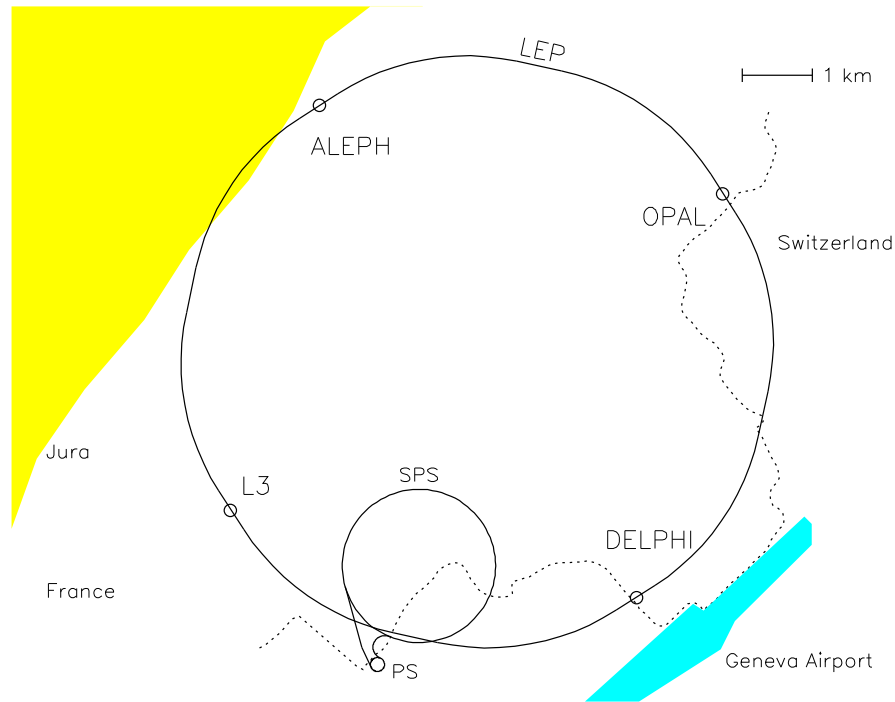


Abbildung 2.1: Lage des **LEP** Speicherringes. Zwischen dem Gebiet des Genfer Flugplatzes und dem Rande des französischen Juras liegt der LEP Speicherring in einem ca. 27km langen, ringförmigen Tunnel in einer Tiefe von etwa 100m. An vier Stellen des Ringes, den Interaktionspunkten von Elektronen und Positronen liegen die vier Großexperimente **OPAL**, **ALEPH**, **L3** und **DELPHI**. Ebenfalls eingezeichnet sind das **PS** (**P**roton **S**ynchrotron) und das **SPS** (**S**uper **P**roton **S**ynchrotron), die zur Vorbeschleunigung der Teilchenpakete verwendet werden, bevor diese in den LEP eingeschossen werden. [10]

und gespeichert. Die Anordnung der verschiedenen Beschleunigungsstufen wird in Abbildung 2.2 gezeigt.

Wenn die Pakete an den Interaktionspunkten aufeinandertreffen, wechselwirken mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit die Elektronen mit den Positronen. Mögliche Reaktionen sind Streuung (Bhabha- und Möller-Streuung), sowie deren Vernichtung unter Erzeugung von Photonen oder Z^0 -Eichbosonen. Die Energie des Schwerpunktsystems ist so gewählt, daß das Z^0 -Boson möglichst häufig gebildet wird, das innerhalb von 10^{-18} s in verschiedene Elementarteilchen zerfällt. Ziel der Experimente ist, alle Teilchen einer Reaktion zu beobachten, um so den Zerfall genau rekonstruieren zu können. Durch das Laborsystem, das bei einem Speicherring dem Schwerpunktsystem entspricht, wird keine Raumrichtung bevorzugt, weshalb ein Detektor den ganzen Raumwinkel von 4π abdecken muß.

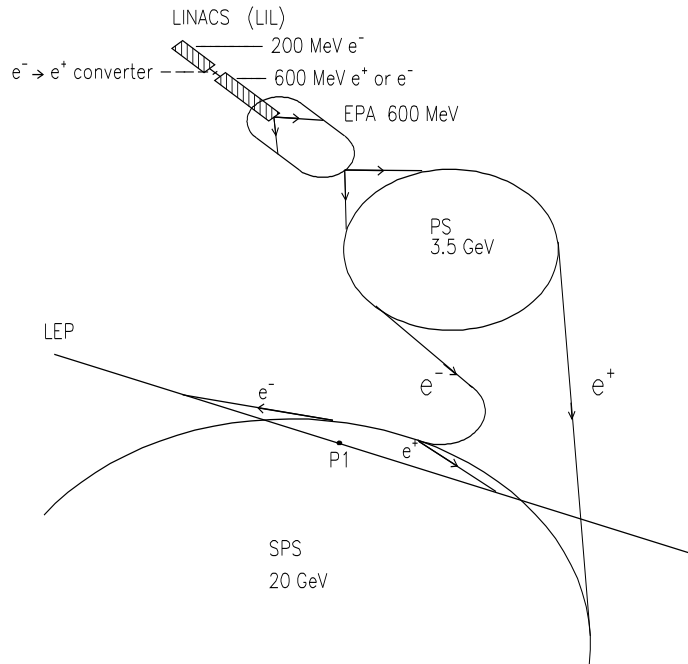


Abbildung 2.2: Die Vorbeschleunigungen bei LEP. Ein intensiver Elektronenstrahl wird auf ein Target geschossen. Abwechselnd werden die dabei entstandenen Positronen und getrennt zugeführte Elektronen im Linearbeschleuniger LIL beschleunigt und in den EPA eingespeist. Dort werden sie in Bunches (engl. Bündel) gesammelt und ins PS übergeführt. Nach der Beschleunigung im PS und dem anschließenden SPS werden die Bunches in den LEP Speicherring injiziert und auf ihre nominelle Energie beschleunigt.

2.3 LEP 200

Im Jahr 1995 wurde die Schwerpunktsenergie von LEP stufenweise bereits auf 140 GeV gesteigert. In der Zukunft soll die Energie in mehreren Phasen noch weiter erhöht werden. Ziel ist es, LEP mit einer Schwerpunktsenergie von mehr als 200 GeV zu betreiben. Schon nächstes Jahr soll LEP mit einer Schwerpunktsenergie über der W^+W^- -Schwelle von $175\text{--}180 \text{ GeV}$ bei einer Luminosität von $150\text{--}170 \text{ pb}^{-1}$ betrieben werden.

Durch die Erhöhung der Energie werden einige Antworten auf interessante Fragestellungen der Elementarteilchenphysik erwartet. Da die Schwerpunktsenergie über der W^+W^- -Schwelle liegt, bietet LEP 200 für die W -Massenbestimmung, gute Voraussetzungen. Nach der experimentellen Bestimmung der Top Quark Masse, erhofft man sich nun den Nachweis eines leichten Higgs Bosons, dessen Masse ein freier Parameter des Standardmodells ist, bei den mit LEP 200 erreich-

baren Energien. Auch wird man sich auf die Suche nach unbekannten Teilchen, z.B. die supersymmetrische Erweiterung des Standardmodells (SUSY) fordert, machen. Somit steht mit LEP 200 eine Maschine zur Verfügung, die eine sinnvolle Ergänzung zum LHC⁷ ist. Außerdem erhofft sich CERN durch LEP 200 Vorteile gegenüber dem Tevatron am Fermilab bei der Suche nach neuen Teilchen mit schwachen Wechselwirkungen. [1]

2.4 Das DELPHI⁸ Experiment

Das Großexperiment DELPHI, einer der Detektoren am LEP, zeichnet sich durch seine Vielseitigkeit aus. Die einzelnen Detektorkomponenten bieten die Möglichkeit zur Spurrekonstruktion, Teilchenidentifikation, Impulsmessung und Kalorimetrie. Der Aufbau von DELPHI wird in Abbildung 2.3 gezeigt. In der Mitte erkennt man den zylinderförmigen Zentraldetektor (Barrel). An beiden Seiten befinden sich Endkappen, wobei in diesen nicht alle Detektorarten des Barrels vertreten sind. Schwachstellen der Winkelabdeckung sind der Übergang zwischen dem Barrel und den Endkappen, sowie der Bereich um das Strahlrohr.

Durch die zylindrische Geometrie des gesamten Detektors liegt es nahe, ein zylindrisches Koordinatensystem einzuführen. Die z -Achse befindet sich in Richtung der Strahlachse, wobei die ϕ Koordinate den Azimuthwinkel rund um die Strahlachse beschreibt und R den Abstand vom Mittelpunkt der Strahlachse darstellt. R ist in der Regel durch den mechanischen Aufbau bekannt, z und ϕ werden hingegen durch die Detektoren bestimmt.

Der Detektor deckt den vollen Azimuthwinkel ϕ ab. Der Polarwinkel θ ist begrenzt durch das Strahlrohr. Der gesamte Detektor deckt einen Polarwinkel von 10° bis 170° ab, wobei das Barrel einen Bereich von 43° bis 137° erfasst.

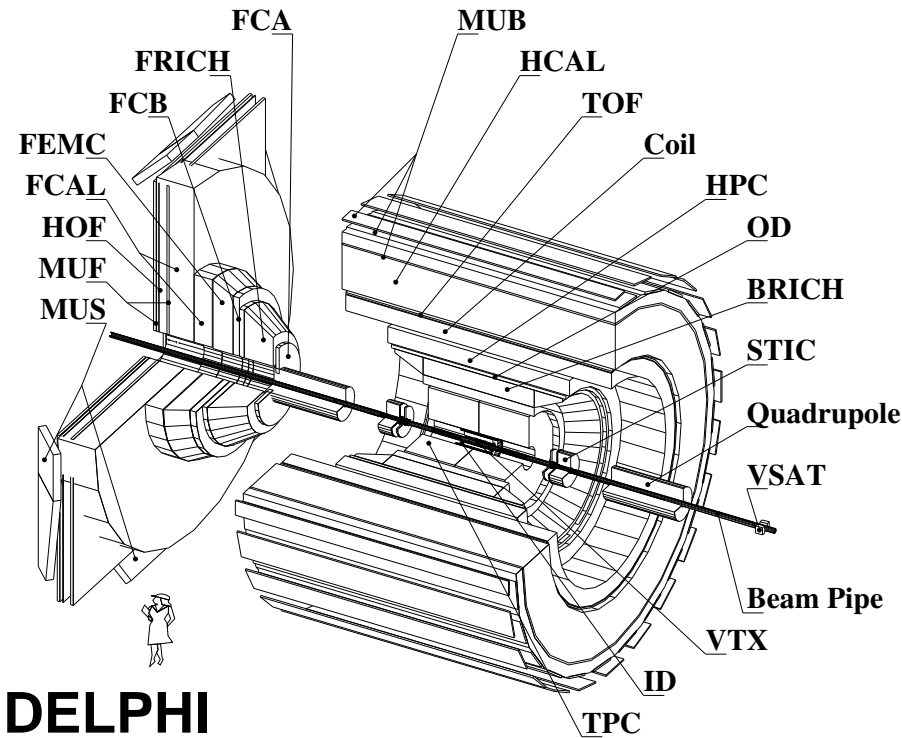
Die zylinderförmige Spule, in deren Magnetfeld die Spuren der geladenen Teilchen aufgrund der Lorentzkraft zu Spiralbahnen gekrümmt werden, prägt den DELPHI Detektor. Der Krümmungsradius ist proportional zum B-Feld und umgekehrt proportional zum Impuls des Teilchens und kann aus den Spurdaten bestimmt werden. Das Magnetfeld, das durch die supraleitende Spule erzeugt wird, weist eine Stärke von 1.23T auf mit einer Homogenität, die unter 0.1% liegt. Es wird ein Solenoidfeld verwendet, das die beste Impulsauflösung in Richtung von $R\phi$ erlaubt, ohne die e^+ und e^- -Bunches zu beeinflussen.

Die Detektorkomponenten des Barrel von innen nach außen sind:

Der Vertexdetektor. Er dient der Spurrekonstruktion und besteht aus drei konzentrischen Zylindermäntel aus Halbleiterdetektoren. Eine detaillierte Beschreibung des Vertexdetektors folgt in den nächsten Kapiteln.

⁷**LHC** : **L**arge **H**adron **C**ollider

⁸**DELPHI** : **D**Etektor with **L**epton, **P**hoton and **H**adron **I**dentification



DELPHI

Abbildung 2.3: Ansicht des DELPHI Detektors VTX: microVerTeX detector; ID: Inner Detector; TPC: Time Projection Chamber; B-RICH: Barrel Ring Imaging CHerenkov counter; OD: Outer Detector; HPC: High density Projection Chamber; TOF: Time Of Flight detector; HCAL: Hadron CALorimeter; MUB: Barrel MUon chambers; FCA: Forward Chamber A; FRICH: Forward RICH; FCB: Forward Chamber B; FEMC: Forward ElectroMagnetic Calorimeter; FCAL: Forward hadron CALorimeter; HOF: Forward HODoscope; MUF: Forward MUon chambers; S-MU: Surround MUon chambers; STIC: Small angle Tile Calorimeter; VSAT: Very Small Angle Tagger.

Der Inner Detector (ID). Der Inner Detector besteht aus einem Ring mit Driftkammern und fünf Lagen Vieldrahtproportionalkammern (MWPC), die eine schnelle Triggerinformation liefern.

Die Zeit-Projektions-Kammer (TPC). Die TPC ist der zentrale Spurdetektor von DELPHI. Er ist ebenfalls eine Driftkammer. Dieser Detektor erstreckt sich über einen Radius von 230 mm bis 1200 mm und ist 3m lang. Die TPC ist in sechs Sektoren unterteilt, wobei sich in jedem Sektor 192 Auslesedrähte befinden, die die $R\phi$ Koordinate der Spuren liefern. Die Signalhöhe ist proportional zu den Ionisationsvermögen der Teilchen. Die z -Information wird aus der Ankunftszeit der Signale an den Endkappen, an denen sich auch die Ausleseelektronik befindet, gewonnen. Von diesen

Punkten geht die Spurrekonstruktion für jedes Event aus. Durch den Energieverlust dE/dx , den die hindurchfliegenden Teilchen erfahren, wird eine Teilchenidentifikation ermöglicht.

Der Ring Cherenkov Zähler (RICH) rekonstruiert den Winkel, unter dem das Cherenkov-Licht ausgestrahlt wird, womit eine Teilchenidentifikation in einem großem Impulsintervall möglich wird.

Der Outer Detektor(OD) ist der äußerste Spurdetektor mit einem Radius von 2m und wurde direkt vor der Spule platziert. Er liefert eine schnelle Triggerinformation in $R\phi$ und RZ , erhöht die Impulsauflösung und besteht aus fünf Lagen von Driftröhren.

Der Elektromagnetische Kalorimeter (HPC). Dieser befindet sich innerhalb des Solenoidmagneten. Er basiert auf dem Prinzip der Zeitprojektion, womit man die elektromagnetischen Schauer in drei Dimensionen rekonstruieren kann. Er ist mit einer Dicke von 18 Strahlungslängen so bemessen, daß nur noch Hadronen und Myonen passieren können, alle anderen Teilchen werden gestoppt.

Der Flugzeit Detektor (TOF) befindet sich auf der Spule und besteht aus einer Lage von 172 Szintillatoren. Von diesem Detektor erhält man die Zeitinformation eines Events, und er ermöglicht eine Rückweisung von Spuren durch kosmische Strahlung.

Der Hadronische Kalorimeter (HCAL). Er besteht aus 20 Lagen Eisen, zwischen denen Streamerkammern die Energie der Schauer nachweisen. Der Kalorimeter ist in quaderförmige Pads segmentiert, die in Richtung des Wechselwirkungspunktes zeigen. Das Eisen dient zusätzlich als Joch für den Magneten.

Die Myon Kammern (MUB) sind Proportional-Driftkammern, die in zwei Lagen angeordnet sind. Die erste Lage befindet sich noch innerhalb des Jochs nach 0.9m Eisen, die zweite ist nach weiteren 0.2m Eisen auf das Joch montiert.

Der Aufbau der Endkappen entspricht im wesentlichen dem des Barrels, weshalb auf eine nochmalige Beschreibung verzichtet wird. Jedoch wird aufgrund der Geometrie die Auflösung des Barrels nicht erreicht. Die Zahl der Auslesekanäle ist ebenfalls geringer. Erwähnenswert ist die Erfassung kleiner Polarwinkel mit dem **SAT** und dem **VSAT**.

Der Small Angle Tagger (SAT) und der Very Small Angle Tagger (VSAT) sind zur Bestimmung der Luminosität montiert. Beides sind Kalorimeter mit guter Ortsauflösung, wobei der SAT in einen Polarwinkel von

2.5° bis 7.5° arbeitet, der VSAT in einem Bereich von 0.29° bis 0.4°. Beide registrieren Bhabha-Ereignisse⁹.

Detektor	Radius (cm)	Polarwinkel	Auflösung
μ -VTX	6.5	26 - 154	$R\Phi : 7\mu\text{m}$
	9.1	22 - 158	$R\Phi : 7\mu\text{m}$
	10.5	24 - 156	$R\Phi : 7\mu\text{m}$
ID	12 - 22	17 - 163	$R\Phi : 90\mu\text{m}$
	22 - 28	30 - 150	$z : \leq 1\text{mm}$
TPC	35 - 111	20 - 160	$R\Phi : 0.23\text{mm}$ $z : 0.9\text{mm}$
OD	198 - 206	43 - 137	$R\Phi : 0.11\text{mm}$ $z : 44\text{mm}$
Myon Kammern	$\approx 445(485)$	52 - 138	$R\Phi : 1.5\text{mm}$ $z:10\text{mm}$

Tabelle 2.3: Die grundlegenden Daten der Detektoren des Barrels, die der Spurrekonstruktion dienen.

Detektor	Radius (cm)	Polarwinkel	Auflösung
HPC	208 - 260	43 - 137	$23/\sqrt{E} + 1.1$
HCAL	320 - 479	10 - 170	$120/\sqrt{E}$

Tabelle 2.4: Die grundlegenden Daten der Detektoren des Barrels, die zur Energiebestimmung benutzt werden. [7]

Eine Auflistung der Spurdetektoren erfolgt in Tabelle 2.3. Die Detektoren, die der Energiebestimmung dienen, sind in Tabelle 2.4 zusammengefaßt. [2], [7], [8]

2.5 Das Auslesesystem und der Trigger

Jede Detektorkomponente hat ihre eigene Ausleseelektronik und einen Front End Puffer. In diesem werden die Daten der Detektoren für jeden Bunch Cross Over (BCO)¹⁰ geschrieben.

⁹Bhabha-Streuung: $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$

¹⁰**BCO: Bunch Cross Over**, Zeitpunkt, an dem die e^+ und die e^- -Pakete am Interaktionspunkt aufeinander treffen.

Da aber nicht bei jedem BCO ein interessantes Wechselwirkungsereignis stattfindet, ist ein Triggersystem installiert, das vermeidet, daß unwesentliche Ereignisse aufgezeichnet werden. Das Triggersystem hat vier Ebenen, von denen die ersten beiden reine Hardware Trigger sind. Die Informationen einiger Detektoren werden für eine Triggerentscheidung logisch miteinander verknüpft. Fällt der erste Trigger negativ aus, so steht der Detektor für den nächsten BCO zur Verfügung. Andernfalls wird die Entscheidung vom zweiten Trigger gefällt. Ist diese Triggerentscheidung negativ, so ist ein BCO verlorengegangen. Bei einem positiven Triggerergebnis werden die in den Front End Puffern gespeicherten Daten geleert und im Crate Event Puffer gespeichert. Dabei ist der gesamte Detektor für 3.5ms nicht sensitiv.

Die weitere Triggeranalyse geschieht per Software asynchron zum BCO. Hierbei werden die Daten auf ihren physikalischen Gehalt hin überprüft. Wenn alle vier Triggerstufen das Event als positiv ansehen, werden die Daten auf ein Data Summary Tape (DST) geschrieben und stehen zur weiteren Analyse bereit. Bei einer Schwerpunktsenergie von $\approx 91\text{GeV}$ verbleibt eine Aufzeichnungsrate von etwa 3Hz. [8]

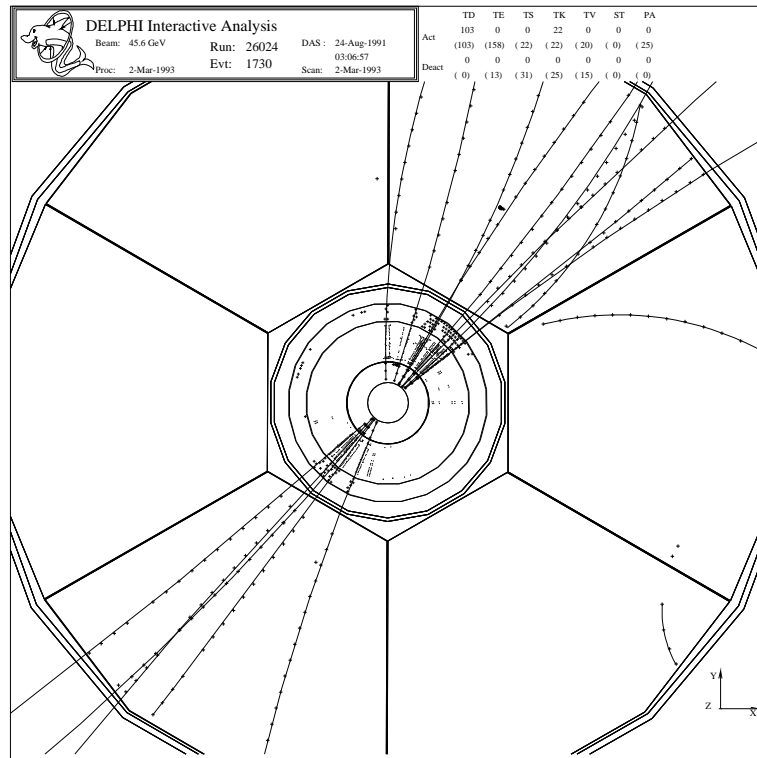


Abbildung 2.4: Die Spurrekonstruktion des Event Nummer 1730 in DELPHI. Bei der Rekonstruktion wurde ein Z^0 -Zerfall in $b\bar{b}$ nachgewiesen. Zwischen den beiden Kreisen in der Mitte befinden sich die drei Lagen des Vertexdetektors. Um den Vertexdetektor erkennt man die Spuren des Inner Detectors. Um diesen Bereich sind die sechs Sektoren der TPC mit ihren Treffern eingezeichnet. [7]

Kapitel 3

Die Halbleiterdetektoren des Vertexdetektors

Halbleiterdetektoren bestehen meist aus Silizium, auf denen Diodenstreifen implantiert sind. Ein hindurchfliegendes, geladenes Teilchen hinterläßt im Detektor, in dem die Dioden in Sperrichtung vorgespannt sind, eine Ionisationsspur, die kapazitiv ausgelesen wird. Aus diesen Daten ist eine genaue Spurrekonstruktion möglich.

3.1 Die Eigenschaften von Silizium

Silizium, ein Element der IV Hauptgruppe, zählt zu den Halbleitern und ist das meistgenutzte Material für die Herstellung von aktiven Bauelementen der Elektronik. Die Vorteile von Silizium gegenüber anderen Halbleiter liegen in der Möglichkeit, Siliziumdioxid als Isolator auf dem Substrat zu erzeugen und in der Fähigkeit, Silizium sehr präzise selektiv zu dotieren. Die Vorteile anderer Halbleitermaterialien wie zum Beispiel geringerer Bandabstand oder größere Beweglichkeit der Ladungsträger, werden nur in speziellen Gebieten wie zum Beispiel in der Hochfrequenzelektronik ausgenutzt. In der Detektorenentwicklung finden zur Zeit Untersuchungen statt, Galliumarsenit als strahlungshartes Material zu benutzen.

Für die Beschreibung der physikalischen Vorgänge in Halbleitern dient das Bändermodell. Eine ausführliche Beschreibung dieses Modells, sowie weitere Grundlagen der Halbleiterphysik findet man in [4] oder in [5]. Im Unterschied zu Isolatoren, hat Silizium nur einen kleinen Bandabstand, die sogenannte verbotene Zone (englisch gap). Die Energielücke zwischen der Unterkante des Leitungsbandes (LB) und der Oberkante des Valenzbandes (VB) beträgt bei Silizium nur $E_g = 1.1\text{eV}$. Die Besetzung der Niveaus geschieht nach der Fermi-Verteilung unter Berücksichtigung des Pauli-Prinzips, was bedeutet, daß Si bei $T = 0\text{K}$ ein Isolator ist. Bei Zimmertemperatur beträgt $kT \approx 0.026\text{eV}$, es gelangen keine La-

dungsträger vom VB ins LB; das reine Silizium leitet deshalb nicht. Da aber ein realer Kristall Kristallfehler und Verunreinigungen aufweist, die Niveaus in der verbotenen Zone bilden, gelangen Elektronen ins LB und verbleiben Defektelektronen (Löcher) im VB. Es gelten die Beziehungen:

$$n = N_L \exp\left(-\frac{E_L - E_F}{kT}\right) \quad (3.1)$$

$$p = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right) \quad (3.2)$$

wobei n die Elektronendichte im LB und p die Löcherdichte im VB ist. $N_{L,V}$ sind die Zustandsdichten von LB und VB, $E_{L,F,V}$ die Energien der unteren Leitungsbandkante, des Fermi-niveaus und der oberen Valenzbandkante, k ist die Boltzmann-Konstante und T die Temperatur.

Das thermische Gleichgewicht zwischen Generation und Rekombination beschreibt folgender Zusammenhang:

$$np = n_i^2 = N_V N_L \exp\left(-\frac{E_L - E_F}{kT}\right) \quad (3.3)$$

Mit n_i der intrinsischen Ladungsträgerdichte. Wenn $n = p = n_i$ gilt, ist der Kristall intrinsisch leitend, das Fermi-niveau liegt in der Mitte der verbotenen Zone.

Silizium kristallisiert im Diamantgitter, so daß alle vier Valenzelektronen in kovalenten Bindungen abgesättigt werden. Zur Erhöhung der freien Ladungsträgerkonzentrationen wird das Silizium gezielt verunreinigt, man spricht von dotieren. Werden in dem Siliziumeinkristall Atome der fünften Hauptgruppe, die ein Valenzelektron mehr besitzen, eingebracht, ist dieses zusätzliche Elektron nur schwach an das Fremdatom gebunden. Es genügt die thermische Anregung bei Zimmertemperatur, um dieses Elektron ins LB anzuheben. Fremdatome, die Elektronen ins Leitungsband abgeben, werden als Donatoren bezeichnet, das Silizium ist n-dotiert. Das Dotieren von vierwertigem Silizium mit Atomen der dritten Hauptgruppe, verhindert eine abgesättigte Bindung, da ein Elektron fehlt. Es entsteht eine Fehlstelle (Loch), die ein benachbartes Elektron anzieht, wobei dort nur drei der vier Bindungen abgesättigt werden. Diese Wanderung der Fehlstellen ist identisch mit einem freien Ladungsträger. Der so verunreinigte Kristall wird p-dotiert genannt, die dreiwertigen Atome bezeichnet man als Akzeptoren.

Die Leitungstypen unterscheiden sich in der Beweglichkeit ihrer Ladungsträger, für Silizium gilt: $\mu_e = 3\mu_h$. Die Gleichungen (3.1), (3.2) und (3.3) bleiben in ihrer Gültigkeit bei schwacher Dotierung erhalten. Die Anzahl der freien Ladungsträger kann dadurch um mehrere Größenordnungen erhöht werden.

3.2 Die Wechselwirkungen von Teilchen mit Silizium

In Silizium werden nur 3.6eV für die Erzeugung eines freien Ladungsträgerpaares benötigt. Durch die hohe Dichte von Silizium ergibt sich ein großer Energieverlust $\frac{dE}{dx}$ beim Durchgang hochenergetischer, geladener Teilchen. Deshalb eignen sich Teilchendetektoren aus Festkörpermaterialeien sehr gut in der Elementarteilchenphysik.

Der Zusammenhang zwischen dem Ionisationsvermögen hochenergetischer, geladener Teilchen und dem verwendeten Detektormaterial wird durch die Bethe-Bloch-Formel beschrieben. Dabei wird von einer inelastischen Streuung an Elektronen ausgegangen. Das geladene Teilchen verliert Energie an den Elektronen der Atome des Detektors. Die Atome werden dabei angeregt oder, wenn die übertragene Energie größer als die Bindungsenergie ist, ionisiert. [6]

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^2 z^2 N Z}{m_e v^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e v^2}{I(1 - \beta^2)} \right) - \beta^2 - \frac{A}{Z} \right] \quad (3.4)$$

Das einfallende Teilchen wird mit z , der Anzahl seiner Elementarladungen und seiner Geschwindigkeit v charakterisiert. Das Detektormaterial wird mit NZ , der Elektronendichte sowie durch das mittlere Ionisationspotential I beschrieben. Als Konstanten gehen die Elektronenmasse m_e und A ein. Mit A wird die Bindung der Elektronen in den verschiedenen Zuständen berücksichtigt. β ist gleich $\frac{v}{c}$. Für das Ionisationsvermögen gilt näherungsweise $I = Z * 13.5\text{eV}$, mit Z der Kernladungszahl.

MIPs¹ sind hochenergetische Teilchen mit minimalem Ionisationsvermögen. In Silizium liegt der wahrscheinlichste Energieverlust eines MIPs bei ungefähr $390 \frac{\text{eV}}{\mu\text{m}}$, was etwa 108 erzeugten Ladungsträgerpaaren entspricht.

Photonen können beim Durchgang durch Materie absorbiert werden, oder sie durchqueren die Materie ungehindert. Sie hinterlassen keine Ionisationsspur und können demnach nicht direkt nachgewiesen werden. Es sind jedoch drei Effekte bekannt, über die Photonen geladene Teilchen erzeugen und mit Detektoren nachgewiesen werden können.

- Photoeffekt: Ein auftreffendes Photon löst aus der Schale eines Atoms ein Elektron, meist aus der K- oder L-Schale, aus. Das Elektron hat die Energie des Photons abzüglich der Bindungsenergie, mit der es an das Atom gebunden war.

$$E_k = h\nu - E_{\text{Bind}} \quad (3.5)$$

Das freie Niveau wird von Elektronen der äußeren Schalen unter Aussendung weiterer Photonen aufgefüllt. Diese Photonen werden in der Regel

¹MIP : Minimal Ionizing Particle.

absorbiert, da sie im Bereich der Ionisationsenergie der Materie liegen. Somit wird die gesamte Energie des primären Photons registriert.

Das herausgelöste Elektron erzeugt durch Ionisation weitere Elektron–Loch–Paare. Wenn es gestoppt wird, ist die Zahl der Elektron–Loch–Paare :

$$N_e = N_h = \frac{E_k}{\omega} \pm \Delta N \quad (3.6)$$

Wobei N_e, N_h die Anzahl der erzeugter Elektronen, Löcher und ω die mittlere Energie zur Erzeugung eines Elektron–Loch–Paares² beschreibt.

Für ΔN gilt:

$$\Delta N = \sqrt{FN} \quad (3.7)$$

Dabei ist F der Fano–Faktor (Bei Si experimentell zu 0.1 bestimmt).

- Comptoneffekt: Darunter versteht man den Stoß eines Photons mit einem freien Elektron. Das Elektron wird als ruhend angenommen. Durch den Stoß überträgt das Photon einen Teil seiner Energie auf das Elektron und wird um einen Winkel Θ von seiner ursprünglichen Bahn abgelenkt. Dieses Elektron kann wieder weitere Elektron–Loch–Paare erzeugen (s.o.). Hier gilt folgende Energierelation:

$$h\nu = h\nu' + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos \Theta) \quad (3.8)$$

Das gestreute Elektron hat daher die Energie:

$$E_k = \frac{1}{1 + m_0c^2} \frac{h\nu}{1 - \cos \Theta} \quad (3.9)$$

Die übertragene Energie hängt hier vom Winkel ab, um den das Photon gestreut wird³.

- Paarbildung: Das Photon kann im Festkörper in ein e^+e^- –Paar zerfallen, dabei muß es aufgrund der Energieerhaltung eine Energie besitzen, die größer als die Ruhemasse eines Elektrons und eines Positrons ist. Das Positron ist instabil und annihiliert, nachdem es gestoppt wurde, mit einem Elektron der Materie. Hierbei werden zwei Photonen mit jeweils $h\nu = m_0c^2 = 511\text{keV}$ ausgesendet.

Bei einer Energie von 60keV, die mit der Energiedeposition von MIPs⁴ in 280 μm dickem Si vergleichbar ist, tritt dieser Effekt nicht auf.

²Bei Si 3.6 eV wobei 1.1 eV der Abstand der Bandkanten ist. Die restliche Energie geht in die Anregung von Phononen im Kristall.

³ist maximal, beim zentralen Stoß, $\cos \Theta = -1$.

⁴**MIP** : Minimal Ionizing Particle, Teilchen, die die minimale Energie im Detektor deponieren.

3.3 Der pn-Übergang

Die Zahl der freien Ladungsträgerpaare, die durch die verschiedenen Wechselwirkungen erzeugt werden (typisch 2×10^4), ist sogar im intrinsischen Silizium um Größenordnungen kleiner als die Zahl der freien Ladungsträger des Halbleiters selbst (im Bereich von 10^9). Dadurch rekombinieren die erzeugten Ladungsträger mit den im Silizium vorhandenen und können somit nicht gemessen werden. Die Zahl der freien Ladungsträger im Halbleiter muß verringert werden. Mit Hilfe von sogenannten pn-Übergänge kann dies realisiert werden.

Bringt man einen p- und einen n-dotierten Bereich in Kontakt, so ändert sich die Konzentration der freien Ladungsträger sprunghaft, wobei sich in beiden Bereichen ein einheitliches Fermieniveau ausbildet, indem sich die (chemischen) Potentiale der beiden Leitertypen verschieben. Im Kontaktbereich diffundieren Elektronen in die p-Zone und Löcher in die n-Zone. Sie rekombinieren mit den dort vorhandenen freien Ladungsträgern und es verbleiben die ionisierten Störstellen. Diese bilden die sogenannte Raumladungszone, die frei von Ladungsträgern ist. Das Feld der Raumladungszone wirkt der Drift entgegen und begrenzt sie. Da der gesamte Kristall neutral sein muß, gilt:

$$N_A \omega_p = N_D \omega_n \quad (3.10)$$

mit N_A, N_D als Konzentrationen von Akzeptoren und Donatoren und ω_p, ω_n die Dicke der Raumladungszonen im p- bzw. n-dotierten Bereich.

Es liegt nahe, einen Kastenansatz zu machen und die Poissongleichung zu lösen.

$$\frac{d^2 V_{p,n}}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} = -\frac{q N_{A,D}}{\epsilon} \quad (3.11)$$

Durch dreimaliges Integrieren mit den Randbedingungen $E(x = -\omega_p) = 0$ und $V(x = -\omega_p) = 0$ erhält man das elektrische Potential :

$$E(x) = -\frac{dV}{dx} = \frac{q N_A}{\epsilon} (\omega_p - x) \quad (3.12)$$

Die Höhe der Potentialbarriere im p-Bereich ist somit $V(0) = V_p$:

$$V_p = \frac{q N_A \omega_p^2}{2\epsilon} \quad (3.13)$$

Für den n-Bereich gilt entsprechendes. Ohne äußeres Feld gilt $V_p + V_n = V_d$. Das Diffusionspotential V_d , beträgt bei Raumtemperatur typischerweise einige 100mV.

An den pn-Übergang kann man eine Spannung V_{BP} in Sperrichtung anlegen, wobei die Gleichungen (3.12) und (3.13) gültig bleiben, wenn V_d durch $V_b = V_d + V_{BP}$ ersetzt wird. Daraus ergeben sich die Breiten der Raumladungszonen:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{2\epsilon V_b}{q N_A (1 + \frac{N_A}{N_D})}} \quad (3.14)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{2\epsilon V_b}{qN_D(1 + \frac{N_D}{N_A})}} \quad (3.15)$$

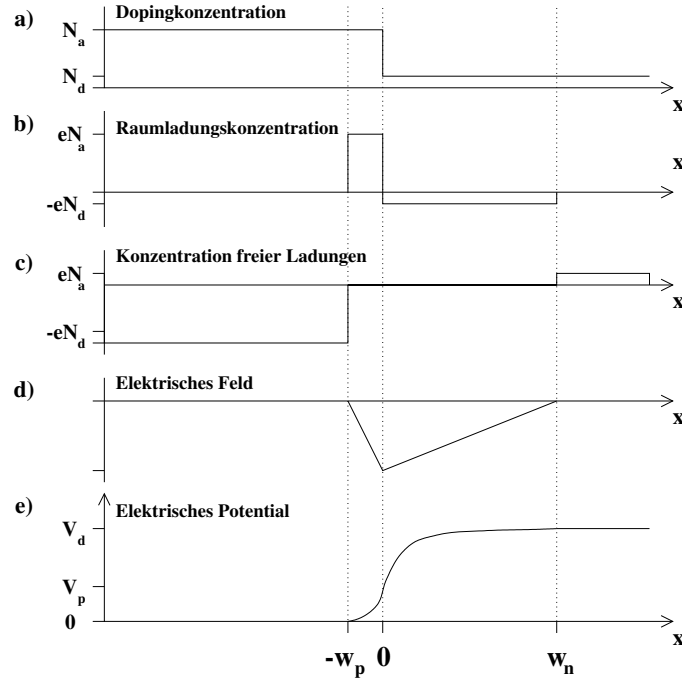


Abbildung 3.1: Die physikalischen Größen eines pn-Überganges. [8]

In der Raumladungszone werden durch thermische Anregung ständig neue Elektron-Loch-Paare generiert, die durch das elektrische Feld getrennt werden. Dadurch ist die Wahrscheinlichkeit der Rekombination der freien Ladungsträger sehr klein. Es entsteht ein Generationsstrom, für dessen Stromdichte gilt:

$$j_{gen} = \frac{1}{2} q \frac{n_i}{\tau_0} W \quad (3.16)$$

τ_0 entspricht der effektiven Lebensdauer der Minoritätsladungen und W der Dicke der verarmten Zone.

Liegt eine große Spannung V_{BP} an, so dehnt sich die Raumladungszone über die gesamte Detektordicke aus und der kleine Generationsstrom wird durch Gleichung 3.16 bestimmt. Damit die durch einen Teilchendurchgang in der Raumladungszone erzeugten Ladungen nicht unmittelbar in die Spannungsquelle abfließen können, muß die Diode über einen hochohmigen Widerstand, dem Biaswiderstand, an die Spannungsquelle angeschlossen werden. Somit ist sichergestellt, daß das Signal lange genug existiert, um detektiert werden zu können.

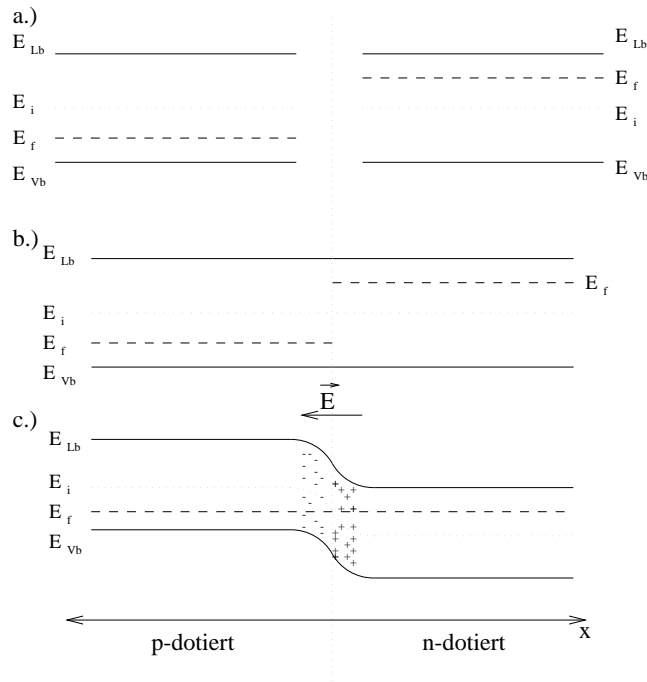


Abbildung 3.2: Das Bändermodell eines pn-Überganges. Dargestellt ist ein n- und ein p-dotierter Halbleiter räumlich getrennt (a), räumlich in Kontakt vor (b) und nach (c) dem Einstellen des thermischen Gleichgewichts. Nach dem Kontakt der p-Zone mit der n-Zone diffundieren die Löcher in die n-Zone und die Elektronen in die p-Zone. Es bildet sich eine Raumladungszone und das dadurch entstandene elektrische Feld wirkt der Drift entgegen. Das Fermieniveau gleicht sich aus, wodurch ein stetiger Übergang der Energieniveaus der Valenz- und Leitungsbänder entsteht. [10]

3.4 Der Aufbau eines Halbleiterdetektors

Streifendetektoren sind aus einem schwach n-dotierten Siliziumsubstrat hergestellt, auf dessen Oberseite stark p-dotierte Streifen (Diodenstreifen) implantiert werden. Die Rückseite ist bei einseitigen Detektoren ganzflächig stark n-dotiert und metallisiert. Die Metallisierung und die starke n-Dotierung auf der Rückseite gewährleisten eine gute elektrische Verbindung zum n-Substrat. Abbildung 3.3 zeigt eine Darstellung dieses Aufbaus. Bei den Streifendetektoren wird eine große Anzahl von parallelen, streifenförmigen Dioden auf dem Siliziumsubstrat implantiert. Jeder Diodenstreifen ist über einen Biaswiderstand an eine umlaufende Leiterbahn, der Bias Line, verbunden. Der sensitive Bereich des Detektors wird an den Rändern durch einen oder mehrere Guard Ringe abgeschlossen. Der Guard Ring ist eine große linienförmige Diode, die einen homogenen Feldverlauf innerhalb des sensitiven Bereichs sicherstellt und die hohe Zahl der freien Ladungsträger, generiert durch die vielen Gitterstörungen am Rand des Detektors,

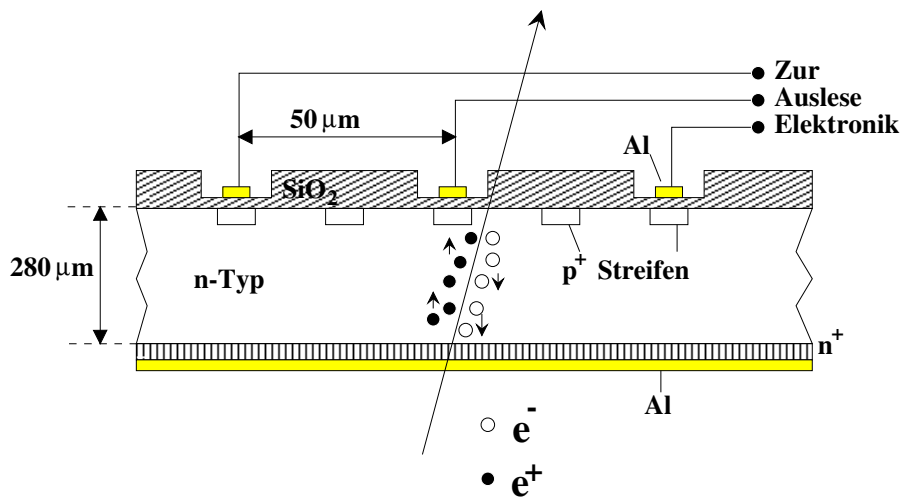


Abbildung 3.3: Schnitt durch einen Detektor. Auf einen n -Bulk werden p^+ -Streifen implantiert. Zur kapazitiven Auskopplung befindet sich zwischen den Diodenstreifen (p^+) und den Auslesestreifen (Al) eine dünne Isolationsschicht aus SiO_2 . In dem elektrischen Feld des vollständig depletierten Detektors wandern die durch einen Teilchendurchgang erzeugten Löcher zu den p -Streifen und erzeugen dort ein Signal. [8]

sammelt und niederohmig an die Spannungsquelle ableitet.

In dem elektrischen Feld des vollständig depletierten⁵ Detektors wandern die durch einen Teilchendurchgang erzeugten Löcher zu den p -Streifen und erzeugen dort ein Signal. Das Signal wird ausgekoppelt und an einen empfindlichen Differenzverstärker weitergeleitet. Die Auskopplung des Signals kann auf zwei Arten erfolgen. Eine Möglichkeit ist die Gleichspannungskopplung (DC): Ein Strom, verursacht durch eine Teilchenspür, erzeugt am Biaswiderstand eine Spannungsänderung. Das Potential des Diodenstreifens wird verstärkt und gemessen. Da aber die Sperrströme der einzelnen Streifen sehr unterschiedlich sind, wird der dynamische Bereich durch eine notwendige Offset-Korrektur stark eingeschränkt.

Die zweite Möglichkeit ist eine kapazitive Auskopplung (AC) des Signals. Auf den Diodenstreifen werden, durch eine dünne Isolationsschicht (SiO_2) getrennt, Aluminiumstreifen (Auslesestreifen) aufgebracht. Diese Auslesestreifen werden mit der Ausleseelektronik verbunden. Somit werden die Signale von Teilchendurchgängen an die Verstärker übertragen, während die Sperrströme der Dioden über die Biaswiderstände abfließen und die Ausleseelektronik nicht stören.

⁵von einem vollständig depletierten Detektor spricht man, wenn sich die Raumladungszone über die gesamte Detektordicke ausdehnt.

3.5 Die Detektoren des Vertexdetektors

Beim Outer Layer des Vertexdetektors kommen zwei Typen von Detektoren und eine Ausleseelektronik zur Anwendung. Es handelt sich bei beiden Detektortypen um einseitige Mikrostreifendetektoren. Entsprechend dem zylindrischen Koordinatensystem des Vertexdetektors innerhalb des DELPHI Detektors werden diese als $R\Phi$ - bzw. RZ-Detektoren bezeichnet.

Der RZ-Detektor Die RZ-Detektoren wurden von der Firma SINTEF in Norwegen hergestellt. Sie sind $33.5 \times 60 \times 0.3$ mm groß und besitzen 1280 Diodenstreifen mit einem Pitch von $45\mu\text{m}$. Die Diodenstreifen sind quer zur Längsseite des Detektors angeordnet und 32 mm lang. Die Spannungsversorgung der Diodenstreifen ist hier mit Biaswiderständen aus polykristallinem Silizium an den Enden der p-Implantate realisiert. Über den p-Streifen befindet sich zur kapazitiven Entkopplung eine dünne SiO_2 Schicht, auf der die Aluminiumstreifen aufgebracht sind. Über dieser ersten Metallisierung (M1) liegt eine Isolationsschicht aus Polyimid. Auf dieser liegen die längsliegenden Auslesestreifen (M2), die eine elektrische Verbindung zur Ausleseelektronik herstellen. Daher wurde dieser Konstruktion der Name Double Metal Layer gegeben. Zur Herstellung des elektrischen Kontaktes zwischen der ersten und der zweiten Lage der Aluminiumstreifen befinden sich Öffnungen in der Polyimidschicht, in die die Durchkontaktierungen gesetzt sind. An beiden Enden der Auslesestreifen befinden sich Bond Pads mit den Abmessungen von $50 \times 100\mu\text{m}$, die der elektrischen Verbindung der Auslesestreifen dienen. Es werden drei verschiedene Typen von RZ-Detektoren verwendet:

- **Der RZ-320 Detektor.** Je zwei benachbarte Diodenstreifen sind parallel geschaltet und werden von einem Polysilizium-Widerstand versorgt. Jeder zweite Doppelstreifen wird ausgelesen. Dadurch ergibt sich ein Auslesepitch von $180\mu\text{m}$. Durch diese Konstruktion benötigt man lediglich 320 Auslesestreifen für die komplette Auslese des Detektors. Die Durchkontaktierungen, die mit bloßem Auge zu erkennen sind, verlaufen vom linken Rand der oberen Seite zur Mitte der unteren Seite. Die weiteren 320 Auslesestreifen dienen nur der elektrischen Durchführung der Signale weiterer Detektoren. Abbildung 3.4 zeigt den Aufbau dieses Detektortypes.
- **Der RZ-640 Detektor.** Hier wird jeder zweite Diodenstreifen ausgelesen, und somit jeder der 640 Auslesestreifen mit einem Diodenstreifen verbunden. Jeder Diodenstreifen hat seinen eigenen Polysiliziumwiderstand für die Versorgung mit Depletionsspannung. Der Auslesepitch beträgt $90\mu\text{m}$. Die Durchkontaktierungen verlaufen von der linken oberen Ecke zur rechten unteren Ecke des Detektors.

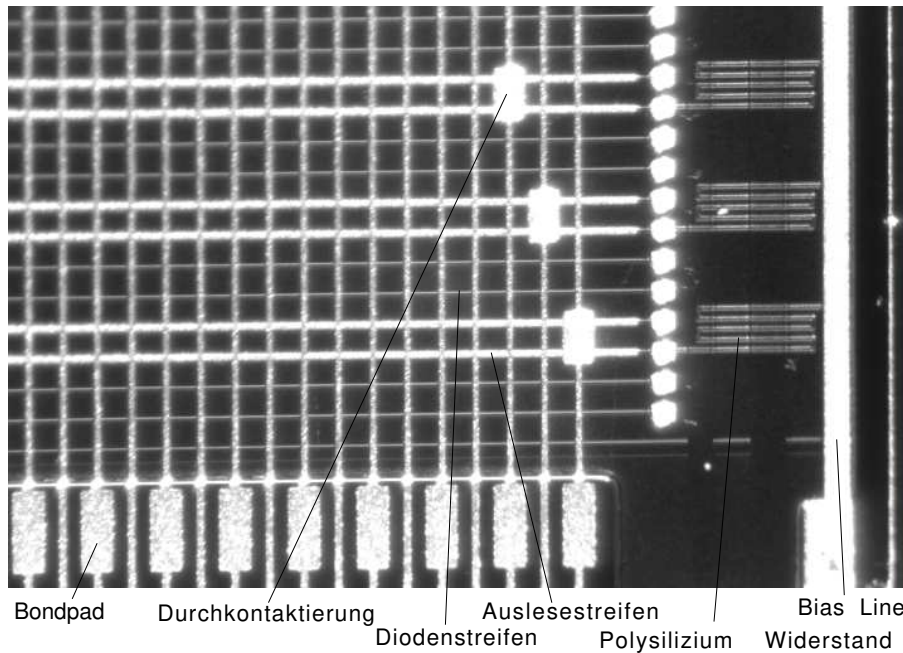


Abbildung 3.4: Aufbau des RZ-320 Detektor. Die verschiedenen Strukturen sind deutlich zu erkennen. Unter der Bias Line liegt der Guard Ring, eine große Flächendiode, die den sensitiven Bereich gegenüber den Kanten abschirmt. Unter den Auslesestreifen (Al) liegen ebenfalls kapazitiv ausgekoppelte Diodenstreifen.

- **Der RZ-1280 Detektor.** Bei diesem Typus wird jeder Diodenstreifen ausgelesen, der Auslesepitch beträgt also $45\mu\text{m}$. Jeder Diodenstreifen hat wiederum seinen eigenen Biaswiderstand. Jeder Auslesestreifen ist mit zwei Diodenstreifen verbunden. Zwischen den beiden Diodenstreifen eines Auslesestreifens liegen jeweils 320 andere Diodenstreifen. Zu erkennen ist dieser Typus durch den Verlauf der Durchkontaktierungen von links oben nach rechts zur Mitte der Längsseite und von der linken Mitte zur rechten unteren Ecke des Detektors.

Der $R\phi$ -Detektor

Die Abmessungen der $R\phi$ -Detektoren betragen $33.5 \times 60 \times 0.3\text{mm}$. Der von der Firma Hamamatsu unter der Bezeichnung spl-6202 gefertigte Detektor ist mit seinen 1281 längsliegenden Diodenstreifen spiegelsymmetrisch aufgebaut. Die Diodenstreifen haben eine Länge von 58 mm und einen Pitch von $25\mu\text{m}$. Es wird nur jeder zweite Diodenstreifen ausgelesen, der Detektor hat also einen Auslesepitch von $50\mu\text{m}$. Die Auslesestreifen liegen direkt über den Diodenstreifen, isoliert durch eine dünne Schicht SiO_2 , wodurch eine kapazitiv gekoppelte Auslese gewährleistet ist. An beiden Enden befinden

sich jeweils zwei Bond Pads mit einer Größe von $60 \times 120 \mu\text{m}$. FOXFET⁶ Strukturen an einem Ende der Diodenstreifen versorgen die Diodenstreifen mit der nötigen Depletionsspannung. Um elektrischen Kontakt zu den p-Implantaten herzustellen zu können, sind Kontaktpunkte an dem anderen Ende der Diodenstreifen installiert. In Abbildung 3.5 ist ein Teil des $R\Phi$ -Detektors zu sehen.

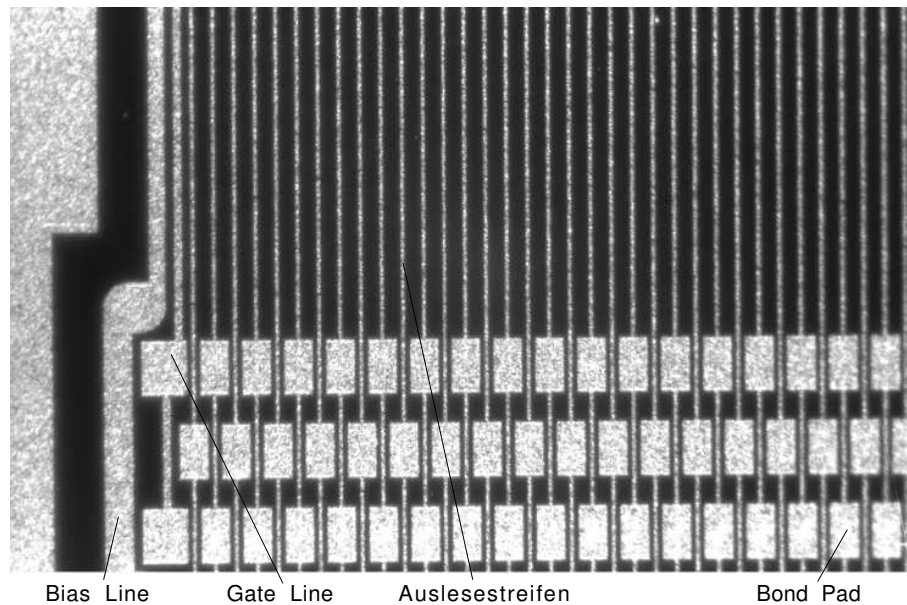


Abbildung 3.5: Der Aufbau des $R\Phi$ -Detektors. Unter den Auslesestreifen befinden sich kapazitiv ausgekoppelte Diodenstreifen. Nicht zu erkennen sind Diodenstreifen zwischen den Auslesestreifen, die nicht ausgelesen werden.

Im Inner und Closer Layer kommen doppelseitige Streifendetektoren zum Einsatz. Im Bereich des VFT sind Macropixeldetektoren und Ministripdetektoren montiert.

- Die doppelseitigen Detektoren

Doppelseitige Detektoren besitzen sowohl längs- als auch querliegende Halbleiterstrukturen. Beide Koordinaten können somit mit nur einem Detektor erfaßt werden. Die längssymmetrische Struktur auf der Oberseite entspricht dabei im wesentlichen der Struktur der $R\Phi$ -Detektoren, während auf

⁶**FOXFET** : **F**ield **O**xide **F**ield **E**ffect **T**ransistor ist eine p^+np^+ Struktur, mit der man hohe Widerstandswerte bei gleichzeitiger guter Uniformität erreichen kann. Der Widerstand kann in weiten Bereichen mit Hilfe einer Gate-Spannung variiert werden. Eine detaillierte Beschreibung des FOXFET-Überganges liegt in [10] und [14] vor.

der Unterseite keine pn-Übergänge verwendet werden können. Die Rückseite des n-Substrates wird deshalb mit stark n-dotierten Streifen querliegend segmentiert und an die Depletionsspannung angelegt. Durch eine Elektronen-Akkumulationsschicht zwischen dem Silizium des Substrates und der SiO_2 -Schicht verteilen sich mit dieser einfachen Struktur die zu detektierenden Ladungsträger allerdings über viele Streifen. Legt man hingegen zwischen diese n^+ -Streifen p^+ -Streifen, wird die Akkumulationsschicht unterbrochen und eine Koordinatenzuordnung möglich. Durch die querliegenden Strukturen muß hier, wie bei den RZ-Detektoren eine Seite als Double Metal Layer ausgelegt werden. In [10] und [15] wird dies näher diskutiert. Dort wird auch ein weiterer Lösungsvorschlag mit Metallelektroden anstelle der p^+ -Streifen beschrieben.

- Die Pixeldetektoren

Die $22 \times 70 \times 0.3$ mm großen Macropixeldetektoren werden in der Schweiz von der Firma CSEM hergestellt. Die Diodenstrukturen sind hier im wesentlichen quadratisch zu Pixeln angeordnet. Jedes Pixel hat eine sensitive Fläche von $330 \times 330 \mu m$, die zu Feldern von je 24×24 bzw. 24×16 Pixeln zusammengefaßt werden, wobei 16 dieser Felder einen Detektor bilden. Jeder Detektor hat somit 8064 Pixel, die allerdings nur digital ausgelesen werden⁷. Jedes Pixel ist mit einem eigenen ladungsempfindlichen Verstärker ausgestattet, der in Flip Chip Bondtechnik mit dem Pixel verbunden ist. An beiden Seiten des Pixeldetektors befinden sich die Versorgungs- und Busleitungen, die die Auslesechips mit normalen Bond Pads verbinden und den Anschluß zur externen Elektronik sicherstellen. In Abbildung 3.6 wird das Flip Chip Bonden und ein Ausschnitt eines Pixeldetektors dargestellt, während Abbildung 3.7 ein Pixeldetektormodul zeigt. Bei der Flip Chip Bondtechnik liegen die Bond Pads auf der sensitiven Fläche der Diode. Dort wird ein Ball-Bond gesetzt⁸. Auf jeden Verstärker wird ein kleiner Tropfen leitender Kleber aufgebracht und auf den Detektor gedrückt. So wird der Ball auf dem Pixel mit dem Bond Pad des Verstärkerchips verklebt.

- Die Ministripdetektoren

Die Ministreifendetektoren im Bereich des VFT sind als Standard Single Sided Streifendetektoren mit kapazitiver Auslese ausgelegt. Zur zweidimensionalen Ortsbestimmung werden zwei Detektoren gekreuzt eingesetzt. Ein

⁷Liegt das Signal eines durchfliegenden Teilchens über einer einstellbaren Schwelle (Discriminator), so wird dieses Pixel auf 1 gesetzt. Die Schwelle wird so eingestellt, daß das Pixel auf normales Rauschen nicht anspricht, aber sicher anspricht, wenn ein MIP hindurch fliegt. Es werden keine Informationen über die Pulshöhe ausgelesen.

⁸Durch Hochspannung entsteht ein Funkenschlag, der den Aluminiumdraht zum Schmelzen bringt, so daß sich beim Abkühlen eine Kugel, ein *Ball*, bildet. Dieser Ball wird auf das Bond Pad mittels Ultraschall aufgeschweißt und der Draht sofort abgerissen.

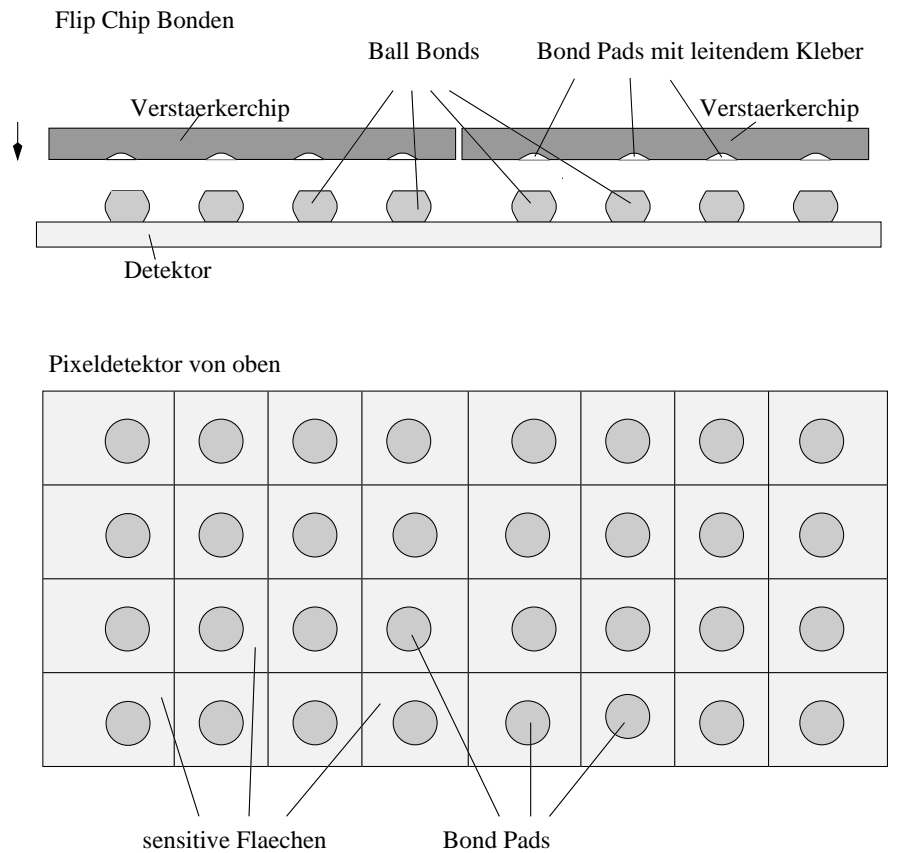


Abbildung 3.6: Prinzipdarstellung eines Pixeldetektors und des Flip Chip Bondens. Jede sensitive Fläche (Diodenstruktur) hat ihren eigenen Verstärker. Beim Flip Chip Bonden wird auf das Bond Pad jedes Pixels ein Ball Bond gesetzt. Die Verstärkerchips werden dann so auf den Pixeldetektor aufgesetzt, daß das Bond Pad des Verstärkers genau auf den Ball Bond trifft. Die sensitive Fläche an den Rändern des Detektors und den Chipgrenzen ist layout-bedingt etwas größer.

Detektor hat bei den äußeren Abmessungen von $53 \times 53\text{mm}$ 256 Kanäle. Dadurch ergibt sich ein Auslesepitch von $200\mu\text{m}$. Die Diodenstreifen weisen einen Pitch von $100\mu\text{m}$ auf, es existieren also Zwischenstreifen, die nicht ausgelesen werden. [19]

3.6 Die Detektortests

Für die Detektortests wurde eine Probestation aufgebaut, mit der man sowohl manuelle als auch automatisierte Tests durchführen kann. Eine detaillierte Beschreibung der Probestation und den Messungen an den Streifendetektoren befindet sich in [10].

Die Probestation ist mit einem Mikroskop, Probenadeln und x -, y - und z -

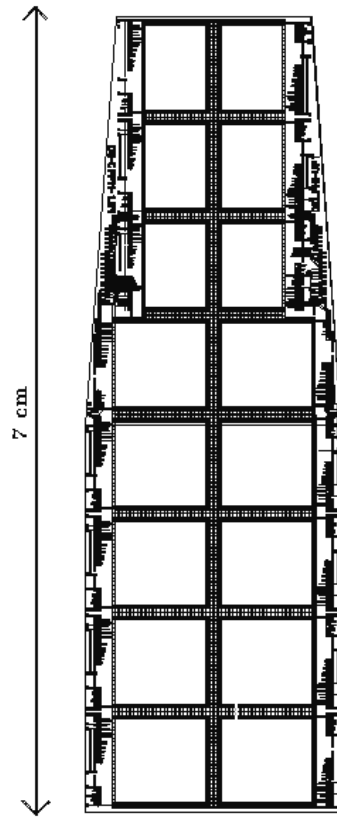


Abbildung 3.7: Der Pixeldetektor ist unterteilt in 16 Felder. Jedes Feld hat seinen Verstärkerchip und besteht aus 24×16 bzw. 24×24 Pixeln. Ein Detektor besitzt somit 8064 Pixel. Jedes Pixel hat seinen eigenen Verstärker und ist $330 \times 330 \mu\text{m}$ groß. Die Pixel an den Chipgrenzen sind etwas größer. [16]

Tischen mit Schrittmotorantrieb ausgestattet. Für die verschiedenen Messungen stehen mehrere Meßgeräte der Firma Keithley zur Verfügung: Ein Elektrometer, ein Vielfachinstrument mit eingebauter regelbarer Spannungsquelle und ein Kapazitätsmeßgerät mit einer festen Testfrequenz von 100kHz . Die Probestation befindet sich in einem lichtdichten Metallschrank. Zur automatischen Steuerung der Tische und zur automatischen Meßwerterfassung steht ein PC (Macintosh Performa 600) zur Verfügung.

Die angelieferten Detektoren durchlaufen verschiedene Akzeptanztests, bevor sie weiterverarbeitet werden.

Die I/V Messung. Bei den I/V-Messungen wird der Detektor in die Probestation gelegt und unter lichtdichter Meßdurchführung Kennlinien der Sperrströme der Dioden in Abhängigkeit der angelegten Back Plane-Spannung

(BP-Spannung) gemessen. In der Regel wird die BP-Spannung in Schritten von ein oder zwei Volt automatisch erhöht und eine Strommessung durchgeführt. Nach jeder neuen Einstellung muß zunächst abgewartet werden, bis sich der Detektor erneut im Gleichgewicht befindet.

Es werden zwei Messungen durchgeführt:

- **I/V–Strips.** Durch die Messung des Stromes, der durch die Biaswiderstände sämtlicher Streifen fließt, nimmt man die Summe aller Sperrströme der Diodenstreifen im Detektor auf. Da der Sperrstrom das Rauschen des Detektors erhöht, sollte dieser möglichst gering sein. Die Größe des Sperrstromes wird in der Regel von der Temperatur und den Störstellen des Kristallgitters bestimmt. Ferner erkennt man an der I/V–Kurve, ob die pn–Übergänge durchbrechen. Es gibt zwei verschiedene Durchbruchmechanismen: Der Zener–Effekt, bei dem Elektronen durch das elektrische Feld vom Valenzband ins Leitungsband angehoben werden und somit zum Strom beitragen kann. Beim Avallanche–Effekt werden Elektronen auf ihrer mittleren freien Weglänge so stark beschleunigt, daß es Stoßionisation durchführen und sich dadurch lawinenhaft vermehren kann.
- **I/V–Guard Ring.** Der Sperrstrom dieser Diode ist aufgrund der vielen Störstellen am Rande des Detektors, die durch die mechanische Bearbeitung stammen⁹, meist um einiges höher als der Sperrstrom der Streifendioden.

Die C/V Messung. Bei der C/V–Messung wird die Gesamtkapazität der pn–Übergänge in Abhängigkeit der angelegten Depletionsspannung gemessen. Da die Kapazität eines gesperrten pn–Überganges von der Ausdehnung der Raumladungszone abhängt, ist es möglich mit Hilfe von

$$\frac{C}{A} = \sqrt{\frac{e\epsilon_s}{2(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d})(\Phi_i - V_a)}} \quad (3.17)$$

festzustellen, bei welcher Spannung der Detektor vollständig depletiert ist. Wobei $\frac{C}{A}$ der Kapazität pro Fläche, e die Elementarladung, ϵ_s die relative Permetivität, N_a, N_d den Dotierungskonzentrationen und $(\Phi_i - V_a)$ ist das Potentialgefälle des Überganges entsprechen.

Bei der Auftragung von $1/C^2$ über V ist ein deutlicher Knick in der Kurve zur Waagrechten zu erkennen. Ist diese Spannung bestimmt, kann bei den bekannten Abmessungen des Detektors eine Aussage über die Dotierungskonzentrationen gemacht werden. Es handelt sich hierbei um eine sehr aussagekräftige Messung zur Überprüfung der Funktion von Halbleiterdetektoren.

⁹Die Detektoren werden aus einem runden Wafer mit vier Inch Durchmesser herausgesägt. Bei der Produktion befinden sich zwei Detektoren auf einem Wafer.

Die Messung der Streifenkapazitäten. Die vorangestellten Meßmethoden erlauben eine Beurteilung des gesamten Detektors, machen jedoch keine Aussage über die Funktionstüchtigkeit der einzelnen Streifen des Detektors. Durch die Messung der Kapazität jeder einzelnen Streifendiode zwischen Auslestreifen und Back Plane können viele verschiedene Streifendefekte erkannt werden. Aufgrund der vielen Messungen die dadurch benötigt wurden, wurde diese Messung automatisiert. Nach einer einfachen Ausrichtungprozedur ist sichergestellt, daß alle Meßpunkte sicher erreicht werden. Die Meßpunkte sind die Bond Pads der einzelnen Streifen an beiden Seiten. Bei einem Detektor mit 640 Auslestreifen werden also 1280 einzelne Messungen benötigt. Um möglichst viele Fehler zu erkennen, wird bei nicht-depletiertem Detektor mit Licht gemessen. Nach einer gesamten Messung eines Detektors erhält man eine Ausgabe (Abbildung 3.8), die den Verlauf der Kapazitäten über die Streifennummer zeigt. Alle Meßpunkte liegen auf einer Waagrechten, bis auf defekte Streifen oder Fehlmessungen.

Einführung der Variablen:

C_{s1} : Kapazität eines Streifens, gemessen auf Seite 1.

C_{s2} : Kapazität eines Streifens, gemessen auf Seite 2.

C_{mean} : Mittelwert einer Anzahl von Streifen in der Umgebung, die betrachtet wird, wobei dies der Mittelwert der gesamten Messung sein kann oder aber auch nur der Durchschnitt eines bestimmten Bereiches ist.

Mit Hilfe dieser drei Variablen können die Defekte einzelner Streifen klassifiziert werden.

Fehlmessungen liegen vor, wenn die Kapazität auf der einen Seite nahe Null ist (Offset der Meßanordnung) und die Kapazität auf der anderen Seite dem Durchschnittswert entspricht.

$$C_{si} \approx 0 \quad \text{und} \quad C_{sj} = C_{mean} \quad (3.18)$$

Gebrochene Streifen erkennt man daran, daß die Kapazitätsmessungen auf beide Seiten erniedrigt sind, die Summe allerdings dem Mittelwert entspricht.

$$C_{s1}, C_{s2} < C_{mean} \quad \text{aber} \quad C_{s1} + C_{s2} = C_{mean} \quad (3.19)$$

Über das Verhältnis der gemessenen Kapazitäten kann auf den geometrischen Ort der Unterbrechnung geschlossen werden.

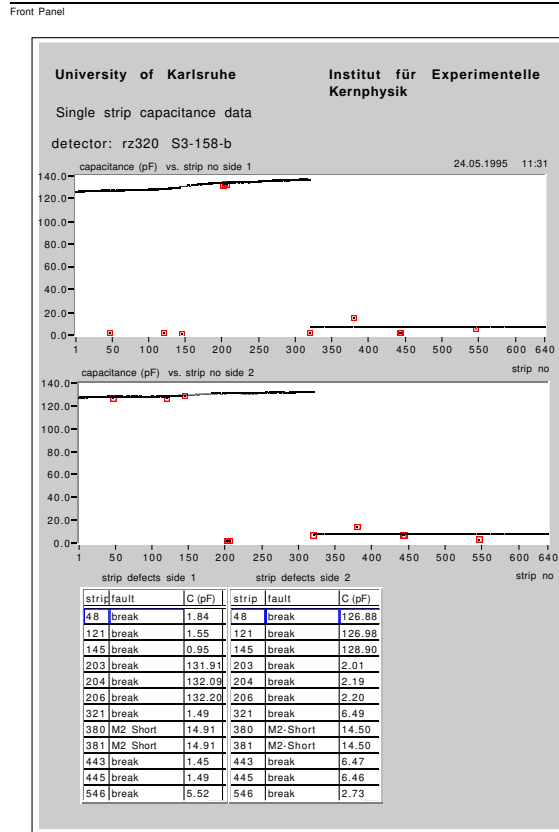


Abbildung 3.8: Die C_{strip} -Messung. Nach der Kapazitätsmessung jedes Streifens von beiden Seiten, wird ein Datenblatt erstellt und ausgewertet. Gemessen wurde in diesem Fall ein RZ-320, zu erkennen an den unterschiedlichen Kapazitäten der Auslestestreifen und der sensitiven Streifen. Gebrochene Streifen weisen eine geringere Kapazität auf, Pin Holes und Kurzschlüsse einen erhöhten Wert, relativ zu ihren Nachbarn. In zweifelhaften Fällen werden Nachmessungen zu Rate gezogen.

Kurzschlüsse machen sich dadurch bemerkbar, daß die Kapazitäten auf beiden Seiten um ein Vielfaches des Mittelwertes erhöht sind. Es müssen mehrere Streifen auf diesem erhöhtem Wert liegen.

$$C_{s1} = C_{s2} = (k + 1)C_{\text{mean}} \quad k: \text{Anzahl der Kurzschlüsse} \quad (3.20)$$

Sind die Streifen, die an einem Kurzschluß beteiligt sind, benachbart, so deutet dies auf einen M2-M2-Short hin, liegen diese allerdings weiter entfernt, so ist ein M1-M2-Short zu vermuten.

Pin Holes zeigen sich durch eine erhöhte Kapazität eines Streifens auf beiden Seiten, die allerdings in keiner Beziehung zum Mittelwert steht.

$$C_{s1} = C_{s2} \gg C_{mean} \quad \text{keine Beziehung zu } C_{mean} \quad (3.21)$$

Wenn keine eindeutige Klassifizierung des Fehlers möglich ist, sollte eine Nachmessung erfolgen. Pin Holes sind stark lichtabhängig. Mißt man die Kapazität bei anderen Lichtverhältnissen erneut, so sollte eine große Änderung der Kapazität zu sehen sein. Bei einer Strommessung zur Back Plane zeigt sich ebenfalls die starke Lichtabhängigkeit.

Shorts können nachträglich durch eine Widerstandsmessung der beteiligten Streifen bestätigt werden. Bei einer reinen Widerstandsmessung müßte man jeden Streifen gegen jeden messen, was eine viel größere Meßreihe bedeutet und die anderen Fehler unberücksichtigt bleiben.

Bei den RZ-320 Detektoren, bei denen nur die Hälfte aller Streifen durchkontaktiert sind, konnten die Kapazitäten weiter unterteilt werden. So liegen die Kapazitäten der Metallstreifen, die an die Verstärker angeschlossen werden (M2), zwischen 6 und 8pF. Ein kompletter Diodenstreifen trägt mit 55 bis 65 pF zur Messung bei. Diese Ergebnisse entsprechen einem nicht depletierten und bei Licht gemessenem Detektor.

Auffällig bei den Messungen war eine Differenz der Meßwerte von geraden und ungeraden Streifen. Die Unterschiede zwischen geraden und ungeraden Streifen sind eine Längendifferenz der Streifen der M2-Schicht im Bondbereich und die Positionen der Bond Pads. Die geraden Streifen sind etwas länger und deren Bond Pads liegen näher am Guard Ring als bei den ungeraden. Um diesem Unterschied eine eindeutige Zuordnung zu geben, wurden die Kapazitäten weiter aufgeschlüsselt.

Es wurde eine Abweichung zwischen geraden und ungeraden Streifen von 0.4pF gemessen. Das heißt, daß die Differenz pro Bondbereich 0.2pF betragen muß.

In einem Bondbereich ist die Fläche von 2 Bond Pads:

$$A_{Pad} = 10 \times 10^{-9} \text{m}^2 \quad (3.22)$$

Fläche gerader Streifen:

$$A_{gS} = 3.3 \times 10^{-9} \text{m}^2 \quad (3.23)$$

Fläche ungerader Streifen:

$$A_{uS} = 5.4 \times 10^{-9} \text{m}^2 \quad (3.24)$$

Daraus ergibt sich der Unterschied zwischen geraden und ungeraden Streifen:

$$dA = 2.1 \times 10^{-9} \text{m}^2 \quad (3.25)$$

Fläche im Detektorbereich:

$$A_{DetS} = 567 \times 10^{-9} \text{m}^2 \quad (3.26)$$

Da die Kapazitäten immer proportional zur Fläche sind, berechnet man die Kapazitäten pro Fläche. Sämtliche Effekte der Halbleiterstruktur, die man zur Berechnung der absoluten Kapazitäten benötigt, werden gekürzt. Aus den Unterschieden zwischen den geraden und den ungeraden Streifen ergibt sich:

$$\frac{dC}{dA} = \frac{0.2 \times 10^{-12} \text{ F}}{2.1 \times 10^{-9} \text{ m}^2} = 95.2 \times 10^{-6} \frac{\text{F}}{\text{m}^2} \quad (3.27)$$

Nun kann man die Kapazität für einen ungeraden Streifen im gesamten Bondbereich ausrechnen:

$$C_{B1} = \frac{dC}{dA} (A_{Pads} + A_{uS}) = 1.5 \times 10^{-12} \text{F} \quad (3.28)$$

Da sich auf den Detektoren 2 Bondbereiche befinden, gilt für eine Messung des ungeraden Streifens $C_B = 3\text{pF}$.

Daraus folgt für $\frac{C_{DetS}}{A_{DetS}}$:

$$\frac{C_{DetS}}{A_{DetS}} = \frac{C_{Messung} - C_B}{A_{DetS}} = 8.8 \times 10^{-6} \frac{\text{F}}{\text{m}^2} \quad (3.29)$$

Das bedeutet, daß $\frac{C}{A}$ im Bondbereich um Faktor 10 höher als im Detektorbereich ist und läßt sich mit Hilfe des Plattenkondensator erklären¹⁰. Für den Plattenkondensator gilt:

$$\frac{C}{A} = \frac{\epsilon}{s} \quad (3.30)$$

Mit ϵ , der Dielektrizitätskonstante und s dem Abstand der Platten

Im Bondbereich dient als Isolator SiO_2 mit einem ϵ von 4.2, die Dicke dieses Dielektrikums beträgt $s = 1\mu\text{m}$. Im Detektorbereich dient als Dielektrikum Polyimid mit $\epsilon = 2$ und hat eine Dicke von $s = 5\mu\text{m}$. Zusammen ergibt dies genau den Faktor 10, der beweist, daß diese Kapazitätsunterschiede auf die geringen Längendifferenz zurückzuführen sind.

Die geringfügigen Abweichungen in der Rechnung liegen in der Bestimmung der Flächenmaße und der Dicke des Dielektrikums die nur aus Zeichnungen bekannt ist.

¹⁰ Alle halbleiterspezifischen Größen sind gekürzt.

3.7 Die Auslese der Halbleiterdetektoren

Die Signale der Halbleiterdetektoren sind so schwach, daß diese so nahe wie möglich an den Detektoren verstärkt werden müssen. Deshalb befinden sich jeweils an den Enden der Module mit Verstärkerchips bestückte Hybridschaltungen. Da die Verstärkerhybride der verschiedenen Streifendetektoren im wesentlichen dieselbe Funktionsweise haben, wird nur der in Karlsruhe verwendete Typ des Outer Layers näher beschrieben.

Das Hybrid ist eine mehrschichtige, doppelseitige Platine auf einem Keramiksubstrat mit einem Anschluß für ein 30poliges Flachbandkabel aus Kapton. Kernstück eines Hybrides sind die darauf befindlichen Verstärkerchips. Je fünf von ihnen liegen auf der Oberseite und auf der Unterseite. Zur Verwendung kam der sogenannte **Triplexchip**. Jeder Chip hat 128 analoge Verstärkerkanäle, die als ladungsempfindliche Differenzverstärker konzipiert sind und seriell ausgelesen werden. Durch die analoge Auslese ist eine Auswertung der Pulshöheninformation möglich. Die Koordinaten des Ladungsschwerpunktes bei einem Teilchendurchgang kann somit interpoliert werden, wobei eine Ortsauflösung innerhalb des Vertexdetektors von etwa $6 - 8\mu\text{m}$ erzielt wird. Ferner ist auf dem Hybrid eine Referenzkugelhalterung angebracht, bei der eine eingeschraubte Referenzkugel die Lage eines Halbmoduls innerhalb des Koordinatensystems des gesamten DELPHI Detektors definiert.

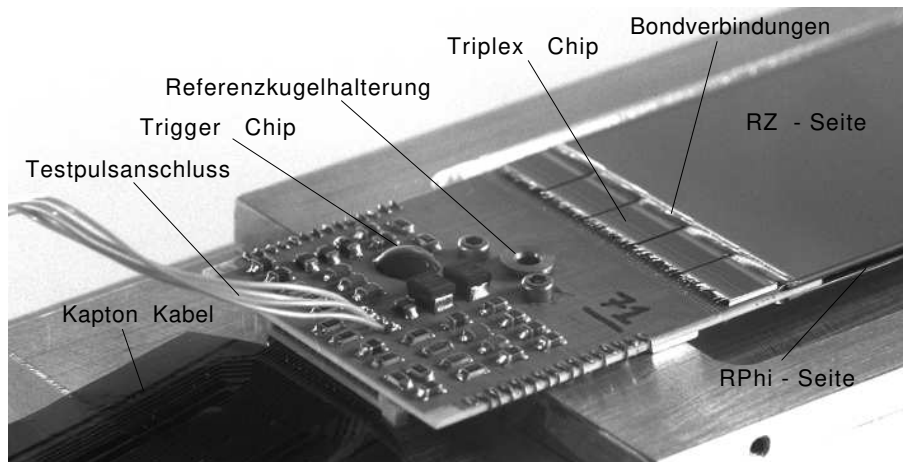


Abbildung 3.9: Aufbau des Hybrids. Der Triggerchip wird in diesem Projekt nicht benötigt und fehlt deshalb bei einigen Hybriden. Das Kaptonkabel wird an die Repeaterkarte angeschlossen. Sie versorgt den gesamten Hybrid mit den notwendigen Versorgungsspannungen, Taktimpulsen und überträgt die analogen Ausgangssignale. Mit dem Testpulsanschluß können Testpulse bekannter Größe an die Eingänge der Verstärker gelegt werden.

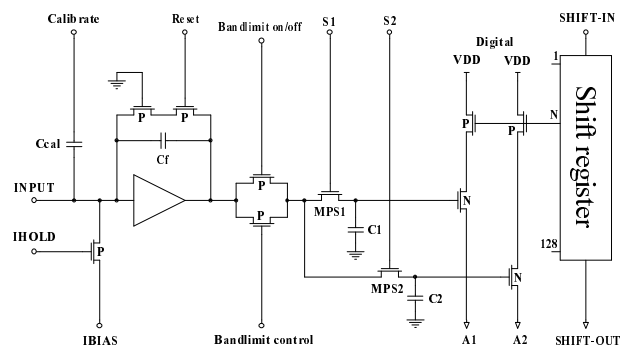


Abbildung 3.10: Die Schaltskizze des Triplexchips. Reset steuert den Zeitpunkt der Datennahme. Nach einem Reset werden die beiden Kondensatoren $C1$ und $C2$ von dem Differenzverstärker geladen. Nach der Samplingzeit wird der Schalter $S2$ geschlossen, so daß nur noch $C1$ geladen wird. Nach Schließen von Schalter $S1$, halten $C1$ und $C2$ die verstärkten Streifensignale bis zum Start der seriellen Auslese. Das Shift register verbindet die beiden Kondensatoren aller Verstärkerkanäle nacheinander mit den Analogleitungen, die die Signale an die Repeater Karte überträgt. Die Kondensatoren werden gelöscht, der Verstärker ist zu einer erneuten Datennahme bereit. Über Calibrate können Testpulse bekannter Größe an die Eingänge der Verstärker eingekoppelt werden, wodurch eine Kalibrierung der Verstärkung möglich ist.

Kapitel 4

Der Vertexdetektor

Rund um die Strahlachse befindet sich der Vertexdetektor, der durch seine Nähe zum Wechselwirkungspunkt und durch seine gute Ortsauflösung eine genaue Rekonstruktion von Vertices erlaubt. Eine Zeichnung des neuen Vertexdetektors ist in Abbildung 4.1 zu sehen. Durch die Erhöhung der Energie des LEP Beschleunigers

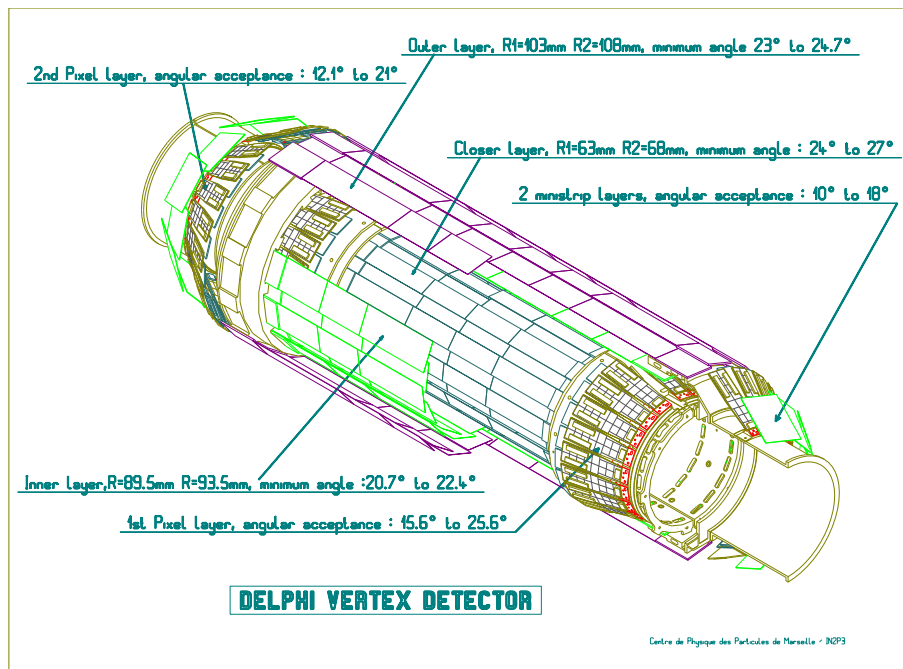


Abbildung 4.1: Schnittzeichnung des neuen Vertexdetektors. Drei Lagen Siliziumstreifendetektoren bilden das Barrel. Für die Erfassung kleiner Polarwinkel sind, sowohl im Bereich des Closer Layers als auch im Bereich des Outer Layers, Pixeldetektoren und Ministripdetektoren montiert. Diese bilden den Very Forward Tracker.

nigers wird die Wahrscheinlichkeit, Spuren mit kleinem Polarwinkel zu erhalten,

größer. Der längere Vertexdetektor wird benötigt, um auch unter diesen Bedingungen die kleineren Winkel zu erfassen und die nötige Efficiency zu erhalten. Den Vertexdetektor unterteilt man in zwei Teile. Drei ineinanderliegende, konzentrisch um das Strahlrohr angeordnete Lagen Mikrostreifendetektoren bilden das **Barrel**. An den beiden Enden befinden sich Endkappen, bestückt mit zwei Lagen Ministreifen- und Macropixeldetektoren. Diesen Teil nennt man **VFT**¹. Der neue vergrößerte Vertexdetektor hat nun eine Detektorfläche aus Silizium von 1.4m^2 , gegenüber der Detektorfläche von 0.42m^2 des vorherigen Detektors. Er gehört somit zu den Größten seiner Art.

4.1 Der Aufbau des Vertexdetektors

Das **Barrel** ist aus drei Lagen Mikrostreifendetektoren aufgebaut. Diese sind zylinderförmig auf Aluminiumringe rund um die Strahlachse montiert. Die drei Lagen werden von außen nach innen als **Outer Layer**, **Inner Layer** und **Closer Layer** bezeichnet. Auf jedem Layer sind Ganzmodule aus Mikrostreifendetektoren installiert. In Abbildung 4.2 ist der Aufbau eines Ganzmoduls gezeigt, in Abbildung 4.3 ist ein Foto eines Halbmoduls zu sehen.

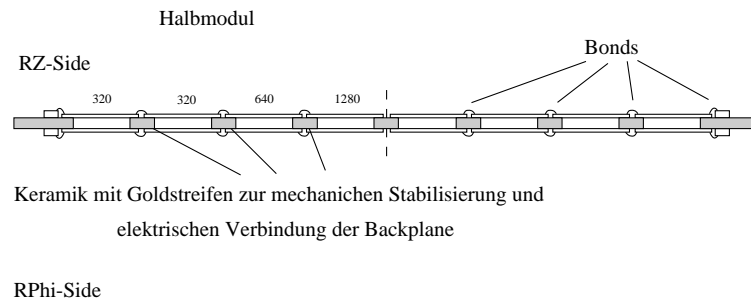


Abbildung 4.2: Die Seitenansicht eines Ganzmoduls. Die elektrischen Verbindungen sind in Drahtbondtechnik ausgeführt. Zwischen den Detektoren befinden sich Keramikscheibchen mit Goldstreifen zur mechanischen Stabilisierung und elektrischen Verbindung der Back Plane.

Die Ganzmodule werden in jeder Lage abwechselnd auf einen etwas größeren und einen etwas kleineren Radius montiert, womit jedes Ganzmodul ein wenig mit seinen beiden Nachbarn überlappt. Abbildung 4.4 zeigt diesen Aufbau. Zur Erhöhung der Steifigkeit des Barrels sind die Montageringe mit einem Kohlefaserzylinder fest verschraubt (siehe Abbildung 4.5).

- **Outer Layer.** Der Outer Layer ist die äußerste Lage der Streifendetektoren. Dieser hat die Radien 103 und 108 mm und deckt den Polarwinkel bis

¹**VFT:** Very Forward Tracker.

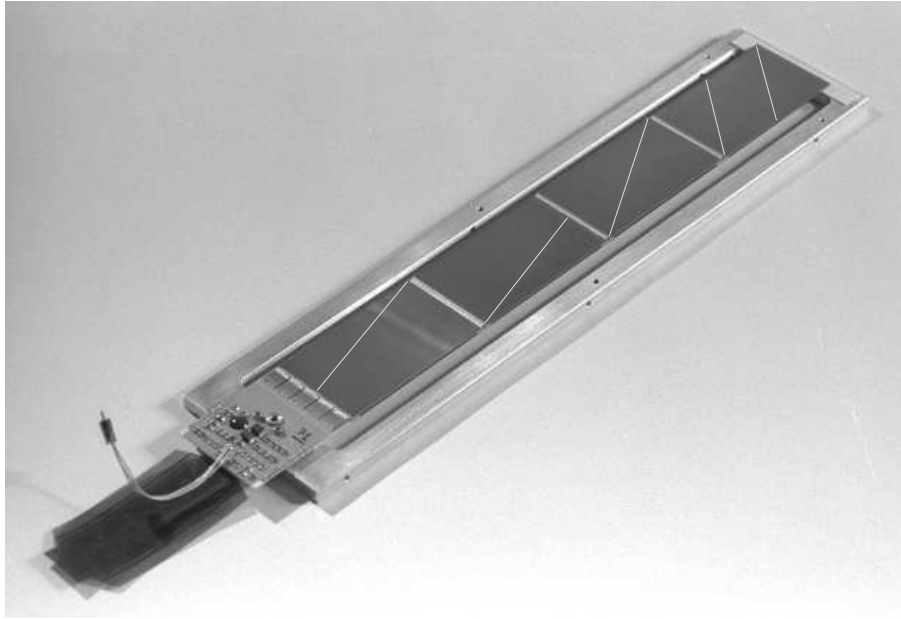


Abbildung 4.3: Die RZ-Seite eines Halbmoduls. Links das Hybrid mit der Kapton Verbindung, mit angeschlossenen RZ-320-1, RZ-320-2, RZ-640 und RZ-1280 Detektoren (Die sichtbaren Durchkontaktierungen wurden nachträglich hervorgehoben). Zwischen den Detektoren bzw. dem ersten Detektor und den Verstärkerchips sind die Drahtbondverbindungen zu sehen. Zwei solcher Halbmodule werden zu einem Ganzmodul zusammengeklebt.

23° beziehungsweise 24.7° ab. Er besteht aus 24 Ganzmodulen, die mit jeweils acht RZ- und acht $R\Phi$ -Detektoren bestückt sind, und hat eine Länge von 480 mm.

- **Inner Layer.** Unter Inner Layer versteht man die mittlere Lage der Streifendetektoren. Die Radien betragen hier 89.5 und 93.5 mm, wobei ein Winkel bis 20.7° bzw. 22.4° abdeckt wird. Dieser besteht aus 20 Ganzmodulen, die aus ebenfalls jeweils acht doppelseitigen Detektoren zusammengebaut sind. Er ist mit 480 mm genauso lang wie der Outer Layer und wird auf demselben Montagering installiert.
- **Closer Layer.** Der Closer Layer befindet sich mit den Radien 63 und 68 mm der Strahlachse am nächsten. Er deckt den Polarwinkel bis 24° beziehungsweise 27° ab. Die 20 Ganzmodule, aus denen er aufgebaut ist, bestehen aus jeweils sechs doppelseitigen Detektoren. Mit einer Länge von 360mm ist er ein wenig kürzer als die beiden anderen Lagen.

Als **VFT** werden die Endkappen (**Crowns**) an das Barrel im Bereich des Closer Layer als auch im Bereich des Outer Layers bezeichnet, die der Erfassung kleiner Polarwinkel dienen.

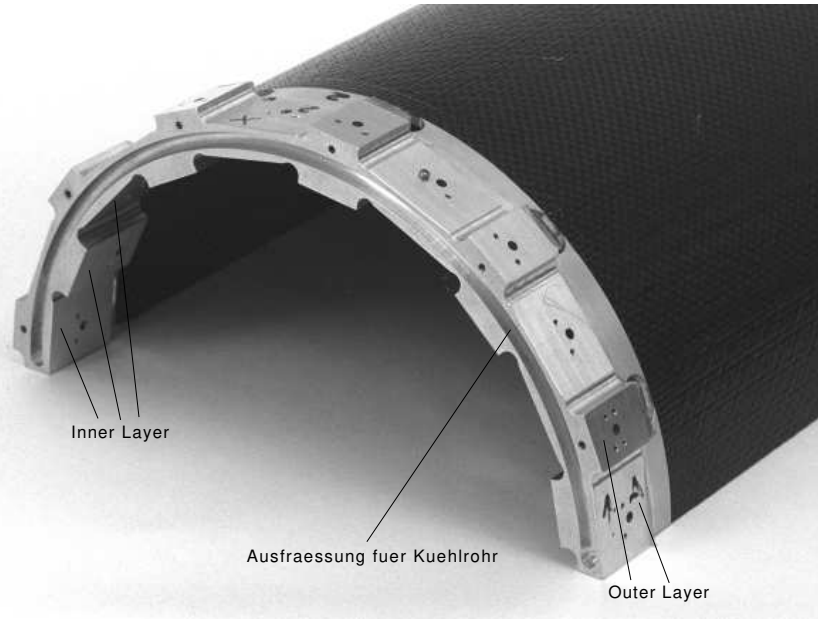


Abbildung 4.4: Der Montagering des Outer und den Inner Layers. Deutlich sind die Versetzungen der Radien zu erkennen, wodurch eine Überlappung zwischen den Detektormodulen entsteht. In die Nut wird ein Kühlrohr installiert, das zur Kühlung der Verstärkerchips dient. Im Hintergrund ist ein Teil des Kohlefaserzylinders zu sehen.

Im Bereich des Closer Layers ist der 1st Pixel Layer montiert. Er deckt den Polarwinkel bis 15.6° bzw. 22.4° ab. Die Macropixeldetektoren mit einer Pixelgröße von $330 \times 330 \mu\text{m}$ sind zweilagig installiert.

Die gleichen Macropixel sind ebenfalls zweilagig als 2nd Pixel Layer an den Crowns im Bereich des Outer Layer angebracht. Diese decken den Winkel bis 12.1° bzw. 21° ab. Es sind auch die Ministripdetektoren, die einen Winkelbereich bis 10° bzw. 18° abdecken, montiert.

4.2 Die Ganzmodule des Outer Layers

Die Ganzmodule sind aus zwei Halbmodulen aufgebaut. Ein Ganzmodul besitzt zwei Hybride, die sich an den Enden des Ganzmoduls befinden. Auf der Oberseite sind die acht RZ-Detektoren montiert, die Unterseite besteht aus acht $R\Phi$ -Detektoren. Zwischen den RZ- und den $R\Phi$ -Detektoren sind kleine Keramikscheibchen mit Goldauflage geklebt. Diese dienen der Verbindung der Detektoren, der mechanischen Stabilisierung und der elektrischen Verbindung der Back Plane-Spannung. Alle anderen elektrischen Verbindungen auf dem Ganzmodul sind in Drahtbondtechnik ausgeführt.

Der Interaktionspunkt im Strahlrohr liegt in der Mitte des Vertexdetektors.



Abbildung 4.5: *Der Kohlefaserzylinder, der mit den Ringen fest verschraubt ist, dient der Erhöhung der Steifigkeit des Barrels.*

Somit durchdringen Teilchen die einzelnen Lagen des Detektor an den Rändern mit einem kleinen, in der Mitte mit einem großem Polarwinkel. Dadurch wird in den Detektoren am Rand eine längere Ionisationsspur erzeugt. Die Ortsauflösung kann in diesem Bereich mit einem kleinen Auslesepitch nicht wesentlich erhöht werden. Deshalb sind an den Rändern RZ-320 Detektoren mit einem größeren, und in der Mitte RZ-1280 Detektoren mit einem kleineren Auslesepitch montiert. Ferner sind an jeden Verstärkerkanal vier Diodenstreifen angeschlossen. Die dadurch resultierende Mehrdeutigkeit auf der RZ-Seite, kann nur beseitigt werden, wenn die Spurrekonstruktion von außen nach innen erfolgt.

4.3 Die Montage der Ganzmodule auf Ringe

Die Ganzmodule werden mit dem Kühlkörper auf die ausgerichteten Ringe aufgeschraubt. Im Anschluß werden beide Halbschalen komplett ausgerichtet, vermessen und rund um das Strahlrohr eingesetzt.

Die einzelnen Lagen der Detektoren werden auf Aluminiumringe montiert die aus möglichst wenig Material bestehen sollten, da innerhalb des Aluminiums unerwünschte und spurverfälschende Coulomb Streuung auftreten kann. Andererseits muß der Vertexdetektor eine hohe Steifigkeit besitzen, da nur dadurch die nötige Präzision bei der Rekonstruktion der Spuren erreicht werden kann. Man muß deshalb immer einen Kompromiß zwischen Steifigkeit zum einen und möglichst wenig Material zum anderen eingehen. Aus diesem Grund greift man auf ein Aluminium mit Siliziumanteilen zurück. Dieses Material läßt sich gut mechanisch bearbeiten (spanende Verarbeitung wie drehen, fräsen, bohren), bei geschickter Konstruktion besitzt es die notwendige Steifigkeit und steht im Periodensystem an dreizehnter Stelle, so daß sich die Wahrscheinlichkeit für Coulomb Streuung in Grenzen hält.

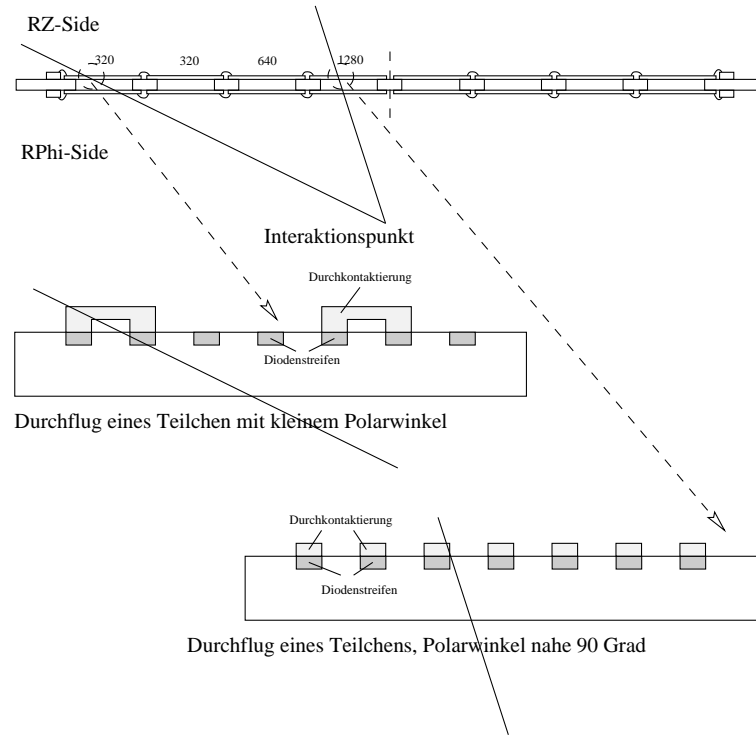


Abbildung 4.6: *Der Auslesepitch auf der RZ-Seite ist in der Nähe des Interaktionspunkts kleiner als in der Nähe des Hybrids.*

Für die Coulomb Streuung gilt:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{Z^2 e^4}{64\pi^2 \epsilon_0^2 E^2} \sin^{-4} \frac{\varphi}{2} \quad (4.1)$$

Mit Z der Ordnungszahl im Periodensystem, e der Elementarladung, ϵ der Dielektrizitätskonstante, E der kinetischen Energie und φ dem Streuwinkel.

Die Ordnungszahl geht quadratisch in die Formel ein, weshalb man Aluminium, Stahl oder anderen Metallen vorzieht. Aluminium bietet des Weiteren durch seine ausgezeichnete Wärmeleitfähigkeit einen sehr wichtigen Vorteil gegenüber Kevlar- oder Graphit-Harz-Konstruktionen. In den Ringen ist ein Kühlkanal eingefräst. In diesen wird ein Kühlrohr eingelegt und an das vorhandene Kühlsystem des DELPHI Detektors angeschlossen. Für eine gute Wärmeübertragung zwischen Kühlrohr und Kühlkanal des Ringes sorgt eine Wärmeleitpaste, womit die Kühlung der Verstärkerchips über die an den Ringen aufgeschraubten Kühlkörpern sichergestellt ist. Um eine Wärmebewegung der Trägerstruktur zu vermeiden, muß während des Experimentes im gesamten Vertexdetektor eine zeitlich konstante Temperaturverteilung herrschen.

Eine Durchbiegung der Ganzmodule führt zu einer Änderung des Radius R . Da der Radius nur aufgrund des mechanischen Aufbaus gegeben ist, ist dieser mit

dem größten Fehler behaftet und während des Experimentes am schwierigsten zu korrigieren. Deshalb werden die Ganzmodule mit einem Kevlar Profil verstärkt, auf dessen Oberseite wiederum eine Kohlefaserschicht aufgeklebt ist.

4.4 Die Ausrichtung des Vertexdetektors

Beim Verkleben der einzelnen Detektoren zu einem Halbmodul, werden die Positionen der Detektoren in Bezug auf eine Referenzkugel auf dem Hybrid vermessen. Nach der Montage der Ganzmodule werden dann die Positionen aller Referenzkugeln auf den Ringen bestimmt. Das Ergebnis dieser Messungen ist eine dreidimensionale Beschreibung der einzelnen Diodenstreifen in einem lokalen Koordinatensystem des Vertexdetektors.

Es wurde bis hierhin mit größtmöglicher Präzision gearbeitet und gemessen. Diese Daten werden als Rohdaten in die Spurrekonstruktions-Software eingegeben. Nach Beginn des Experimentes wird mit der letztendlichen Ausrichtung begonnen. Es werden Myon-Spuren gesucht, die Treffer im Outer Detektor als auch im Vertexdetektor haben, und diese rekonstruiert. Durch die Treffer im OD definiert man die räumliche Lage des Vertexdetektor im DELPHI Koordinatensystem. Aufgrund ihrer großen Masse werden diese Spuren im Magnetfeld nur sehr wenig gekrümmt. Diese Krümmung wird mit Hilfe der Strahlenergie und den Winkeln der Spuren berechnet. So sind die einzelnen Lagen des Vertexdetektors bekannt. Da die einzelnen Lagen des Vertexdetektors mit einer gewissen Überlappung montiert sind, kann man Spuren, die in diesem Bereich fallen, dazu nutzen, die einzelnen Lagen des Vertexdetektors exakt einander zuzuordnen. Abbildung 4.7 zeigt ein solches Ereignis. In einem zweiten Schritt werden Spuren von Multi-Hadronischen-Ereignissen verwendet. Diese Spuren werden ebenfalls rekonstruiert und bei Abweichungen die Daten in die Spurrekonstruktions-Software eingegeben, womit die Ausrichtung des gesamte Vertexdetektors verbessert wird.

4.5 Die Herstellung der mechanischen Träger-elemente

In der institutseigenen Werkstatt wurden verschieden Bauteile des Trägersystems gefertigt. Wie bereits beschrieben, müssen diese Bauteile besonderen Anforderungen entsprechen. Zum einen wird eine sehr hohe mechanische Präzision, zum anderen eine außerordentlich große Oberflächengüte gefordert. Der Werkstatt standen CNC-gesteuerte Fräsmaschinen, Drehmaschinen und Bohrmaschinen zur Verfügung. Um den hohen Anforderungen gerecht zu werden, wurden verschiedene Probefertigungen durchgeführt und Prototypen hergestellt. Beispielsweise wurden beim Fräsen verschiedene Fräser ausprobiert, um ein optimales Ergebnis

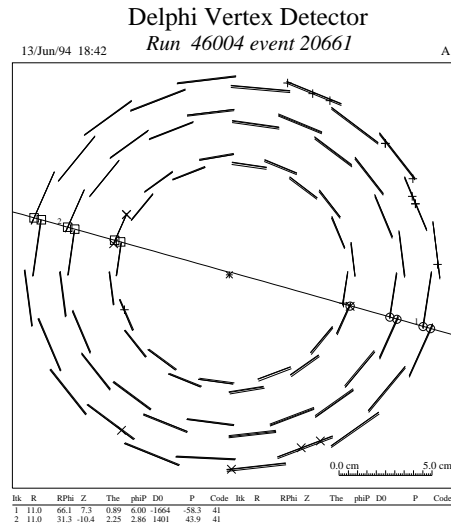


Abbildung 4.7: Ein Ereignis mit Treffern in den Überlappungsregionen, die zur Ausrichtung des Vertexdetektors herangezogen werden können.

zu erzielen. Durch eine hohe Umlaufgeschwindigkeit des Fräasers erreicht man in der Regel gute Oberflächen, allerdings besteht die Gefahr des Schwingens des Fräasers. Nach mehreren Versuchen mit verschiedenen Fräser-Materialien und Formgebungen erzielte man mit einem Hartmetallfräser aus einer Titan-Tantal-Carbit-Sinterung² die besten Ergebnisse. Die Vorteile eines solchen Hartmetall Fräasers sind, neben der zehnmal längeren Standzeit gegenüber einem HSS Fräser, sein außerordentlich gutes Schwingungsverhalten. Durch das dichte Gefüge der einzelnen Sinterkugeln bilden sich keine großvolumigen Kristallstrukturen aus, der Fräser schwingt nicht. Mit der endgültigen Entscheidung für dieses Material begann die Maschinenoptimierung. Die wichtigsten Optimierungen sind dabei die Drehzahl der Spindel und im engen Zusammenhang hierzu der Vorschub der Spindel. Auch die Schmierung wurde während der Bearbeitung optimiert.

Die Montageringe für den Outer bzw. den Inner Layer wurden aus einem Stück Vollmaterial gefräst, wodurch Formveränderungen beim Zersägen in Halbringe vermieden und keine besonderen Spannvorrichtungen benötigt wurden. Bei der Produktion der Adapterringe konnte dieses Produktionsverfahren aufgrund der vielen Hinterdrehungen und Hinterfräsungen nicht angewendet werden. Diese Ringe wurden zunächst gedreht und dann die Fräsarbeiten daran ausgeführt. Sowohl beim Drehen als auch beim Fräsen mußten spezielle Spannvorrichtungen gefertigt werden, da aufgrund der geringen Materialdicke dieser Bauteile (1-2 mm) keine normalen Spannvorrichtungen benutzen werden konnten. Mit handelsüblichen Spannvorrichtungen wurden die Bauteile beim Spannen beschädigt, oder

²Sintern ist ein Verfahren, bei dem die Werkstoffe zuerst zu feinsten Kügelchen gemahlen und die Bestandteile dann gemischt werden. Dieses Pulver wird mit extrem hohen Druck und einer Temperatur unterhalb der Schmelzpunkte in Form gepreßt und anschließend die Schneiden geschliffen.

sie konnten nicht fest genug eingespannt werden. Als Spannvorrichtungen beim Drehen wurden Scheiben mit exaktem Durchmesser, die genau in das Bauteil eingelegt wurden, benutzt. Beim Fräsen bediente man sich einer Aluminiumplatte mit negativem Zentrierbund und zusätzlich diverser eigens für diesen Zweck hergestellter Spannhilfen.

Um auch hier Verformungen durch interne Spannungen beim Zersägen eines ganzen Ringes in zwei Halbringe zu vermeiden, mußte beim Bearbeiten auf besondere Sorgfalt und eine materialschonende Vorgehensweise geachtet werden. Erst ein mehrmaliges, sorgfältiges Vordrehen, gefolgt von einem einmaligen Fertigdrehen, brachte den gewünschten Erfolg. Für die vielen und großen Hinterdrehungen mußten spezielle Drehmeißel (Inneneinstechdrehmeißel oder Hackenstahl) hergestellt werden. Das größte Problem bei diesen Hinterdrehungen war zusätzlich, daß ein Nachmessen während der Produktion nicht möglich war. Es konnte nur nach der Maschinenenskala gearbeitet werden.

Herauszustellen waren auch die unzähligen Gewinde M1.6, mit denen die Ganzmodule auf die Ringe geschraubt werden und Messinghülsen zum Justieren der Adapterringe mit Außengewinde M4 mal 0.4 und M1 Innengewinde.

Bei wissenschaftlichen Projekten entwickelt sich der mechanische Aufbau meist während des Projektes, da immer wieder unvorhersehbare Probleme auftreten und gelöst werden müssen. Dies hat zur Folge, daß wiederholt Änderungen in die Pläne und Zeichnungen eingebracht werden. Trotz dieser Schwierigkeiten stellte die Werkstatt hervorragende Teile von außerordentlicher Qualität her.

Kapitel 5

Das Kleben der Halbmodule

Die getesteten Detektoren und das getestete Hybrid müssen zu einem Ganzmodul zusammengeklebt werden. Zuerst klebt man aus Detektoren und einem Hybrid ein Halbmodul, das danach gebondet und getestet wird. Aus zwei Halbmodulen ist anschließend ein Ganzmodul herzustellen. Da durch das Kleben der Halbmodule die räumliche Lage der Streifen der einzelnen Detektoren im fertigen Vertexdetektor festgelegt wird, ist größte Präzision gefordert. Ziel ist es, die einzelnen Streifendetektoren mit einer Präzision von weniger als $\pm 20\mu\text{m}$ auszurichten und zu verkleben. Die Strukturen auf den Detektoren sind mit bloßem Auge nicht zu erkennen, weshalb das Kleben der Halbmodule unter Zuhilfenahme einer dreidimensionalen Koordinatenmeßmaschine, ZEISS-Maschine genannt, mit einem Video-Mikroskop, in dem ein Fadenkreuzgenerator integriert ist, erfolgt. Das Fadenkreuz dient jeweils zum Anvisieren der Meßpunkte. Alle Meßpunkte beziehungsweise Koordinaten beziehen sich immer auf den Mittelpunkt des Fadenkreuzes.

5.1 Die ZEISS-Maschine

Die ZEISS-Maschine ist eine dreidimensionale Koordinatenmeßmaschine. Auf einer schwingungsarm gelagerten Granitplatte, auf der auch die Werkstücke aufgespannt werden, befindet sich der Aufbau der drei Achsen. Als Trägermaterial der Achsen ist ebenfalls Granit zur Anwendung gekommen. So ergibt sich ein Gewicht von ungefähr 1.5 Tonnen für die Meßmaschine. Neben dem eigentlichen Meßtisch steht der Steuerschrank, in dem sich die Steuerung der Motoren befindet, er ist mittels einer IEEE488 Schnittstelle (GPIB) mit einer HP ¹ Workstation verbunden. Dieser Rechner dient der Ausgabe der Meßergebnisse und zur Berechnung geometrischer Elemente sowie zur Korrektur bekannter Fehler der Meßmaschine. Die ZEISS-Maschine ist in Abbildung 5.1 zu sehen, einige technischen Daten werden in Tabelle 5.1 zusammengefaßt.

¹HP: Hewlett und Packard

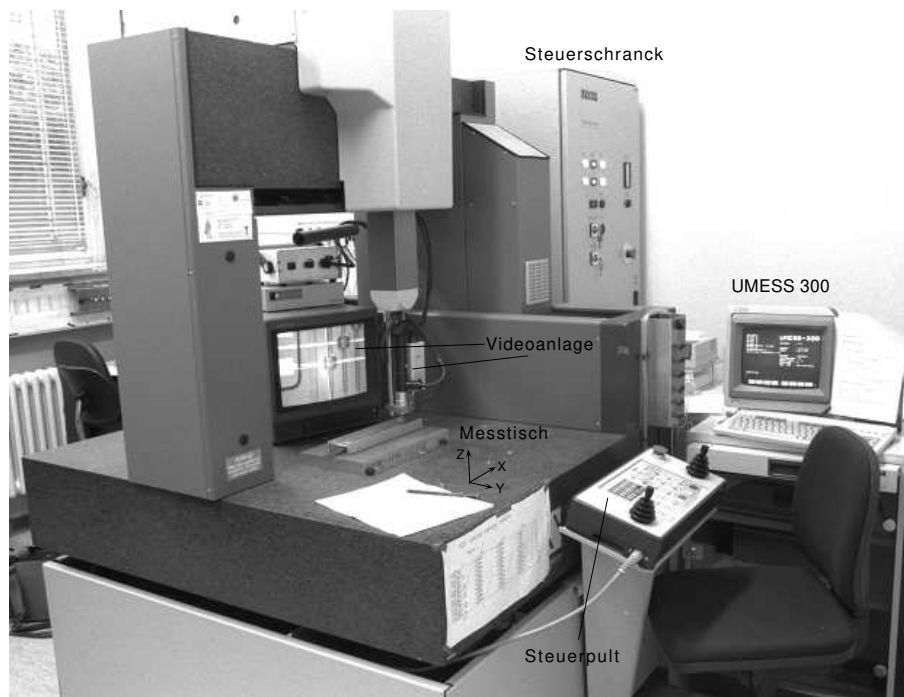


Abbildung 5.1: Der Aufbau der ZEISS-Maschine beim optischen Messen. Die gesamte Anlage mit dem Granitmeßtisch und den Achsen ist schwingungsarm auf Stoßdämpfern gelagert und wiegt etwa 1.5 Tonnen. Die Luftpolsterlager aller drei Achsen ermöglichen ein mikrometergenaues, reibungsfreies Positionieren und Messen. Die wichtigsten Steuerungselemente findet man auf dem Steuerpult. Zur Berechnung und Ausgabe des Ergebnisses ist ein Rechner angeschlossen.

Zur Verminderung mechanischer Reibung sind die Achsen mit einer Luftpolsterlagerung ausgestattet. Zum Vortrieb jeder Achse dient ein Gleichstrommotor, der die Achse über eine Übersetzung bewegt. Die Gleichstrommotoren werden vom Steuerschrank, in dem sich ebenfalls die Elektronik zum Berechnen der jeweiligen Position des Meßkopfes befindet, gesteuert. Alle Achsen sind mit Glasmaßstäben versehen, auf denen feine Linien aufgebracht sind. Diese Glasmaßstäbe werden von jeweils zwei Fototransistoren, die von LEDs beleuchtet werden, abgegriffen. Durch die feinen Linien auf den Glasmaßstäben variiert beim Fahren die Intensität des Lichtes auf den Fototransistoren. Dieses Signal wird verstärkt und anschließend ausgewertet; die Maschine zählt während der Fahrt die Linien, die sie überfahren hat. Aus dem bekannten Abstand der Linien wird dann die genaue Position des Meßkopfes errechnet. Die Rückkoppelschleife in der Elektronik verhindert ein unbeabsichtigtes Bewegen der Achsen. Bei mechanischen Messungen wird ein Tastkopf zur Messung herangezogen, an dem ein Taster mit einer Kugel aus rotem Rubin (siehe Abbildung 5.2) sitzt. Mit dieser Kugel wird an das Werkstück herangefahren und angetastet. Durch die Berührung wird sowohl

Die Koordinatenmeßmaschine MC 550		
Genauigkeit mech. Messung		$\pm 1\mu\text{m}$
Genauigkeit opt. Messung	x	$\pm 2\mu\text{m}$
	y	$\pm 2\mu\text{m}$
	z	$\pm 6\mu\text{m}$
Antastkraft		$< 0.01\text{N}$
max. Verfahrweg	x, y, z	500mm
max. Verfahrgeschwindigkeit	man.	$1 - 70 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$
	CNC	$1 - 120 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$
Temperaturbereich		$20 \pm 3^\circ\text{C}$
max. Temperaturänderung		$1 \frac{\text{K}}{\text{h}}$
Luftfeuchte		40% – 60%
Fundamentbeschleunigung	0-50Hz	$< 10 \frac{\text{mm}}{\text{s}^2}$
max. Schalldruck	50-2000Hz	$< 75\text{dB(A)}$
Gewicht		$\approx 1500\text{kg}$
Gesamtabmessungen		$1.2 \times 1.3 \times 2.7\text{m}$

Tabelle 5.1: *Einige technische Daten der ZEISS-Maschine MC 550.*

ein Piezoimpuls ausgelöst als auch ein mechanischer Mikroschalter betätigt. Eine Elektronik stoppt sofort den weiteren Vortrieb des Meßkopfes, wertet beide Signale aus und entscheidet, ob es sich um eine gute Antastung oder ob es sich um eine Kollision handelt. Bei einer guten Antastung werden die Koordinaten an den Rechner übertragen, der wiederum die weiteren Informationen in dem selbst definierten Koordinatensystem errechnet und diese auf dem Bildschirm und dem Drucker ausgibt. [22]

Beim optischem Meßverfahren wird der Tastkopf durch ein Video-Mikroskop ersetzt. Das Mikroskop zeichnet sich durch einen sehr großen Arbeitsabstand und große Vergrößerung bei sehr guter Bildqualität aus. Dem Bild des Mikroskopes wird ein Fadenkreuz überlagert. Der Schnittpunkt des Fadenkreuzes gilt als Bezugspunkt bei den Messungen (Abbildung 5.3). Für die Messung der z -Koordinate wird der kleine Schärfentiefenbereich bei größter Vergrößerung des Mikroskops ausgenutzt. Durch sorgfältiges Scharfstellen des Bildes auf dem Monitor ist eine Genauigkeit von $\pm 6\mu\text{m}$ zu erreichen. Die Koordinaten der Meßpunkte werden nach dem Betätigen eines manuellen Tasters auf dem Steuerpult an den Rechner übermittelt, der die weitere Datenverarbeitung übernimmt.

Der Rechner ist somit das zentrale Gerät zur Kommunikation zwischen der Meßmaschine und dem Anwender. Das Programm UMESS 300 ermöglicht Berechnungen geometrischer Elemente wie Kreise, Flächen, Kugeln, Zylinder, usw., in einem zuvor definiertem Koordinatensystem. Auch verschiedene Betriebspa-

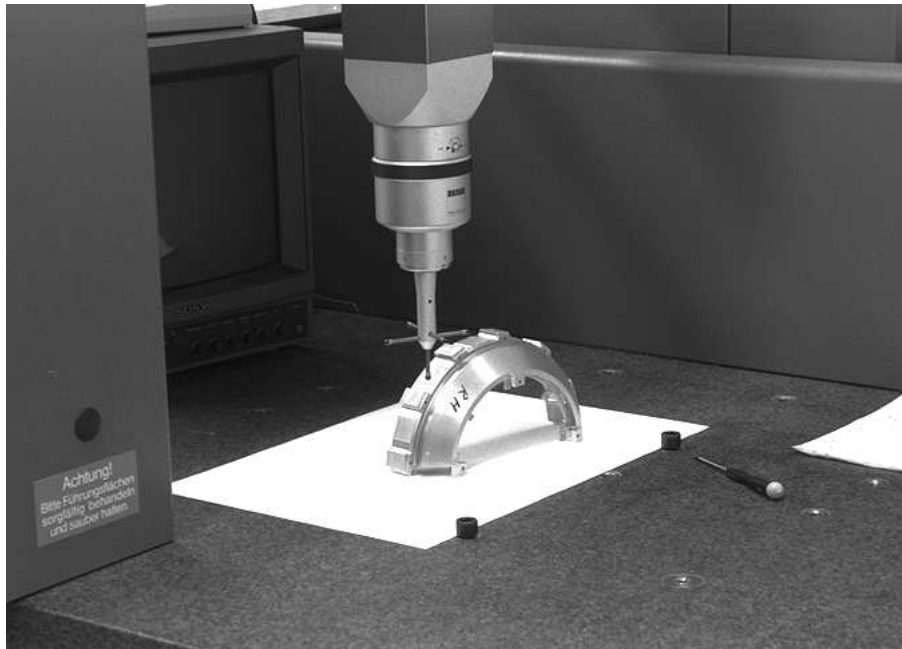


Abbildung 5.2: Die ZEISS-Maschine bei der Vermessung eines Prototypen des Adapterringes, der an den Outer Ring angeschraubt ist. Hier wurde ein Stern-Taster benutzt. Mit dem Taster wird das Meßobjekt vorsichtig angetastet. Die Koordinatenübergabe an den Rechner und die Ausgabe der Ergebnisse erfolgen automatisch.

rometer, wie maximale Verfahrensgeschwindigkeit, Antastkraft, Temperaturkorrekturen, Ausgabemodus usw., werden hier eingegeben. Es steht eine Lernprogrammierung zur Verfügung, mit der CNC-gesteuerte Meßprogramme erstellt werden können. Leider waren sowohl der Rechner als auch die Software nicht ausreichend stabil. Durch ständiges Abstürzen und Probleme beim Booten des Rechners wurde der Arbeitsablauf oft gestört.

Der Einfachheit wegen wird beim Kleben das kartesische Koordinatensystem (x, y, z) der Meßmaschine benutzt. Alle Koordinaten, die angegeben werden, beziehen sich auf dieses Koordinatensystem. In Tabelle 5.2 sind die Koordinaten, die während des Klebens benutzt werden, in Bezug zu den Koordinaten des DELPHI Detektors gesetzt.

5.2 Das Kleben der Halbmodule

Für eine möglichst exakte Ausrichtung bei der Herstellung eines Halbmoduls wurde ein Klebe jig entworfen und gebaut, der die Möglichkeit bietet, jeden Detektor und das Hybrid durch die x - y -Tische und den Drehtische exakt auszurichten. Jeder Detektor und das Hybrid werden einzeln auf dem Klebe jig in x und y sowie in

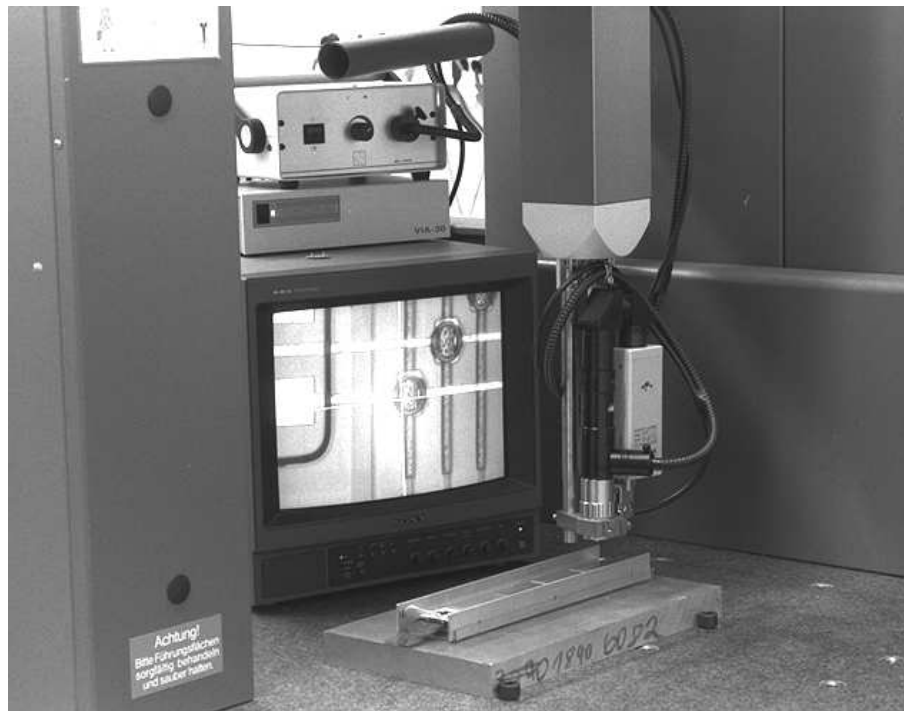


Abbildung 5.3: Die ZEISS-Maschine beim optischen Vermessen eines Halbmoduls. Punkte, die gemessen werden sollen, werden in den Schnittpunkt des Fadenkreuzes gebracht. Durch Drücken eines Tasters auf dem Steuerpult werden die Koordinaten an den Rechner übertragen. Die Auswertung der Koordinaten und die Ausgabe des Meßergebnisses erfolgen automatisch.

θ justiert. In den Abbildungen 5.4 und 5.5 ist der Klebejig mit den Justiereinrichtungen zu sehen. Nicht auf den Photos zu erkennen, sind kleine Gummiunterlagen unter den einzelnen Auflageflächen, die der exakten Einstellung der einzelnen Tische dienen. Alle fünf Auflageflächen werden mit den Befestigungsschrauben sowohl in der Höhe als auch in der Parallelität zueinander ausgerichtet, womit sichergestellt ist, daß der Pickupjig beim Umschalten des Vakuums plan auf der sensitiven Seite der Detektoren aufliegt.

Auf dem Klebejig liegt die sensitive Seite der Detektoren oben, die so mit dem Mikroskop betrachten werden kann. Es muß aber die Back Plane der Detektoren verklebt werden. Für das Umdrehen der ausgerichteten Detektoren sind Pickupjigs (siehe Abbildung 5.6) entworfen worden. Diese werden mit präziser Linearführungen, den Pickup-Achsen, auf die sensitive Seite der Detektoren aufgesetzt und die Detektoren ohne ihre räumliche Lage zueinander zu verändern, übernommen.

Nach Ablegen des Pickupjigs auf einen Tisch, ist ein einfaches Verkleben der Back Plane ermöglicht.

Detektor	DELPHI	Meßmaschine
RZ Det.	Z	X
RZDet.	ϕ	Y
$R\phi$ Det.	ϕ	X
$R\phi$ Det.	Z	Y

Tabelle 5.2: Die Koordinaten auf der Meßmaschine beim Kleben in Bezug zu den Koordinaten in DELPHI

5.3 Die Klebeanleitung

Im Sinne einer Arbeitsanweisung erfolgt eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise beim Kleben eines Halbmoduls.

Wichtig: Während des Zusammenbaus dürfen keine Koordinatendrehungen ausgeführt werden, der Zusammenbau erfolgt in den Gerätekoordinaten der Meßmaschine. Nullpunktverschiebungen sind erlaubt und erleichtern die Arbeit.

Wichtig: Die Orientierung für den gesamten Ablauf ist wie folgt: Das Hybrid liegt *links*, die Detektoren liegen *rechts* vom Hybrid.

Einjustierung des Klebejigs. Die Einjustierung des gesamten Jigs ist wichtig, da die RZ-Detektoren und die $R\phi$ -Detektoren gespiegelt aufeinander geklebt werden. Ist der gesamte Jig nicht ausgerichtet, liegen die Detektoren der beiden Seiten nicht parallel zueinander.

1. In die Koordinatenmeßmaschine wird zuerst der Tastkopf montiert, danach wird die Koordinatenmeßmaschine eingeschaltet.
2. Nach dem Einsetzen eines langen Einzeltasters in den Tastkopf wird dieser kalibriert.
3. Der Klebejig wird auf dem Meßtisch befestigt, die Pickupachsen eingesetzt.
4. Anschließend wird der Jig mit dem Taster ausgerichtet. Hierzu vermisst man die Pickupachsen als *Kreise* in der Höhe der Arbeitsebene. Ziel ist, die Pickupachsen genau nach den Gerätekoordinaten der Meßmaschine auszurichten, um einen Fehler beim Zusammenkleben der $R\phi$ -Detektoren mit den RZ-Detektoren zu vermeiden (Spiegelung). Die Ausrichtung erfolgt mit der dafür vorgesehenen Einstellschraube. Zu beachten ist, daß vor dem Messen die Arretierschrauben angezogen werden, da diese erneut den gesamten Jig bewegen.
5. Zuletzt wird der Tastkopf gegen das Mikroskop ausgewechselt.

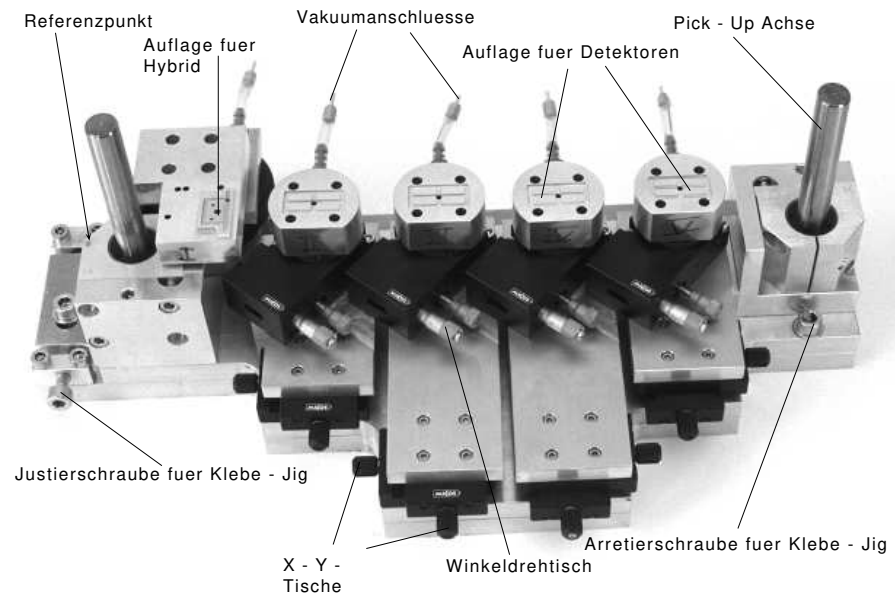


Abbildung 5.4: Der Klebejig, Sicht von schräg oben. Für die Ausrichtung jedes einzelnen Detektors stehen x - y -Tische und ein Winkeldrehtisch zur Verfügung. Der gesamte Jig wird mit einer Justierschraube auf der Koordinatenmeßmaschine ausgerichtet.

Verklebung von Hybrid und erstem RZ-Detektor. Bei der Ausrichtung der RZ-Detektoren ist es sehr wichtig, die Orientierung und den Typ der Detektoren zu beachten.

1. Die einzelnen Tische des Jigs werden nach Augenmaß vermittelt und der Höhenstell Tisch des Hybrids wird nach *unten* gedreht.
2. Das Hybrid wird, ohne die vorhandenen Bonddrähte zu beschädigen, mit dem Kühlkörper nach unten auf den Jig gelegt. Da die Kühlkörper nicht immer plan sind, muß damit gerechnet werden, daß das Vakuum nicht ausreicht, um sie zu fixieren. Die Befestigungsschrauben mit der Pinzette einsetzen und leicht anziehen.
3. Zum Einstellen der Höhe des Hybrid-Tisches vermißt man die Höhe des ersten Detektortisches, fährt ohne die Höhe zu verändern über die Klebefläche des Hybrids und stellt mit dem Höhenstell-Tisch diese Fläche scharf.
4. Nun wird das Hybrid ausgerichtet. Da das Hybrid nur eine Verstellmöglichkeit in x -Richtung hat, wird es von Hand in den Schraubenlöchern justiert. Die Ausrichtung wird am besten durch das Abscannen der Keramikanten kontrolliert, die parallel zu den x - y -Achsen der Meßmaschine liegen sollten. Die Position des Hybrids bestimmt man

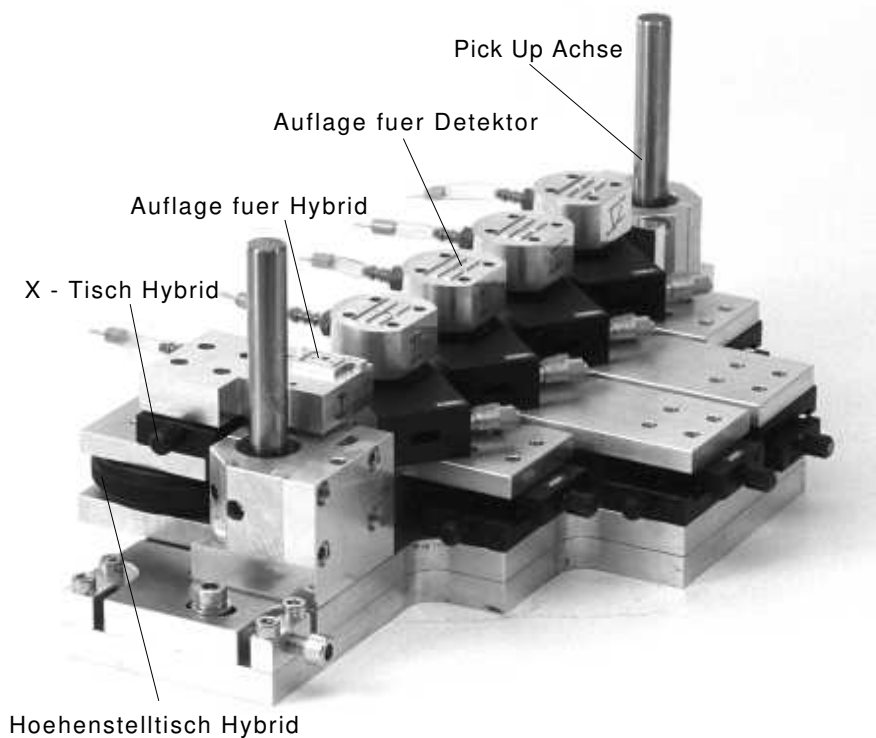


Abbildung 5.5: Der Klebejig, Sicht auf die Hybridauflage. Mit dem Höhensteltisch wird das Hybrid auf die Höhe des ersten Detektors eingestellt. Die Pickupachsen dienen der Übernahme auf den Pickupjig und können entfernt werden.

durch Vermessen der Referenzkugelhalterung als Kreis, wobei viele Meßpunkte den Fehler verringern. Der Mittelpunkt des Kreises definiert den Nullpunkt.

5. Anschließend wird der erste RZ-Detektor (RZ-320) auf den ersten Vakuumjig gelegt. Die Detektoren werden nur mit der Vakuumpinzette berührt, da bloße Hände oder herkömmliche Pinzetten den Detektor zerstören. Es ist auf die richtige Orientierung des Detektors zu achten.
6. Das Ausrichten der Streifen nach den Gerätekoordinaten der Meßmaschine erfolgt mit langsam, nur in x -Richtung fahrender Meßmaschine. Zur Kontrolle dient die Gerätekoordinatenanzeige auf dem Steuerpult. Beim Beobachten der Oberfläche des Detektors muß immer ein Streifen genau im Fadenkreuz des Mikroskops zu sehen sein. Die Streifen liegen in der Regel schräg auf dem Monitor, da das Mikroskop nicht genau parallel zur x -Achse auszurichten ist. Die Justierung des Detektors erfolgt durch den Winkeldrehtisch.
7. Befindet sich der Detektor im Winkel, so ist die räumliche Lage einzustellen. Das Mikroskop wird auf die Koordinaten (**17.800**; **-15.830**),

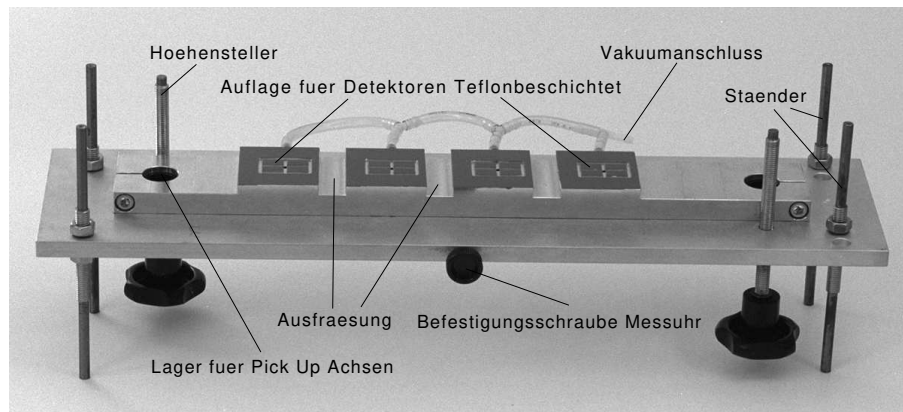


Abbildung 5.6: *Der Pickupjig. Mit den Höhensteller wird der Pickupjig vorsichtig auf die sensitive Seite der Detektoren aufgesetzt und die Detektoren übernommen. Die Flächen, die die sensitiven Seiten berühren, sind mit Teflon überzogen. Nach Ablegen des Pickupjigs kann die Back Plane verklebt werden.*

die den Referenzpunktes des Detektors definieren, gefahren und der Benutzer dreht an den x - y -Tischen, bis der Referenzpunkt im Fadenkreuz liegt. Ferner achtet man auf die richtige Höhe des Hybrid-Tisches; das Bild bleibt scharf auch beim Bewegen des Detektors über der Klebefläche des Hybrids. Der Referenzpunkt der RZ-Detektoren ist der Schnittpunkt des jeweils ersten Auslesestreifens und Diodenstreifens.

8. Zur Sicherheit wird die Ausrichtung des Winkels des Detektor erneut kontrolliert. Aufgrund der Tatsache, daß einige x - y -Tische den Detektor ein wenig verdrehen, ist es eventuell nötig nachzujustieren. Stimmt sowohl die räumliche Lage als auch der Winkel, kann mit dem Kleben begonnen werden.
9. Hierzu wird der Detektors in x -Richtung nach *rechts* herausbewegt, bis der Kleber auf die Back Plane aufgebracht werden kann.
10. Der Silberleitkleber ist ein elektrisch leitender Zwei-Komponenten-Kleber. Es werden zwei gleiche Gewichtseinheiten der Komponenten gemischt und mit einem dünnen Holzstab auf die Rückseite des Detektors in Form von kleinen Punkten aufgetragen. Beim Auftragen des Klebers auf das Hybrid kann beim Zusammenschieben ein unerwünschter Kontakt des Klebers mit der Stirnfläche oder den Bond Pads des Detektors entstehen. Für eine bessere Sicht auf die Rückseite des Detektors wird ein kleiner Spiegel unter den Detektor gelegt.
11. Araldid ist ein Zwei-Komponenten-Kleber mit guten Klebeeigenschaften. Auch bei diesem Kleber werden zwei gleiche Gewichtseinheiten gemischt und genauso aufgetragen wie der Silberleitkleber.

12. Jetzt muß der Detektor auf seine richtige räumliche Lage zurückbewegt werden. Nach der erneuten Positionierung des Mikroskops auf den Referenzpunkt des Detektors wird dieser nach *links* bewegt, bis der Referenzpunkt im Fadenkreuz des Mikroskops erscheint.
Nach der Klebung muß der Kleber zunächst aushärten. Die vollständige Aushärtung benötigt 24 Stunden. Hinreichend fest ist Araldid allerdings schon nach 2–3 Stunden, je nach Umgebungstemperatur.
13. Nach dem Aushärten des Klebers sind zunächst die Befestigungsschrauben des Hybrids zu entfernen. Bei dem anschließendem Herunterdrehen des Höhenstelltisches könnten sonst Beschädigungen des Detektors oder des Hybrides entstehen. Das Hybrid wird nach dem Herunterlassen nur durch die Klebung gehalten. Um Versetzungen zwischen der RZ-Seite und der R Φ -Seite zu vermeiden, ist der Detektor auf das Koordinatensystem des Klebejigs auszurichten. Zunächst muß das Koordinatensystem des Moduls auf die richtige Position auf dem Klebejig transformiert werden. Der Referenzpunkt des gesamten Klebejigs definiert den ersten Koordinatenursprung. Von dort wird der Nullpunkt des Moduls bestimmt, indem man auf die Koordinaten der richtigen Position der Referenzkugelhalterung (**70.560**; **–2.410**) fährt und ein zweites mal den Nullpunkt definiert. Jetzt liegt das Koordinatensystem des Moduls auf dem richtigen Ort des Klebejigs. Nun muß der Detektor mit dem Hybrid auf das neue Koordinatensystem einjustiert werden. Nach dem Anfahren des Referenzpunktes des Detektors mit dem Mikroskop, wird in bekannter Weise der Referenzpunkt des Detektor in Position gebracht.

Verkleben der weiteren RZ-Detektoren. Die restlichen drei RZ-Detektoren werden zusammengefaßt, da die Vorgehensweise identisch ist. Zu beachten ist wiederum die Orientierung und der Typ der weiteren Detektoren.

Folgende Reihenfolge ist einzuhalten: Nach dem ersten RZ-320 folgt ein weiterer RZ-320 Detektor, dann ein RZ-640 Detektor und zum Schluß ein RZ-1280 Detektor.

1. Die Detektoren werden nacheinander auf den jeweiligen Jig aufgelegt und zuerst im Winkel ausgerichtet. Die Vorgehensweise ist dieselbe, wie bei dem ersten RZ-Detektor.
2. Die Detektoren werden mit derselben Vorgehensweise wie beim ersten RZ-320 in die richtige räumliche Lage gebracht. Das Mikroskop wird auf die richtigen Koordinaten gestellt und mit den x - y -Tischen der Referenzpunkt der Detektoren in das Fadenkreuz gelegt. Danach wird der Winkel nochmals kontrolliert. Die Koordinaten der Referenzpunkte der RZ-Detektoren mit Koordinatenursprung im Mittelpunkt der

Referenzkugelhalterung auf dem Hybrid sind in Tabelle 5.3 zu finden.

Detektor	Typ	Koordinate
1. Detektor	RZ-320	(17.800;-15.830)
2. Detektor	RZ-320	(77.800;-15.830)
3. Detektor	RZ-640	(137.800;-15.830)
4. Detektor	RZ-1280	(197.800;-15.830)

Tabelle 5.3: *Die Koordinaten der Referenzpunkte der RZ-Detektoren relativ zum Koordinatenursprung im Mittelpunkt der Referenzkugelhalterung des Hybrids.*

3. Nach dem Einsetzen der Pickupachsen, wird die Meßuhr sachgemäß an den Pickupjig montiert und die Höhensteller so hoch eingestellt, daß der Pickupjig auf den Klebejig aufgesetzt kann, ohne daß die Detektoren und das Hybrid berührt werden.
4. Der Pickupjig hat eine Orientierung, die beachtet werden muß. Das Hybrid liegt auf der *linken* Seite. Man erkennt die *linke* Seite des Pickupjigs an der längeren Ausfräsung. Beim Einsetzen in die Lager muß man sehr sorgfältig vorgehen, Verkantungen und plötzliches Herunterfallen des Jigs sind zu vermeiden. Die Höhensteller sollen in die dafür vorgesehenen Führungen rasten.
5. Unter ständiger optischer Kontrolle wird der Pickupjig langsam und parallel zu den Detektoren abgesenkt. Der Benutzer sollte an beiden Höhensteller möglichst gleichzeitig drehen, um eine Verkantung in den Lagern und plötzliches Fallen des Jigs zu vermeiden. Ein weißer Hintergrund erleichtert dabei die optische Kontrolle. Der Jig wird langsam und sorgfältig auf den Detektoren aufgesetzt, wobei die Meßuhr anzeigt, ob und wie tief aufgesetzt wurde. In Abbildung 5.7 ist der Pickupjig kurz vor dem Aufsetzen zu sehen.
6. Sitzt der Pickupjig ordnungsgemäß auf dem Detektor, wird das Vakuum auf dem Pickupjig eingeschaltet, danach das Vakuum auf dem Klebejig abgeschaltet. Das ausgerichtete Halbmodul soll nun vollständig vom Pickupjig gehalten werden.
7. Durch langsames und gleichmäßiges Hochdrehen an den Höhenstellern sollen alle Detektoren gleichzeitig vom Klebejig abheben.
8. Der Pickupjig wird nun so auf einen Tisch gestellt, daß die Detektorrückseite nach oben zeigt. Nach dem Mischen des Silberleitklebers werden mit einem dünnen Holzstäbchen kleine Punkte auf die Detektorrückseite aufgebracht. Danach wird Araldid angerührt und ebenfalls kleine Punkte auf die Back Plane aufgebracht. Mit einer Pinzette

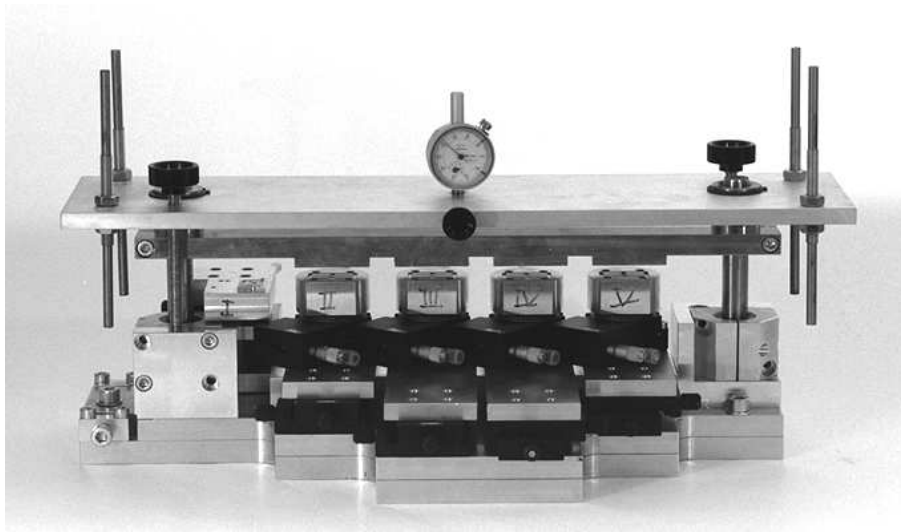


Abbildung 5.7: Der Pickupjig über dem Klebeijg kurz vor dem Aufsetzen. (Das Bild wurde ohne Detektoren gemacht). Beim Absenken des Pickupjigs ist an der Meßuhr ein mögliches Verkanten zu erkennen. Nach dem Aufsetzen zeigt die Meßuhr die Aufsetztiefe an.

werden, die mit Goldstreifen versehenen Keramikplättchen, auf den Kleber aufgelegt und vorsichtig mit kleinen Schrauben beschwert.

Die RZ-Seite liegt zum Aushärten fertig geklebt auf dem Pickupjig, der Klebeijg ist unbenutzt und es ist möglich, mit dem Ausrichten der $R\phi$ -Detektoren zu beginnen.

Verkleben der $R\phi$ -Detektoren. Die Vorgehensweise ist im wesentlichen identisch mit dem Kleben der restlichen RZ-Detektoren. Sehr wichtig ist, das richtige Koordinatensystem zu initialisieren. Insbesondere wenn die Koordinatenmeßmaschine ausgeschaltet wurde, muß das Koordinatensystem des Moduls (Nullpunkt im Mittelpunkt der Referenzkugelhalterung) richtig auf den Klebeijg initialisiert werden.

1. Der Referenzpunkt des gesamten Klebeijgs definiert den ersten Nullpunkt des Koordinatensystems. Nach dem Anfahren der Position **(70.560; -2.410)**, wird in diesen Punkt der Nullpunkt des Moduls gelegt. Somit wird der Nullpunkt des Halbmoduls in die richtige Position auf dem Klebeijg gebracht. Wird dies vergessen, so ist die $R\phi$ -Seite mit einen x - y -Offset in Bezug zur RZ-Seite verschoben.
2. Ein $R\phi$ -Detektor nach dem anderen wird auf den Klebeijg aufgelegt, und sowohl der Winkel eingestellt als auch in die korrekte räumliche Lage justiert. Die Koordinaten der Referenzpunkte der $R\phi$ -Detektoren sind in Tabelle 5.4 zu finden.

Detektor	Typ	Koordinate
1. Detektor	R ϕ	(16.770;-16.024)
2. Detektor	R ϕ	(76.770;-16.024)
3. Detektor	R ϕ	(136.770;-16.024)
4. Detektor	R ϕ	(196.770;-16.024)

Tabelle 5.4: Die Koordinaten der Referenzpunkte der R ϕ -Detektoren mit Koordinatenursprung im Mittelpunkt des Referenzkugelhalterung des Hybrids.

3. Wenn die RZ-Seite durchgehärtet ist, kann die R ϕ -Seite aufgeklebt werden. Die R ϕ -Seite wird in der vorher beschriebenen Weise auf einen zweiten Pickupjig übernommen.
4. Die Schrauben auf den Keramikplättchen werden entfernt und die Pickupachsen in den Pickupjig der RZ-Seite eingesetzt. Um eine Beschädigung der Detektoren zu vermeiden, muß die Auflagefläche vergrößert werden. Lose Keramikplättchen ohne Goldstreifen werden zur mechanischen Unterstützung auf die Back Plane der RZ-Detektoren gelegt.
5. Anschließend wird leitender Kleber gemischt und auf den Keramikplättchen mit Goldstreifen kleine Punkte aufgetragen, um danach Araldid anzurühren, das ebenfalls auf die Keramikplättchen aufgebracht wird.
6. Die Höhensteller des Pickupjigs der R ϕ -Seite werden weit hinuntergedreht und nach dem Einführen in die Pickupachsen wird der Jig langsam abgelassen. Dabei hilft erneut ein weißer Hintergrund, um das gleichmäßige Aufsetzen in den Kleber beobachten zu können. Die Abbildung 5.8 zeigt die R ϕ -Seite kurz vor dem Aufsetzen in den Kleber.

Ein Halbmodul ist nun vollständig geklebt. Nach dem Aushärten löst man das Vakuum der R ϕ -Seite und hebt den Pickupjig ab, zieht vorsichtig die losen Keramikplättchen, die nur der mechanischen Unterstützung dienten heraus und kann dann das Vakuum der RZ-Seite ausschalten. Das Halbmodul steht zur weiteren Bearbeitung bereit.

Damit die Wartezeiten während des Trocknens der einzelnen Klebungen so gering wie möglich sind, beginnt man am besten nachmittags mit der ersten Klebung des ersten RZ-320 mit dem Hybrid. Am darauffolgendem Morgen kann mit den restlichen RZ-Detektoren begonnen werden. Es ist möglich, die R ϕ -Seite ohne Verzögerung zu justieren und sie anschließend mit der RZ-Seite zu verkleben. Dieses Sandwich sollte nun über Nacht vollständig durchhärten. Da der Klebejjig frei ist, kann erneut mit dem ersten RZ-Detektor und dem Hybrid begonnen wer-

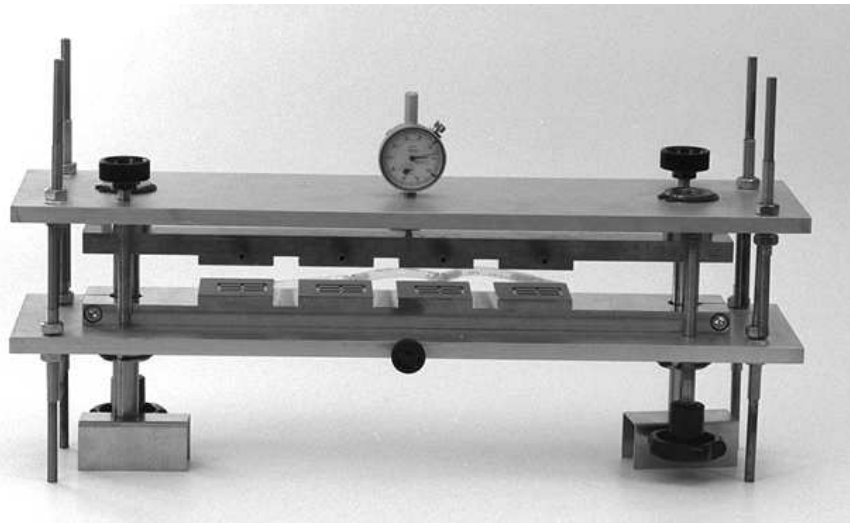


Abbildung 5.8: Das Sandwich kurz vor dem Aufsetzen. (Auf dem Bild sind keine Detektoren aufgelegt). Die ausgerichtete $R\Phi$ -Seite wird auf die fertige RZ-Seite geklebt.

den. Durch diese geschickte Zeiteinteilung ist ein Halbmodul pro Tag herzustellen, wobei die wichtigsten Klebungen jeweils eine volle Nacht aushärten können.

5.4 Das Kleben der Ganzmodule

Zwei gebondete und getestete Halbmodule werden zu einem Ganzmodul zusammengeklebt. Die beiden Halbmodule werden auf den Ganzmoduljig aufgelegt, ausgerichtet und arretiert. An der Verbindungsstelle wird zwischen die Detektoren ein Keramikstück ohne Goldstreifen eingeklebt. Es dient der mechanischen Befestigung; beide Halbmodule bleiben elektrisch getrennt. Der Ganzmoduljig

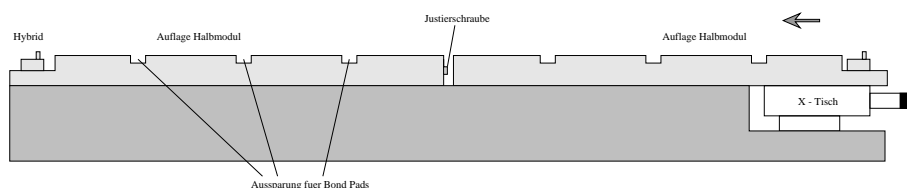


Abbildung 5.9: Der Ganzmoduljig. Die Halbmodule werden auf die Auflagen gelegt, ausgerichtet und mit Vakuum festgehalten. Zwischen den beiden Halbmodulen wird ein Keramikstück eingeklebt und, indem man den x-Tisch bis zum Anschlag an die Justierschraube hineindreht, zusammengeklebt.

(Abbildung 5.9) besteht aus zwei Auflageflächen für die Halbmodule. Eine dieser Auflagen ist fest montiert, die andere ist auf einem x-Tisch befestigt. Eine Justier-

schraube zwischen den beiden Auflagen ist so eingestellt, daß die beiden Halbmodule genau auf Maß zusammengeschoben werden können. Ein Keramikstück wird zunächst an eines der Halbmodule geklebt. Der x -Tisch wird herausgedreht und beide Halbmodule werden auf die Auflagen gelegt, ausgerichtet und mit Vakuum arretiert. Kleber wird auf das Keramikstück aufgebracht und anschließend der x -Tisch bis zum Anschlag an der Justierschraube hineinbewegt. Nun muß der Kleber aushärten.

Kapitel 6

Das Bonden der Halbmodule

Mit Bonden wird eine Drahtverbindungstechnik bezeichnet, mit der man Chips untereinander und mit externen Baugruppen verbindet. In Abbildung 6.1 ist ein Bonder zu sehen. Beim Bonden wird ein Draht mit der zu verbindenden Stelle, dem Bond Pad, verschweißt. Auf dem Markt befinden sich verschiedene Drahtstärken und Drahtmaterialien. Die Bonddrahtstärken beginnen bei $17.5\mu\text{m}$ und enden bei $500\mu\text{m}$. Neben Aluminium ist Gold, bei dem man meist das gesamte Substrat auf über 120 Grad Celsius erhitzt, das häufigste Bondmaterial. Da beide reine Metalle (99.999%) sehr weich sind, werden die kleinen Drahtstärken ($17.5 - 100\mu\text{m}$) meist mit 1% Silizium oder 0.5–1% Magnesium legiert, während die großen Drahtstärken in Reinstform angewendet werden. Als Energiequelle dient ein Ultraschallgenerator. Der Ultraschallgenerator sendet einen Bondimpuls, einen Schallimpuls, auf den Bondarm, an dessen Spitze sich das Bondwerkzeug befindet. Bei richtiger Dimensionierung und Einjustierung des Bondarms und des Bondwerkzeugs befinden sich diese in Resonanz mit der fest eingestellten Frequenz des Generators und werden zu Schwingungen angeregt. Das Bondwerkzeug reibt auf dem Draht, es entsteht Wärme, und der Bonddraht verschweißt mit dem Bond Pad auf dem Substrat. In Abbildung 6.2 ist der Bondarm und das Bondwerkzeug zu erkennen. Sie befinden sich genau in Resonanz mit der fest eingestellten Frequenz des Generators und sind aus diesem Grund sehr exakt dimensioniert und gefertigt. Insbesondere beim Wechsel des Bondwerkzeuges im Bondarm ist darauf zu achten, daß man die mitgelieferte Einstellehre für die Einjustierung des Bondwerkzeuges benutzt. Behutsames und exaktes Vorgehen sind hier von großem Vorteil. [20]

6.1 Das manuelle Bonden, das Funktionprinzip des Bonders

Das Bonden ist ein mechanischer Vorgang. Damit der Bonder sicher und zuverlässig arbeitet, muß die richtige Arbeitshöhe in Bezug auf das Bondwerkzeug

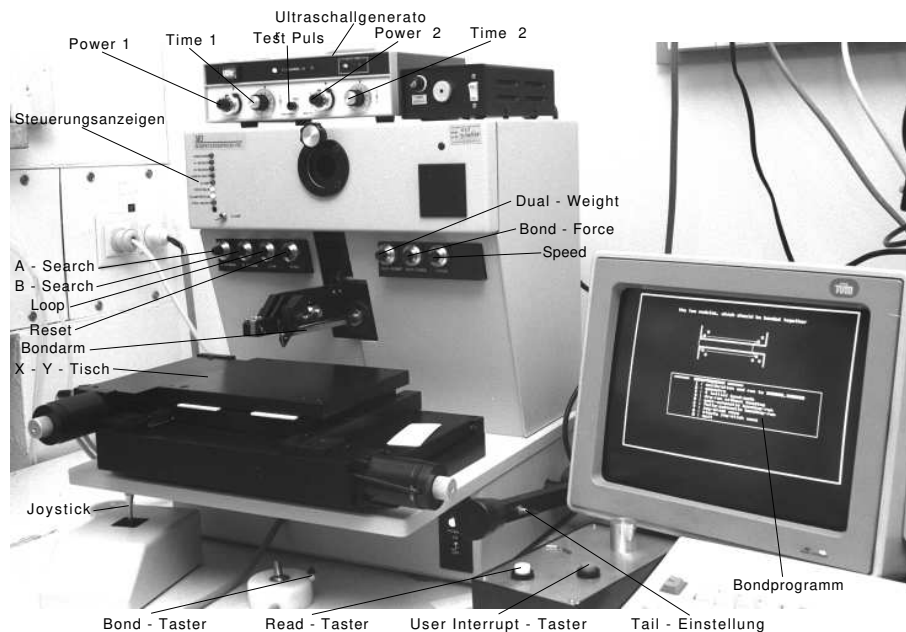


Abbildung 6.1: Der Bonder verfügt über zahlreiche Einstellmöglichkeiten. Es muß ein Parametersatz gefunden werden, der einen möglichst guten Bond herstellt. Neben einem guten elektrischen Kontakt, sollte der Bond mechanisch stabil sein.

eingestellt werden. Zur Bestimmung der richtigen Arbeitshöhe, liegt dem Bonder eine Höhenlehre bei. Ist die richtige Arbeitshöhe eingestellt, wird das zu bondende Substrat aufgelegt und durch ein Vakuum oder eine mechanische Verankerung festgehalten. Mit Hilfe des Mikroskops und des x - y -Tisches wird das Bond Pad auf dem Substrat ungefähr unter dem Bondwerkzeug positioniert. Nun drückt man den Bondtaster der Bondmaus und hält diesen gedrückt. Das Bondwerkzeug nimmt die **Suchhöhe** ein, und das Bond Pad kann genau anvisiert werden. Nach Lösen des Bondtaster bewegt sich das Bondwerkzeug nach unten auf das Bond Pad, drückt mit der **Bondkraft** auf den dazwischen liegenden Draht, sendet nach einer fest eingestellten Zeit im ms-Bereich den Bondimpuls mit 63.7kHz aus und nimmt die **Loop Höhe** ein. Dieser Vorgang dauert nur Sekundenbruchteile. Der erste Bond ist nun, wie in Abbildung 6.3 zu sehen, fest mit dem Bond Pad verschweißt. Beim Positionieren des zweiten Bond Pads, ist die Loopformung zu beobachten. Durch erneutes Drücken des Bondtaster nimmt das Bondwerkzeug zum genauen Anvisieren des Bond Pads erneut die **Suchhöhe** ein. Ist das Bondwerkzeug exakt über dem Bond Pad positioniert, ist der Taster zu lösen und der eigentliche Bondvorgang wird nochmals aktiviert. Das Bondwerkzeug bewegt sich nach unten, drückt wieder mit der **Bondkraft** auf den dazwischenliegenden Draht und sendet nach der fest eingestellten Zeit den Bondimpuls aus, reißt aber nun den Faden unmittelbar nach dem Bond ab, nimmt die **Reset Höhe** ein und schiebt zum Schluß den Bonddraht etwas nach vorne, so daß ein kleines Stück

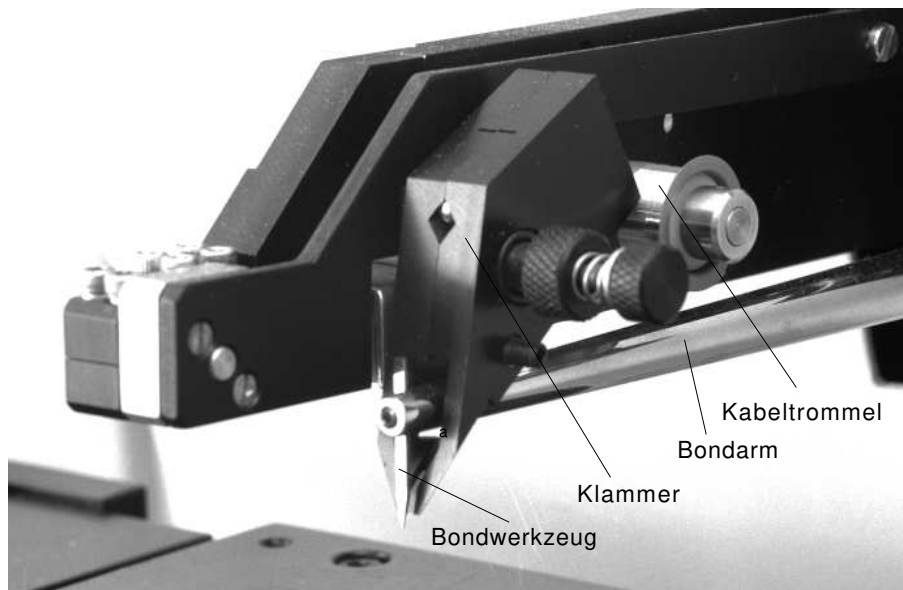


Abbildung 6.2: Der Bondarm. Das Bondwerkzeug hat einen Führungskanal für den 25µm dicken Aluminiumdraht. Bondarm und Bondwerkzeug befinden sich in Resonanz mit der Ultraschallfrequenz. Die Klammer dient zum Festhalten und dem Abreißen des Bonddrahtes.

Draht, das **Tail**, unter dem Bondwerkzeug zu sehen ist. Nun sollte eine komplette Drahtverbindung, mit guten elektrischen und mechanischen Eigenschaften (geringer Widerstand, hohe Reißfestigkeit) zustande gekommen sein. Der Bonder bietet darüberhinaus die Möglichkeit Bonds in Stich Bond-Technik auszuführen. Durch Drücken eines zusätzlichen Tasters wird der Draht nach dem zweiten Bond nicht abgerissen. Wenn es von Vorteil ist, können mit einem Draht weitere elektrische Verbindungen hergestellt werden.

6.2 Die Parameter des Bonders

Wie in Abbildung 6.1 zu sehen, besitzt der Bonder zahlreiche Einstellmöglichkeiten. Mit den vier Potentiometern des Ultraschallgenerators wird die Energie des Bondimpulses eingestellt. [21]

- **Power 1; Power 2.** Mit den Parametern Power wird die Amplitude der Schwingung eingestellt.
- **Time 1; Time 2.** Die Parameter Time dienen zur Einstellung der Zeitdauer des Bondimpulses in einem Bereich von 0 bis 100ms.

Beide Parameter sind getrennt für den ersten und den zweiten Bond einzustellen. Sie bestimmen im wesentlichen die Energie des Bondimpulses und sind

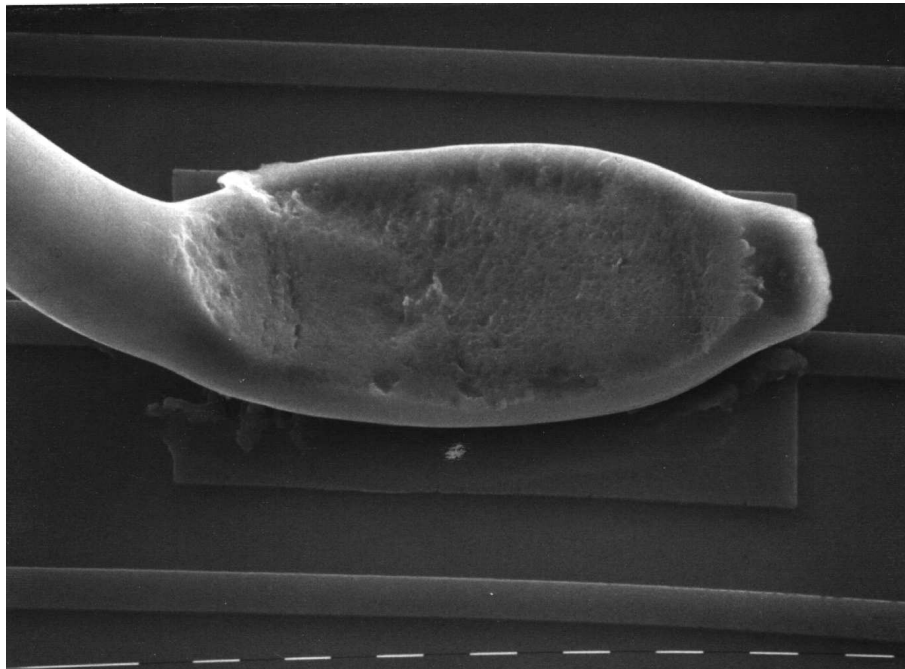


Abbildung 6.3: Die elektronenmikroskopische Aufnahme eines Bondfußes (Erster Bond). Der Bonddraht mißt $25\mu\text{m}$ im Durchmesser. Das Bond Pad eines Streifen-detektors ist ungefähr genauso groß ($\approx 50 \times 100\mu\text{m}$) wie der Bondfuß. (Foto von Herrn Dr. Obst, ITP)

somit dafür verantwortlich, wie gut die Drahtverbindung in mechanischer und elektrischer Hinsicht ist. Mit etwas Erfahrung ist eine optische Beurteilung eines Bonds möglich.

Der eigentliche Bonder besitzt acht mechanische Einstellmöglichkeiten. Die Skalen auf diesen Einstellmöglichkeiten sind nicht kalibriert. Sie können somit nicht von einem auf einen anderen Bonder übertragen werden.

- **A-Search; B-Search.** Die Einstellungen A- bzw. B-Search dienen zur Einstellung der Suchhöhen für den ersten und den zweiten Bond. Zum Ausgleichen geringer Höhenunterschiede zwischen dem ersten und dem zweiten Bond sind sie getrennt voneinander einzustellen. Dadurch ist es möglich, den Bondvorgang im Mikroskop immer gut zu beobachten und zu steuern. Ferner müssen diese Höhen innerhalb bestimmter Toleranzgrenzen richtig gewählt werden: Zur Sicherheit des Bondwerkzeuges sendet der Bonder bei zu niedriger Suchhöhe keinen Bondimpuls. Ist die Suchhöhe zu niedrig eingestellt, liegt das Bondwerkzeug auf dem Substrat auf. Durch die Verweigerung des Bondimpulses ist man gezwungen, vor der Weiterfahrt eine höhere Suchhöhe einzustellen. Bei zu großer Suchhöhe erfolgen in der Regel keine schönen, beziehungsweise sehr unregelmäßige Bonds. Der Bondimpuls wird

nach einer festen Zeit nach dem Lösen des Bondtatsters aktiviert, obwohl das Bondwerkzeug noch nicht vollständig auf dem Bonds substrat aufliegt.

- **Loop.** Der Parameter Loop stellt die Höhe der Drahtverbindung ein. Diese ist möglichst niedrig zu wählen, da damit der Bond stabiler ist, muß aber so hoch sein, daß keine Kurzschlüsse mit dem Substrat entstehen. Falls zweilagig gebondet werden muß, ist ein niedriger Loop in der ersten Lage besonders wichtig.
- **Reset.** Reset stellt die Ruheshöhe des Bondwerkzeuges nach Fertigstellung einer kompletten Drahtverbindung ein.
- **Dual Weight.** Dual Weight erlaubt per Fußschalter ein zusätzliches Gewicht auf das Bondwerkzeug zu legen und damit die Bondkraft (Bond Force) zu erhöhen.
- **Bond Force.** Die Kraft, mit der das Bondwerkzeug auf das Substrat drückt, muß eingestellt werden. Diese Kraft steht in engem Zusammenhang mit der Energie des Bondimpulses und trägt wesentlich zu einer guten Drahtverbindung bei. Die Einstellung sollte bei 25 bis 30g liegen, was mit einer Waage nachgemessen wird, da die Skala der mechanischen Einstellmöglichkeit, die von 15 bis 150g reicht, nicht geeicht ist.
- **Speed.** Eine Viskodämpfung, die mit dem Regler Speed eingestellt wird, steuert die Geschwindigkeit, mit der sich der Bondarm bewegt. Diese steht wegen der Zeitkonstanten zwischen dem Befehl Bonden und dem tatsächlichen Lossenden des Bondimpulses in engem Zusammenhang mit den Suchhöhen. Ist die Geschwindigkeit zu hoch, zerdrückt der heruntersausende Bondarm den Draht auf dem Bond Pad und die Verbindung kommt nicht zustande.
- **Tail.** Unter dem Tail versteht man das Stückchen Draht, das nach Abreißen des Drahtes aus dem Bondwerkzeug herausgeschoben wird. Die Einstellmöglichkeit befindet sich an dem Arm an der rechten Seite des Bonders und wird nur optisch durch den Blick durch das Mikroskop eingestellt. Diese Einstellung wirkt nur auf den ersten Bond, trägt allerdings stark zu dessen Formgebung bei.

6.3 Der Umbau des Bonders

Die Halbmodule bestehen, wie in Kapitel 4 dargestellt, aus vier RZ-, beziehungsweise R ϕ -Detektoren und einem Hybrid. Jeder Detektor besitzt 640 Kanäle, die in zwei Lagen zu je 320 angeordnet sind. Also müssen zwischen den Detektoren jeweils 640 Bonds gemacht werden. Pro Halbmodul sind somit 5120 Einzelbonds

und einige Bonds, die den Guard Ring und die Bias Line verbinden, zu machen. Der Abstand zwischen zwei Bond Pads beträgt in der Regel $100\mu\text{m}$. Es ist einsichtig, daß diese große Anzahl von Bonds kaum von Hand mit der nötigen Präzision, Qualität und vor allem in einer vernünftigen Zeit zu machen ist. Deshalb wurde für das automatische Bonden der Halbmodule der ursprünglich manuelle Bonder in Eigenarbeit umgebaut. Es wurde ein x - y -Tisch mit Schrittmotorsteuerung anstelle der manuellen mechanischen Verschiebmöglichkeit unter dem Bondwerkzeug installiert und eine elektronische Steuerung des Bonders durch einen PC hergestellt. Auf diesem PC befindet sich ein Programm, das sowohl den Bonder als auch den x - y -Tisch steuert. Ferner wurde ein eigens zu diesem Zweck entworfener Bondjig in unserer Werkstatt gefertigt sowie eine Video-Überwachungskamera auf das Mikroskop installiert. Mit diesen Hilfsmitteln konnten die Halbmodule in relativ kurzer Zeit mit der erforderlichen Präzision und Qualität gebondet werden.

Zu diesem Zweck eigens angeschafft wurde ein Manueller Bonder (MEI 1204 W) der Firma Marpet Enterprises Inc. (MEI). Dieser Bonder wurde mit einer mechanischen Maus für die x - y -Bewegung geliefert, die auch der Auslösung des Bondimpulses dient. Diese mechanische Vorrichtung wurde demontiert und an dessen Stelle ein x - y -Tisch der Firma Märzhäuser Wetzlar montiert. Bei dem x - y -Tisch sind zwei Phasen Schrittmotoren, die von einer Motorsteuerung mit Mikroschritten gesteuert werden, zum Einsatz gekommen. Die Schrittmotorsteuerung ist via einer RS232 Schnittstelle mit dem Rechner verbunden. Der kleinste Schritt, der gefahren werden kann, beträgt $0.1\mu\text{m}$. Die Wiederholgenauigkeit liegt bei $0.25\mu\text{m}$.

Zur Steuerung des Bonders wurde eine digitale I/O-Karte (8255) in den PC (AT 286) installiert. Am Bonder wurden parallel die Steuerungsanzeigen und Steuersignale abgegriffen beziehungsweise eingekoppelt. Zur galvanischen Trennung zwischen Bonder und Rechner sind Optokoppler eingesetzt. Der Schaltplan ist in Abbildung 6.4 abgebildet.

Die Optokoppler der Taster sind mit Schmitt-Triggern versehen, damit ein mögliches Prellen der Taster nicht auf die Elektronik weitergegeben wird.

6.4 Das Bondprogramm

Nach dem Starten des Bondprogramms erscheint zunächst das Menü, mit acht Menüpunkten, die durch die Eingabe der jeweiligen Zahl aufzurufen sind.

1. **Calibration.** Dieser Programmpunkt muß nur einmal nach dem Start der gesamten Anlage aufgerufen werden, um den x - y -Tisch zu kalibrieren. Nach Aufruf dieses Punktes erfolgt eine Abfrage, die sicherstellen soll, daß alle Wege ungehindert erreicht werden. Der Tisch fährt in die linke, hintere Ecke, bis die Endschalter ansprechen und kalibriert sich dann selbständig.

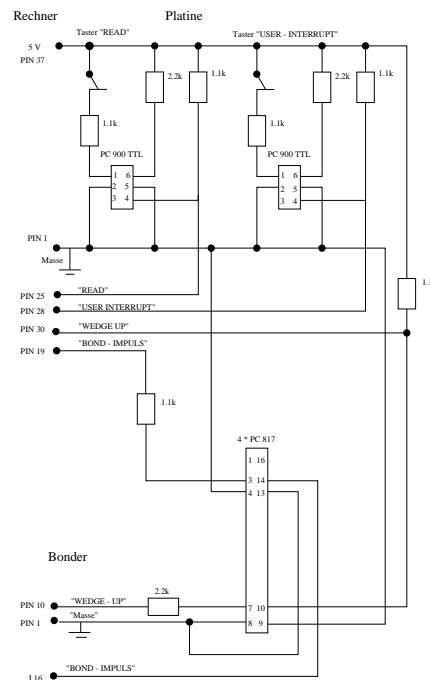


Abbildung 6.4: Der Schaltplan der Bond-Platine. PC 817 sind Optokoppler zur galvanischen Trennung von Bonder und Rechner; PC 900 sind Optokoppler mit Schmitt-Trigger (Vermeidung von Kontaktprellen).

2. **Geometrie.** Dieser Programmpunkt muß vor der Initialisierung aufgerufen werden und fordert zur Eingabe von einem der drei möglichen Bondvorgänge auf.
 - **Chip-Hybrid-Bonden.** Da bei der Lieferung die Bondverbindungen zwischen Chips und Hybrid fertig ausgeführt sind, spielt dieser Programmpunkt bei der Herstellung der Halbmodule in Karlsruhe keine Rolle.
 - **Detektor-Chip-Bonden.** Dieser Programmpunkt besitzt eine feste Anzahl von 64 Bonds pro Durchgang, der Abstand der Bonds ist einzugeben, wobei hier der Abstand der Bonds auf dem Detektor gefragt ist, nicht der Abstand auf den Verstärkerchips. Das Bonden von Detektoren auf Chips beinhaltet Winkel in der Geometrie, da der Abstand der Bond Pads auf den Chips kleiner ist als auf den Detektoren. Es ist deshalb immer von der Mitte aus nach außen hin zu bonden. Dieser Programmpunkt berechnet den Bond mit dem kleinsten Winkel der initialisierten Geometrie und beginnt mit diesem. Danach wird zu größeren Winkeln nach außen gebondet.
 - **Detektor-Detektor-Bonden.** Hier wird nach der Anzahl der gewünschten Bonds und dem Abstand der Bond Pads gefragt. Gebondet

wird dann in der Reihenfolge der Initialisierung.

3. **Initialize Bond-Pads.** Der Programmpunkt fordert zur Initialisierung auf. Dabei werden die exakten Positionen von den vier äußersten Bond Pads angefahren und die tatsächlichen Koordinaten aller Bond Pads bestimmt. Das Programm gibt jeweils an, welcher Punkt zu initialisieren ist. Dabei wird eine bestimmte Reihenfolge eingehalten. Zuerst muß ein hinterer Bond, ein B-Bond initialisiert werden, unabhängig davon ob dieser links oder rechts außen liegt. Nach dem dazugehörigen A-Bond, folgt eine Abfrage nach der Richtung, in der der letzte A-Bond liegt. Direkt nach dieser Eingabe fährt der Tisch automatisch auf die theoretisch richtige Position. Bei richtiger Eingabe des Bond Padabstandes unter Programmpunkt 2 trifft er eindeutig den richtigen Streifen, wobei das Programm natürlich nicht den Winkel, in dem der Bondjig auf dem x - y -Tisch liegt, berücksichtigt. Dieses automatische Anfahren des Streifens hilft besonders beim Initialisieren von Detektor zu Chip bonden, es erspart das lästige Zählen von jeweils 64 Streifen. Nach Initialisieren des letzten A-Bonds fährt der Tisch automatisch zur theoretischen Position des letzten B-Bonds. Danach werden zwei Geraden getrennt für A-Bonds und B-Bonds gefittet, auf denen die Bond Pads liegen und die Koordinaten der einzelnen Bond Pads berechnet.
4. **Test run without bonding.** Dieser Programmpunkt dient der Kontrolle der berechneten Koordinaten nach dem Initialisieren. Das Programm bondet nicht und bietet auch keine Möglichkeit zum manuellem Bonden, da an keinem Punkt ausreichend Zeit zur Verfügung steht. Abgefragt werden die Nummer des ersten Bonds und die Anzahl der zu kontrollierenden Koordinaten.
5. **Semi automatic bonding.** Dabei fährt das Programm nacheinander die Bond Pads an und fordert zum manuellen Bonden auf. Will man an dieser Stelle nicht bonden, so gibt man hier ein 's' über die Tastatur ein, das Programm fährt danach automatisch zum nächsten Bond. Es ist nicht möglich, eine Positionsänderungen durchführen. Jeder Bond ist von Hand auszulösen. Hier ist die nötige Zeit vorhanden, um die Bonds zu überprüfen und die Parameter zu ändern. Muß ein teilgebondetes Halbmodul weiterbearbeitet werden, so bietet dieser Programmpunkt die Möglichkeit, über gebondete Streifen hinwegzufahren, ohne die Nummer des Streifens zu kennen. Abgefragt wird die Nummer des ersten Bonds und wieviele Bonds manuell gemacht werden sollen.
6. **Automatic Bonding.** Hier wird vollautomatisch gebondet. Abgefragt wird neben der Nummer des ersten Bonds und der Anzahl der Bonds, die man in einem Durchgang machen möchte, auch das Bond Delay (wie lange soll das Programm die Suchhöhe halten, bevor gebondet wird), die Nummern

der Bonds, die nicht gebondet werden sollen (bekannte Pin Holes, schon gebondete Pads, usw.) und die Zahl der gewünschten halbautomatischen Bonds.

7. **Joystick move.** Nach Eingabe dieses Programmpunktes ist der x - y -Tisch manuell mit dem Joystick zu bewegen. Da der Bondtaster der Bondmaus zu jedem Zeitpunkt sensitiv ist, können hier ganz bequem alle Bonds gemacht werden, die nicht mit Hilfe des Programms zu machen sind, wie z.B. einzelne Bonds auf den Streifen oder das Bonden von Guard Ring und Bias Line. Es besteht die Möglichkeit, den Tisch soweit herauszufahren, daß sich der Bondjig nicht mehr unter dem Bondwerkzeug befindet. Dadurch ist der Bondjig bequem auf den Tisch zu installieren oder zu entfernen.
8. **Slow joystick move.** Dieser Programmpunkt ähnelt Programmpunkt 7, jedoch mit einem stark verlangsamten x - y -Tisch. Somit können langsam, vorsichtig und präzise schwierige Tischbewegungen, wie zum Beispiel nachträgliches Bonden eines Streifens zwischen zwei vorhandenen Bonds, ausgeführt werden.

Das Programm besitzt drei Unterbrechungsmechanismen. Zum einen den roten Interrupt-Knopf, der es ermöglicht, falls notwendig, das automatische Bonden zu unterbrechen (Bonddraht geht aus, Bonddraht ist aus dem Bondwerkzeug gerutscht, Fehlinitialisierung, Pause, ...). Das Programm behält die Geometrie- und Initialisierungsdaten, es kann also direkt weiter gebondet werden. Eine Unterbrechung ist nur dann möglich, wenn ein Bond vollständig beendet wurde. Nach einer Unterbrechung dieser Art besteht die Möglichkeit, durch direkte Eingabe der nächsten Bond Pad-Nummer weiterzubonden oder aber zurück zum Menü zu gelangen. Hierbei muß nach erneutem Aufruf von Programmpunkt 6 **Automatisches Bonden** auf die Nummer des ersten Bonds und die Anzahl der durchzuführenden Bonds in diesem Durchgang geachtet werden, da das Programm vergißt, welche Bonds bereits gemacht worden sind.

Die ESC-Taste auf dem Keyboard ist eine weitere Abbruchmöglichkeit. Diese Taste ist bei außergewöhnlichen Ereignissen, wie zum Beispiel einem Abfall des Vakuums, was den sofortigen Stop des Programms und der Tischbewegung erfordert, zu betätigen. Das Programm startet vollständig von neuem. Die Geometrie muß erneut eingegeben werden und es muß neu initialisiert werden. Wurde die Kontrolleinheit des x - y -Tisches nicht ausgeschaltet, ist es nicht notwendig, den Tisch erneut zu kalibrieren.

Des weitern gibt es einen NOT-AUS-Schalter, der eine sofortige Netzunterbrechung der Kontrolleinheit bewirkt. Nach Betätigen dieses Schalters stoppt das Programm ebenfalls augenblicklich. Nun muß die komplette Anlage von neuem gestartet werden.

6.5 Das automatische Bonden

Für die Überwachung des automatischen Bondens, wurde, wie in Abbildung 6.5 zu sehen, eine Video-Anlage installiert. Es folgt eine detaillierte Arbeitsanweisung für das automatische Bonden.

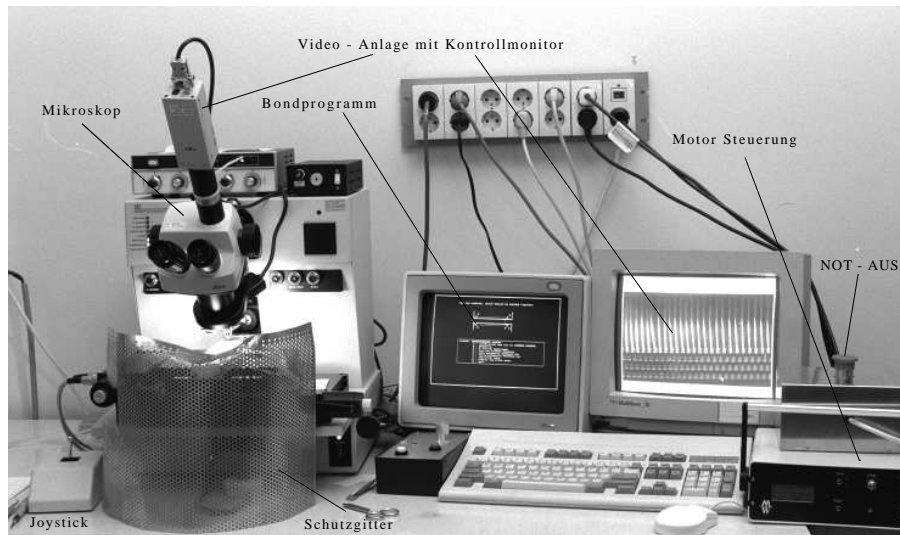


Abbildung 6.5: Der automatische Bonder. Das Bondprogramm bondet nach einem Initialisierungsschema automatisch. Die Überwachung und Einstellung der Parameter des Bonders obliegt dem Benutzer.

1. Einschalten der gesamten Anlage: Rechner, Videoüberwachung, Kontrolleinheit des x - y -Tisches und Bonder. Nach dem Einschalten des Bonders muß kontrolliert werden, ob der Bonddraht richtig eingelegt ist. Nach dem Booten des Rechners wird durch die Eingabe **bond** das Bondprogramm aufgerufen. Der x - y -Tisch ist nach jedem Einschalten der Kontrolleinheit zu kalibrieren, dieses sollte aus Sicherheitsgründen jedoch ohne aufgelegten Bondjig erfolgen.
2. Ein fertig geklebtes und ausgehärtetes Halbmodul auf den Bondjig auflegen. Um am Ende des Moduls einen Griff zu bekommen, wird zwischen die R ϕ - und die RZ-Seite vorsichtig ein Stück Karton geschoben. Die Back Plane der Detektoren sind, ganz im Gegensatz zu der sensitiven Seite der Detektoren, mechanisch strapazierbar, so daß eine nachhaltige Beschädigung der Detektoren ausgeschlossen ist. Als zweiter Griff dient das Hybrid, wobei weder die Verstärkerchips, noch die schon vorhandenen Bonddrähte berührt werden dürfen.
3. Den mit einem Halbmodul bestückten Bondjig auf den x - y -Tisch auflegen und mit Vakuum festsaugen. Es empfiehlt sich, den Tisch soweit unter dem

- Bondwerkzeug herauszufahren, daß der Jig nicht unter dem Bondwerkzeug durchzuschieben ist.
4. Einstellen der richtigen Parameter des Bonders. Diese Einstellungen sind Erfahrungswerte aus Tests und von bereits gebondeten Halbmodulen, die in einem Laborbuch für den Bonder festgehalten sind.
 5. Auswahl des gewünschten Bondvorganges unter Programmpunkt 2: Geometrie.
 6. Initialisierung durch die vier äußersten Bond Pads wie in Abbildung 6.6 zu sehen ist. Nützlich ist die Benutzung des an der rechten Seite des Bonders angebrachten Bond–Hebels, ohne diesen ganz durchzudrücken, da sonst ein unerwünschter Bondimpuls ausgelöst wird. So kann das Bondwerkzeug leicht auf das zu initialisierende Bond Pad aufgelegt und die Position des x - y -Tisches kontrolliert werden. Das Initialisieren bedarf einiger Übung. Es

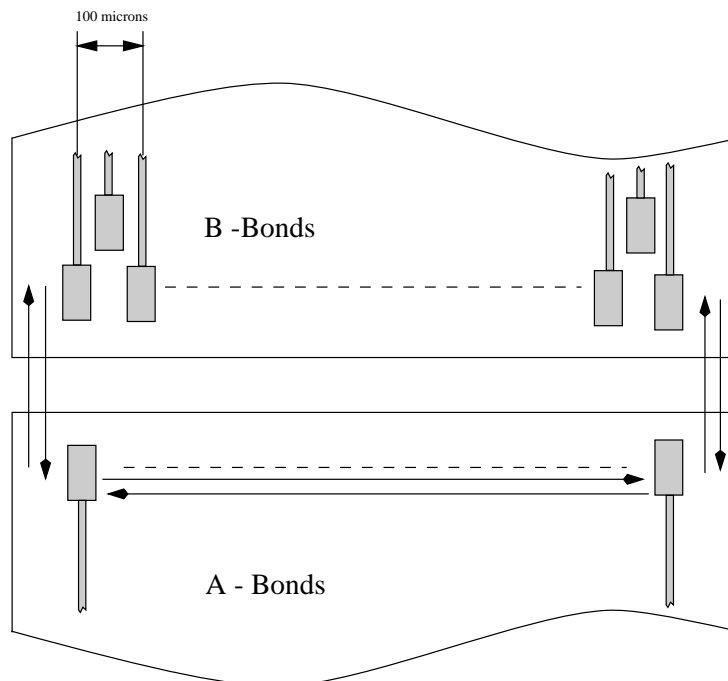


Abbildung 6.6: Das Initialisierungsschema der Bond Pads. Es wird immer mit einem zweiten Bond, einem B-Bond begonnen. Nach der Initialisierung des dazugehörigen A-Bonds, muß dem Programm mitgeteilt werden, ob links oder rechts begonnen wurde. Danach fährt der Tisch automatisch zur theoretischen Position des nächsten A-Bonds und nach dessen endgültigen Initialisierung, zum letzten B-Bond.

ist aufgrund der sehr engen Geometrie leicht möglich, eine Fehlinitialisierungen zu erhalten. Das liegt zum Teil an der Tatsache, daß nicht immer genau

in der Mitte der anvisierten Bond Pads zu initialisieren ist, sondern etwas mehr links oder rechts damit genau positionierte Bonds entstehen. Ferner muß sich der Benutzer erst an den Blick durch das Mikroskop gewöhnen, da es schräg zur Oberfläche des Moduls und dem dazu senkrecht stehendem Bondwerkzeug steht.

7. Automatisches Bonden. Nun kann mit dem automatischem Bonden begonnen werden. Die ersten halbautomatischen Bonds dienen zur Kontrolle sämtlicher Parameter insbesondere der Loop Höhe und der Bondimpuls-Parameter. Danach kontrolliert man den Bondvorgang nur mit Hilfe des Video-Kontrollmonitors und gelegentlichen Blicken durch das Mikroskop. Bei Problemen während des Bondens, wie zum Beispiel bei einem Abriß des Drahtes, muß eingegriffen werden. Die Bondimpuls-Parameter, vor allem die Parameter für die Bondenergie, müssen gelegentlich nachjustiert werden. Beim automatischen Bonden werden im durchschnittlich 3.6 Sekunden pro Bond benötigt.

In den Abbildungen 6.7, 6.8 und 6.9 sind drei Beispiele der wichtigsten Bondgeometrien gezeigt.

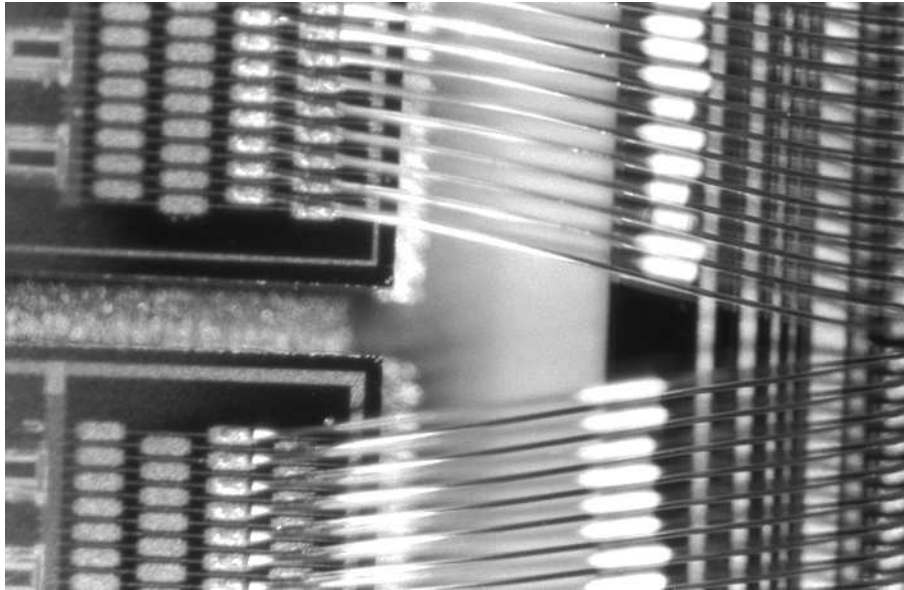


Abbildung 6.7: *Automatisch hergestellte zweilagige Bonds unter einem Winkel an den Chipgrenzen mit kleinem Höhenunterschied.*

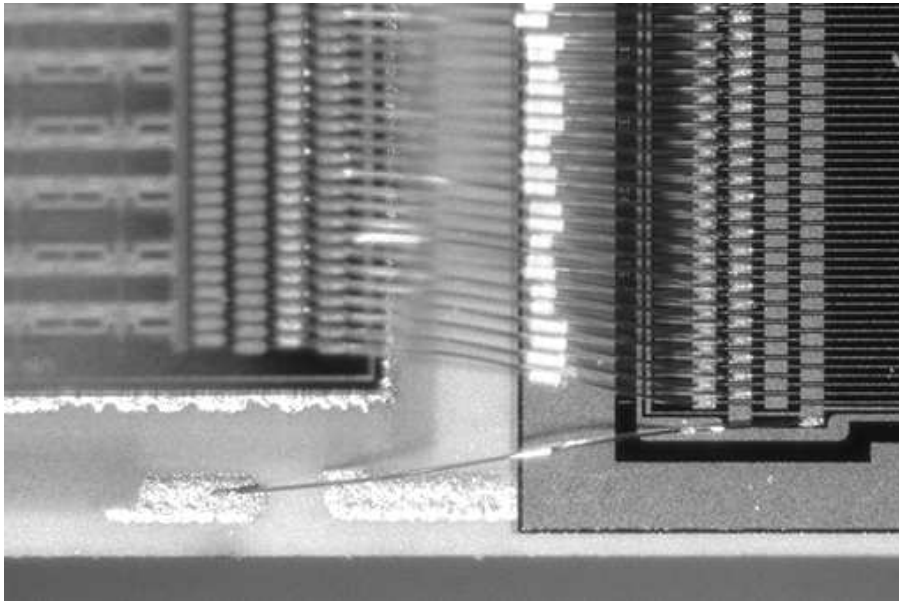


Abbildung 6.8: *Bond eines Detektors an den ersten Chip. Beim manuellen Bonden der Bias Line muß mit einem größerem Höhenunterschied gebondet werden.*

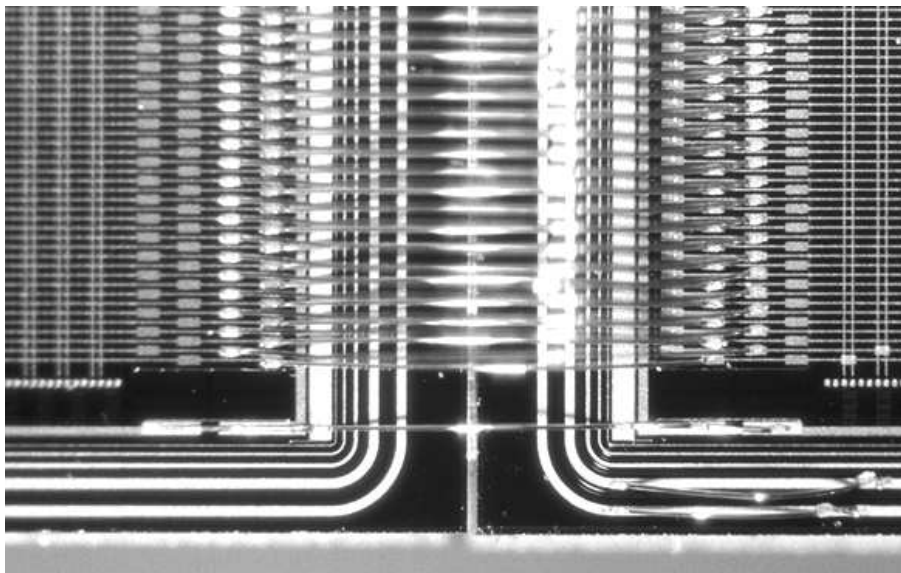


Abbildung 6.9: *Das Detektorbonden. Der Biasbond ist vorne zu sehen. Er wird in Stich Bond-Technik ausgeführt: Es werden mehrere Bond Pads mit einem Aluminiumdraht verbunden, ohne daß der Draht nach Fertigstellung des Bonds abgerissen wird. Zwei Probebonds sind auf dem rechten Detektor zu erkennen.*

Kapitel 7

Die Auslesetests der fertigen Halbmodule

Die fertigen Halbmodule werden speziellen Funktionstüchtigkeitstests unterzogen, um die Anzahl der defekten Streifen festzustellen.

7.1 Der Ausleseplatz

Die Module werden in einem lichtdichten Aluminiumschrank ausgelesen. Dabei wird das Hybrid mit einem Flachbandkabel aus Kapton an eine Repeaterkarte angeschlossen. Die Repeaterkarte liefert, neben den benötigten Versorgungsspannungen und -ströme, die zur Steuerung der Auslesechips notwendigen digitalen TTL-Signale. Ein Differenzverstärker empfängt die analogen Ausgangssignale der Auslesechips und gibt diese verstärkt an ein VME-System weiter. Das VME-System digitalisiert diese Signale, liefert mit Hilfe einer Treiberkarte die notwendigen Steuersignale und wird seinerseits von einem Macintosh Performa 600 gesteuert, der auch die weitere Datenverarbeitung übernimmt. Das Blockschaltbild der Auslese ist in Abbildung 7.1 zu finden. Genaue Details der gesamten Ausleseanordnung und Programme werden in [8] und [11] aufgeführt.

7.2 Der Am^{241} -Test

Mit dem Am^{241} -Test kann direkt ein Pulshöhenspektrum erstellt werden und damit eine Energieeichung erfolgen. Ameritium zerfällt in Neptunium unter Aussendung von α -Teilchen welche unerwünscht sind und ausgeblendet werden. Die Halbwertszeit für diesen Zerfall beträgt 458 Jahre, lange genug, um die Rate in der Testreihe als konstant anzunehmen. Der aus diesem Zerfall hervorgehende angeregte Kern des Np^{237} geht unter Aussendung eines oder mehrer Photonen in seinen Grundzustand über. Das Gamma-Spektrum zeigt, neben vielen

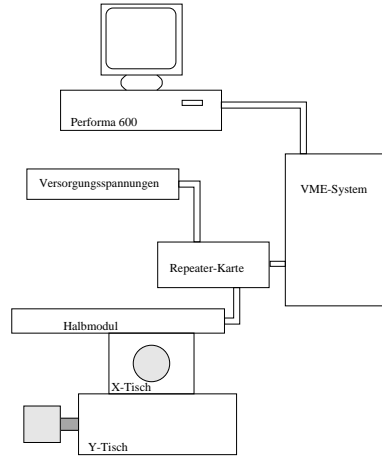


Abbildung 7.1: Das Auslesesystem der Halbmodule. Die Repeaterkarte liefert die benötigten Versorgungsspannungen und –ströme und die notwendigen digitalen Steuersignale. Ein Differenzverstärker empfängt die analogen Ausgangssignale der Auslesechips und gibt diese verstärkt an ein VME-System weiter. Das VME-System digitalisiert diese Signale und wird seinerseits von einem Macintosh Performa 600 gesteuert. Der x-y-Tisch wird nur beim Laser Test benutzt.

anderen, eine dominante Linie bei 59.56keV. Diese Linie kann sowohl zur Energieeichung als auch zur Berechnung von s/n, dem Signal-zu-Rauschen-Verhältnis, herangezogen werden. Da die Energiedeposition eines MIPs in einem 280 μ m dickem Siliziumdetektor bei 90keV liegt testet man mit Am^{241} den Detektor in Hinblick auf seine Sensitivität auf MIPs. Für die Bestimmung des Signal-zu-Rauschen-Verhältnis eines MIPs ist daher der berechnete Wert des Am^{241} -Test mit $\frac{90}{60} = 1.5$ zu multiplizieren. Die Effektivität für einen Photoeffekt in Silizium bei einer Energie von 60keV liegt bei nur bei 1%. Für den Comptoneffekt ist die Effektivität etwas höher, jedoch liegt die Comptonkante für Photonen von 60keV bei 11keV, kann also nicht sauber vom Rauschen getrennt werden und erhöht dadurch das Rauschen scheinbar.

Für die erzeugte Ladung gilt:

$$Q = Ne = \frac{59.56keV}{3.6eV} \approx 16000e \quad (7.1)$$

Nach dem Digitalisieren der analogen Streifensignale und dem Zusammenfassen zu Clustern, den beteiligten Streifen eines Teilchendurchganges, werden die ADC-Counts in einem Histogramm nach ihrer Höhe sortiert. Da die Energie der Quelle bekannt ist, ist aus dem daraus resultierendem Pulshöhenspektrum (Abbildung 7.2) eine Energieeichung des Auslesesystems und der Halbmodule möglich.

Das Pulshöhenspektrum weist eine Besonderheit auf der RZ-Seite auf. Während der Peak auf der $R\Phi$ -Seite unabhängig von der Position der Quelle ist, ist

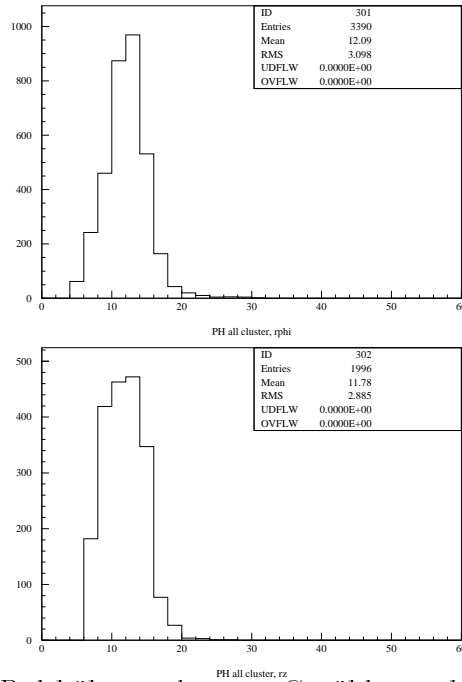


Abbildung 7.2: Das Pulshöhenspektrum. Gezählt werden die ADC-Counts. Der Peak ist auf der RZ-Seite wesentlich breiter, als auf der R Φ -Seite. Dieser Unterschied wird mit einem unerwünschten Ladungsverlust auf der RZ-Seite erklärt.

er auf der RZ-Seite abhängig von der Art des bestrahlten Detektortyps. Befindet sich die Quelle direkt über dem RZ-1280 Detektor, so ist kein wesentlicher Unterschied zwischen RZ- und R Φ -Seite zu erkennen. Ist die Quelle über einem RZ-320 Detektor positioniert, so wird der Peak bedeutend breiter. Bei der Bestrahlung eines RZ-640 Detektors, tritt dieser Effekt ebenfalls, aber nicht so deutlich, auf. Die Verbreiterung des Peaks wird mit einem unerwünschten Ladungsverlust der RZ-Seite erklärt. Aus der sogenannten Hitmap (Abbildung 7.3), einem Histogramm, in dem nur die Zahl der Treffer des einzelnen Streifens gezählt wird, läßt sich die Zahl der defekten Streifen ermitteln, wobei dem Test eine genügend große Anzahl von Ereignissen zugrunde liegen sollte, um statistische Schwankungen auszugleichen. Durch die verschiedenen Detektordesigns auf der RZ-Seite und den daraus resultierenden typischen Abbildungen der Hitmap, ist zu erkennen, über welchem Detektor die Quelle gestanden hat.

Mit Hilfe des Pulshöhenspektrums und der Hitmap kann man jeden Streifen beurteilen und bestimmen, ob dieser zur Datennahme herangezogen wird oder nicht. Die Streifen, die nicht zur Datennahme herangezogen werden, zeigen unterschiedliches, auffälliges Verhalten. Dabei werden feste Grenzwerte für die Beurteilung benutzt:

- *Noisy Strips*. Verrauschte Streifen zeigen sich durch einen Rausch-Wert von über 4000 e^- .
- *Dead Strips*. Bei diesen liegt das Noise unterhalb 400 e^- , oder sie reagieren

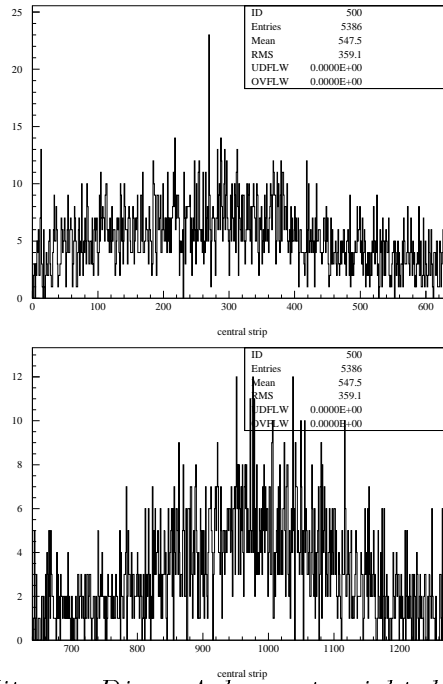


Abbildung 7.3: Die Hitmap. Die x -Achse entspricht der Streifennummer, die y -Achse entspricht der Anzahl der Treffer der Streifen.

nicht auf das Back Plane Pulsing¹. Streifen mit negativen Pedestals werden ebenfalls als dead markiert, da keine Auslesemöglichkeit dieser Streifen besteht.

- *Strange Pedestals*. Damit werden Streifen markiert, bei denen das Pedestal um mehr als 150000 e^- vom Durchschnittswert abweicht.
- *Talking Strips*. Es gibt Streifen, die zufällig ein Signal geben, obwohl kein Treffer erfolgt ist².
- *Dubious Strips* werden als solche markiert, wenn die absolute Verstärkung negativ ist, oder die relative Verstärkung nicht im Bereich zwischen 0.7 und 1.3 liegt³.

Eine detaillierte Beschreibung dieser Testverfahren findet man in [11].

7.3 Der Laser Test

Mit dem Laser Test, sind die funktionstüchtigen Streifen direkt zu bestimmen und es kann eine Pulshöhenverteilung über zwei Streifen angefertigt werden. Das

¹Beim Back Plane Pulsing wird auf die Back Plane ein Spannungsimpuls eingekoppelt. Dadurch sollten alle Streifen ein erhöhtes Signal aufweisen.

²Dieser Fehler kann einfach durch ein Am^{241} -Test ohne Quelle gefunden werden.

³Die Verstärkung wird in der Regel mit Testpulsen bestimmt. Dabei werden bekannte Spannungsimpulse an die Eingängen der Verstärker eingekoppelt.

Halbmodul liegt hierbei auf einem x - y -Tisch und kann automatisch unter dem Laser bewegt werden. Eine Beschreibung der genauen Auslesemethode ist in [9] und [11] zu finden.

Ist die Schrittweite bedeutend kleiner als der Streifenpitch gewählt, so erhält man direkt eine Pulshöhenverteilung zweier benachbarter Streifen (Abbildung 7.4). Aus Zeitgründen ist es allerdings unmöglich auf diese Weise alle Streifen jedes Detektors auszumessen. Auch gibt es Probleme im Bereich der Aluminiumbeschichtungen der Auslesestreifen, da Aluminium das Laserlicht zum Teil reflektiert und somit das Meßergebnis verfälscht.

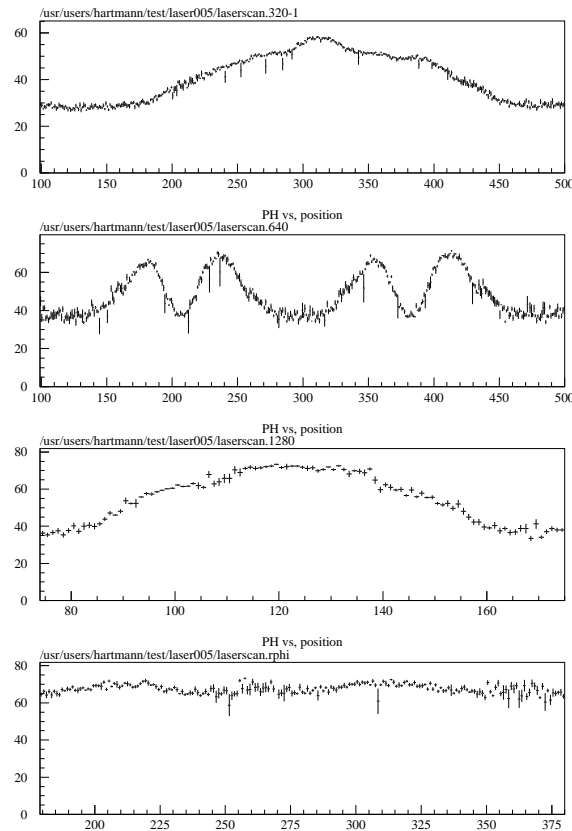


Abbildung 7.4: Es wurde die Pulshöhe über dem Ort aufgetragen. In den ersten beiden Diagrammen war der untersuchte Bereich identisch. Deutlich ist hier der unterschiedliche Auslesepitch von RZ-320 und RZ-640 zu erkennen. In dem Diagramm des RZ-1280 wurde über den Bereich eines Auslesestreifens gefahren, während in dem Diagramm der $R\Phi$ -Seite über zwei Auslesestreifen gescannt wurde.

Des weitern kann in großen Schritten über den gesamten Detektor gefahren und dabei die Streifen auslesen werden. Ist die Schrittweite so gewählt, daß jeder Streifen wenigsten einmal vom Laser getroffen wird, muß jeder Streifen ansprechen.

7.4 Die Ladungsverteilung

Da der Vertexdetektor zur räumlichen Rekonstruktion von Teilchenspuren genutzt werden soll, ist man bestrebt, eine maximale räumliche Auflösung zu erhalten.

Die Ladungsverteilung auf die Streifen erfolgt nicht linear zum Ort, an dem die Ladungswolke entstanden ist. Eine bessere Linearisierung wird erreicht, wenn sich zwischen zwei Auslestreifen ein zusätzlicher, nicht ausgelesener Diodenstreifen befindet.

Um letztendlich den Ort so genau wie möglich zu bestimmen ordnet, man den Pulshöhen der ausgelesenen Streifen einen Ort zu, der der wahren Position am nächsten kommt. Wird die Pulshöhe des Streifens eines Clusters mit maximaler Pulshöhe durch die Pulshöhe des gesamten Clusters dividiert, und sortiert man dieses Ergebnis in ein Histogramm, erhält man einen halben ETA-Plot. Jedoch ist einsichtig, daß dieses Ergebnis um den Auslestreifen oder den Mittelstreifen gespiegelt werden kann und somit ein ganzer ETA-Plot bestimmt ist.

Bei der Bestrahlung mit einer Am^{241} -Quelle kann von einer Gleichverteilung der Treffer ausgegangen werden, und das Histogramm des ETA-Plots sollte bei genügend großer Statistik demnach in dem Bereich 0.5 bis 1 in jedem Kanal genauso viele Einträge haben. Die Histogramme in Abbildung 7.5 weisen jedoch einen Abfall auf, der von den Detektoren verursacht sein muß. Aus diesem Abfall kann auf die Ladungsverteilung zurückgeschlossen werden. Der bedeutend größere Abfall auf der RZ-Seite wird durch den Ladungsverlust erklärt.

Mit Hilfe des ETA-Plots und der Pulshöhen kann der Durchstoßpunkt des Treffers berechnet werden. [9] Dadurch kann eine Ortsauflösung erreicht werden, die bedeutend kleiner ist als der Streifenabstand. Letztendlich wird eine Ortsauflösung von $6\mu\text{m}$ innerhalb des Vertexdetektors und $8\mu\text{m}$ innerhalb des gesamten DELPHI Detektors erreicht.

7.5 Der Ladungsverlust

Mit Hilfe des Lasertests kann der Ladungsverlust berechnet werden, auch wenn nur sehr große Schrittweiten gewählt wurden. Da der Ort des Treffers von einzelnen Ereignissen des Laser Tests nicht genau zu bestimmen ist⁴, können zur Bestimmung des Ladungsverlustes nur Mittelwerte herangezogen werden. Man geht von folgender Annahme aus: Findet ein Treffer genau auf einem Auslestreifen statt, so gilt $\frac{Ph_{maxStrip}}{Ph_{gesCluster}} = 1.0$. Findet dagegen der Treffer genau in der Mitte zweier Auslestreifen statt, also genau auf einem Zwischenstreifen, sollte ohne Ladungsverlust gelten: $\frac{Ph_{maxStrip}}{Ph_{gesCluster}} = 0.5$. Liegt der Treffer irgendwo zwischen den beiden, muß das Verhältnis $\frac{Ph_{maxStrip}}{Ph_{gesCluster}}$ auch zwischen 1 und 0.5 liegen. Der

⁴Das Halbmodul wird nur grob ausgerichtet und man fährt mit großen Schrittweiten.

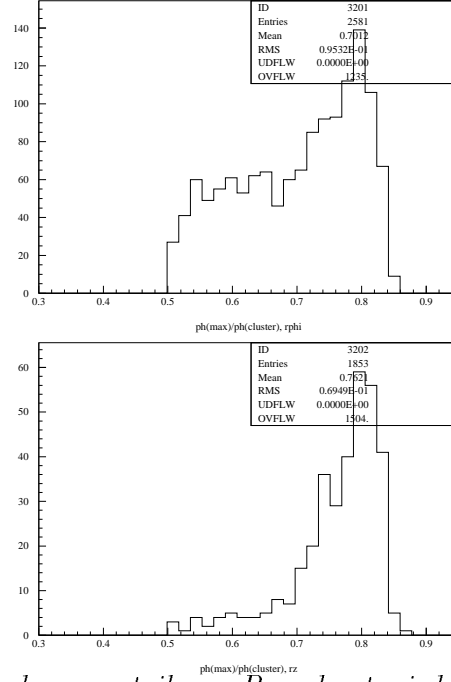


Abbildung 7.5: Die Ladungsverteilung. Berechnet wird die Pulshöhe des maximalen Streifens geteilt durch die Pulshöhe des gesamten Clusters. Das Ergebnis wird in ein Histogramm einsortiert. Da die Treffer der Strahlung gleichverteilt sind, sollte man einen waagerechten Verlauf im Histogramm erhalten. Aus dem Abfall der Kurve kann auf die Ladungsverteilung geschlossen werden. Der enorme Abfall auf der RZ-Seite wird durch den Ladungsverlust erklärt. Die fehlenden Einträge im Bereich zwischen 0.85 und 1.0 sind durch einen Cut bedingt.

Mittelwert berechnet sich somit bei Gleichverteilung zu:

$$\left\langle \frac{Ph_{maxStrip}}{Ph_{gesCluster}} \right\rangle = \frac{1 + 0.5}{2} = 0.75 \quad (7.2)$$

Die nichtlineare Verteilung der Pulshöhe über dem Raum zwischen zwei Streifen wird hier nicht berücksichtigt, da sich Fehler durch die Bildung von Mittelwerten kürzen. Es gibt dabei theoretisch drei Punkte, die mit einer linearen räumlichen Ortsbestimmung genau übereinstimmen sollten: Treffer genau auf Auslesestreifen, Treffer genau auf Zwischenstreifen und Treffer genau in der Mitte zwischen Auslesestreifen und Zwischenstreifen. Die Pulshöhenverteilung zeigt nun, daß die tatsächliche Kurve in dem einen Bereich über und im anderen Bereich unter dem linearen Fit liegt. Es kann also im Mittel von einer linearen Verteilung ausgegangen werden.

Bei der Berechnung bei den $R\phi$ -Detektoren zeigt sich dieses Verhalten: $\left\langle \frac{Ph_{maxStrip}}{Ph_{gesCluster}} \right\rangle \approx 0.75$. Bei der Berechnung für die RZ-Detektoren mit großem Auslesepitch (RZ-320, RZ-640) ergibt sich: $\left\langle \frac{Ph_{maxStrip}}{Ph_{gesCluster}} \right\rangle \approx 0.69$, was sich nur auf einen Ladungsverlust im Bereich der Zwischenstreifen zurückführen läßt.

$$\text{Aus } \frac{1 + Q_v}{2} = 0.69 \quad \text{folgt} \quad Q_v = 0.9 * 2 - 1 = 0.38 \quad (7.3)$$

Berechnet man dies prozentual, erhält man einen Ladungsverlust von circa 25%.

Die auf den Zwischenstreifen gesammelte Ladung wird scheinbar nicht vollständig auf die benachbarten Auslesestreifen und somit auf die Verstärkereingänge übertragen. Eine weiterreichende Erklärung für dieses Phänomen liegt zur Zeit nicht vor. Eine Möglichkeit wäre ein Designfehler (zum Beispiel eine falsche Dimensionierung der Koppelkapazitäten zwischen den Zwischenstreifen und den Auslesestreifen) oder ein produktionsbedingter Fehler bei der Herstellung der Detektoren.

Kapitel 8

Die Ergebnisse der Halbmodulherstellung

8.1 Die Messungen der Koordinaten der Halbmodule

Die Koordinatenmessungen der Halbmodule wurden mit der Koordinatenmeßmaschine durchgeführt. Das Koordinatensystem vor dem Kleben ist in Kapitel 5 beschrieben. Um die Präzision zu erhöhen, wurde beim Kleben das Koordinatensystem mehrmals neu initialisiert, da sich der Meßfehler der ZEISS-Maschine beim ständigen Fahren in nur eine Richtung für die Ausrichtung des Winkels erhöht. Die Genauigkeit der Koordinatenmeßmaschine hängt ferner stark von der Temperaturänderung im Raum ab (Glasmaßstäbe), weshalb bei Bedarf eine Temperaturkorrektur durchgeführt wird. Die Koordinaten vor dem Kleben wurden jeweils nach dem Ausrichten auf dem Klebejig bestimmt.

Für die Koordinatenmessung nach dem Kleben muß zunächst ein Koordinatensystem definiert werden. Dafür wählt man wieder die Referenzkugelhalterung des Hybrids als Koordinatenursprung, indem man diese als Kreis vermißt. Damit die x -Achse des Koordinatensystems parallel zu den Streifen des Moduls liegt, vermißt man einen Streifen und dreht das Koordinatensystem der Meßmaschine um die z -Achse: Es wird zunächst ein Punkt auf dem ersten Streifen des ersten Detektors und ein Punkt auf dem ersten Streifen des letzten Detektors gemessen. Der Raum wird nun um die z -Achse gedreht, wodurch das Koordinatensystem bestimmt ist, und die Koordinaten der Detektoren aufgenommen werden können. Da man die Koordinaten der Halbmodule auf der RZ- und der R ϕ -Seite getrennt aufnimmt, muß das Koordinatensystem zweimal definiert werden. Der Nullpunkt ist per Definition durch die Referenzkugelhalterung auf beiden Seiten identisch bestimmt. Allerdings stehen die beiden zur Festlegung des Koordinatensystems genutzten Geraden, in keiner weiteren Beziehung zueinander. Über die Genauigkeit der Ausrichtung der R Φ -Seite relativ zur RZ-Seite kann somit keine Aussage

gemacht werden.

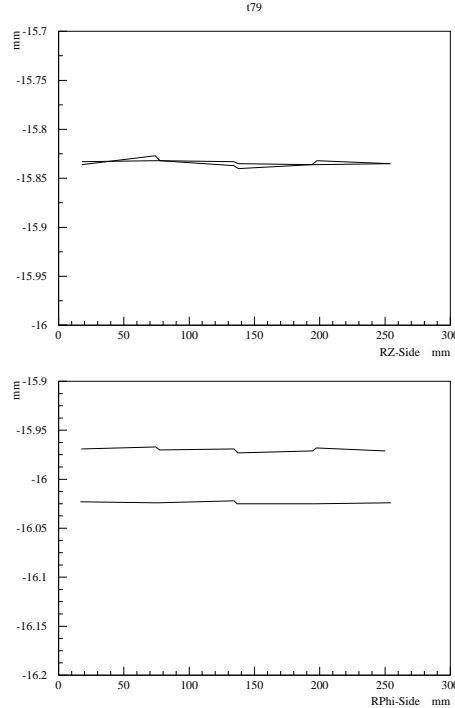


Abbildung 8.1: Die x - y -Koordinaten vor und nach dem Kleben. Deutlich zu erkennen ist ein Offset in Y -Richtung, der auf einem Fehler der Referenzpunktkoordinate auf dem Klebejig beruht.

Bei der Auftragung der x - und y -Koordinaten in Abbildung 8.1, vor und nach dem Kleben, ist ein systematischer Fehler durch den Einsatz des Pick-Up-Systems zu erkennen. Dieser Offset in der y -Koordinate bei der $R\Phi$ -Seite beruht auf einem Fehler in der Referenzpunktkoordinate des Klebejigs. Diese Differenz, die durchaus bis zu $50\mu\text{m}$ betragen kann, ist allerdings ohne große Bedeutung, da dieser Offset leicht per Software korrigiert werden kann. Wichtiger ist die parallele Ausrichtung der einzelnen Detektoren zueinander. Diese Abweichungen betragen nur einige μm über die gesamte Länge des Halbmoduls und liegen in der Regel weit unter der Anforderung von $\pm 20\mu\text{m}$.

In den Histogrammen in Abbildung 8.2 ist zu erkennen, daß bei allen Modulen die RZ-Seiten die gestellten Anforderungen erfüllen. Da bei der $R\Phi$ -Seite der y -Offset nicht korrigiert wurde, liegen einige Detektoren außerhalb der Spezifikation. Die verschiedenen Korrekturen der Referenzpunktkoordinaten des Klebejigs sind als Peaks im Histogramm zu erkennen. Daß diese Module trotzdem benutzt werden können, ist in den Histogrammen in Abbildung 8.3, in denen die Winkelabweichungen eingetragen sind, zu erkennen. Die Winkelabweichungen sollten so gering wie möglich sein. Sämtliche Detektoren liegen in diesem Histogramm

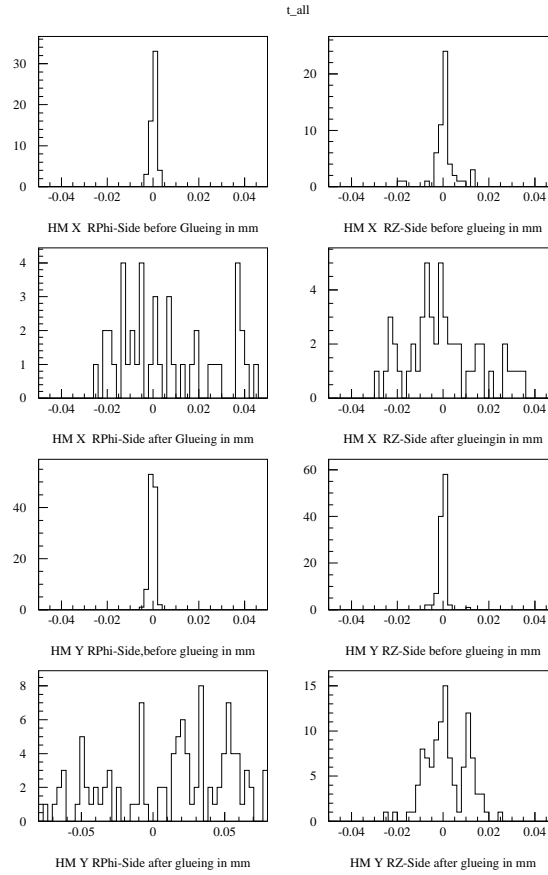


Abbildung 8.2: Die Koordinaten der Halbmodule vor und nach dem Kleben. In diesen Histogrammen wurden die Daten aller hergestellten Module eingetragen. Es wurden jeweils die Abweichungen vom Sollwert getrennt für die x - und für die y -Koordinate sowohl vor dem Kleben als auch nach dem Kleben aufgetragen. Der y -Offset auf der $R\Phi$ -Seite wurde nicht abgezogen.

in einem Bereich kleiner als 0.1mrad . Dies läßt den Schluß zu, daß das Pickup-System die Winkel nicht allzu stark ändert. Aus den Plots wird deutlich, daß die gewünschte Genauigkeit sowohl in den Absolutkoordinaten als auch in den Winkeln problemlos erreicht wurde.

Eines der Halbmodule hatte einen sichtbaren Versatz zwischen RZ- und $R\Phi$ -Seite. Dieser Versatz wurde an den Kanten der Detektoren nachgemessen und beträgt etwa 0.4mm . Da das Modul funktionstüchtig ist, kann es trotzdem verwendet werden. Der Versatz stört beim Einbau des Moduls in den Outer Layer nicht, wenn es auf den größeren Radius eingebaut wird. Die nominelle Überlappung ist größer als 1mm , so daß immer noch eine ausreichende Überlappung zwischen den Modulen vorhanden ist, und die relative Lage bestimmt werden kann.

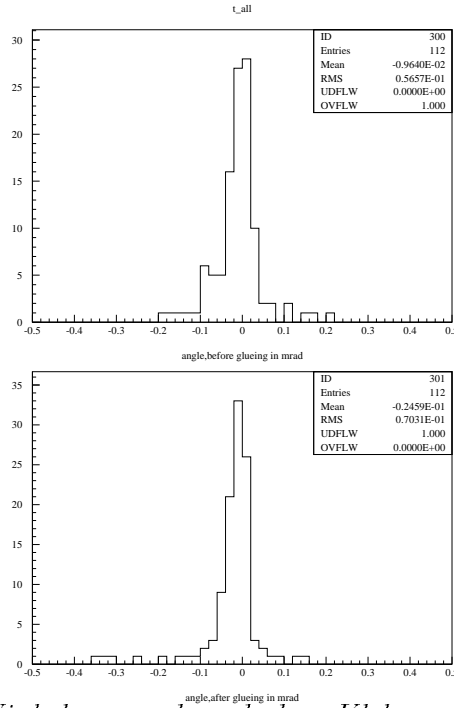


Abbildung 8.3: Die Winkel vor und nach dem Kleben. Aufgetragen wurde jeweils der Winkel der einzelnen Detektoren relativ zur Koordinatenachse. Hierbei wurde nicht zwischen der $R\Phi$ -Seite und der RZ -Seite unterschieden.

8.2 Die Creeping Modules

Nach dem Kleben der Halbmodule wurde nach einiger Zeit festgestellt, daß sich einige der Module langsam verformen. Da dieser Effekt vor allem bei den in England produzierten Halbmodulen auftrat, wurde er Creeping Module getauft. Auf dieses Verhalten wurden daraufhin einige Halbmodule in Karlsruhe geprüft.

Creeping Modules verformen sich langsam nach dem Kleben. Bei einem Creeping Module, das so in die Halbmodulbox gelegt wurde, daß der letzte Detektor nicht aufliegen kann, in der Regel mit der $R\Phi$ -Seite nach oben, bewegt sich der letzte Detektoren langsam nach unten. Dieser Vorgang kann mehrere Tage dauern, bevor er zum Stillstand kommt. Wird dieses Modul anschließend erneut umgedreht, so formt sich dieses Modul zurück. Die Bewegung endet, wenn der letzte Detektor in der Halbmodulbox aufliegt.

Bei der Untersuchung dieses Phänomens wurden die Höhen der Detektoroberflächen relativ zur Höhe der Halbmodulbox gemessen. Dabei wurden jeweils zwei Messungen durchgeführt, einmal auf der RZ -Seite und einmal auf der $R\Phi$ -Seite. Das Modul wurde für die Messung kurzzeitig umgedreht, um Gravitationseffekte aus der Messung zu subtrahieren und nur die Eigenbewegung des Moduls zu beobachten. Nach dem Start der Tests wurde zuerst in kurzen Zeitabständen von einigen Stunden gemessen, dann wurden die Zeitabstände der Messungen langsam gesteigert und bis auf 24 Stunden ausgedehnt.

Die Ergebnisse der Messungen zeigten eine Verlangsamung der Bewegung mit

der Zeit, bis die Bewegung letztendlich zum Stillstand kam.

Ein Creeping Module wurde näher untersucht. Dabei war festzustellen, daß die Bewegung nur, wie in Abbildung 8.4 zu sehen ist, zwischen der ersten Klebung und dem Hybrid, stattfindet.

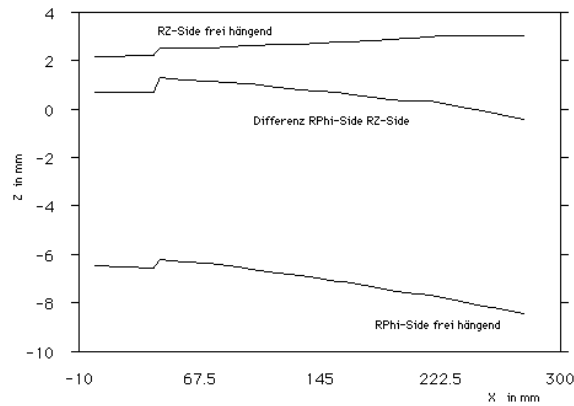


Abbildung 8.4: *Messung des Creeping Module. Durch Subtraktion der beiden Messungen auf der RZ-Seite und der $R\Phi$ -Seite kürzen sich Gravitationseffekte. Man erkennt eine Änderung des Winkels zwischen dem Hybrid und dem ersten Detektor.*

Diese erste Klebung wurde auf dem Klebeijig durchgeführt. Wenn bei der ersten Klebung eine falsche Höhe oder ein inkorrekt Winkel eingestellt war, entstand ein Creeping Module. In Abbildung 8.5 ist die erste Klebung sowohl mit richtiger als auch mit falscher Höhe skizziert. Durch eine falsche Höheneinstellung oder eine fehlerhafte Winkeleinstellung wird nur eine kleine Klebefläche hergestellt, die auf dem Gold des Hybrids wie eine Wippe wirkt. Bereits ein geringfügiges Fließen des Klebers bewirkt über den circa 240mm langen Hebelarm des Moduls eine beträchtliche Verformung, die am Ende des Moduls sogar mit bloßem Auge zu erkennen ist.

Solange die Klebung stabil und der elektrische Kontakt zur Back Plane gesichert ist, haben solche Module keine negativen Auswirkungen auf den Bau des Vertexdetektors. Unter den in Karlsruhe untersuchten Modulen wurde nur ein Creeping Module gefunden.

8.3 Die Zugfestigkeit eines Bondes

Vor dem Bonden der Halbmodule wurden Dummy-Detektoren gebondet, um verschiedene Parametersätze des Bonders zu überprüfen. Für die Beurteilung der Qualität der Bonds gibt es, neben einer optischen Begutachtung, zwei weitere Prüfverfahren, bei denen die Zugfestigkeit der Bonds überprüft wird. Bei einem

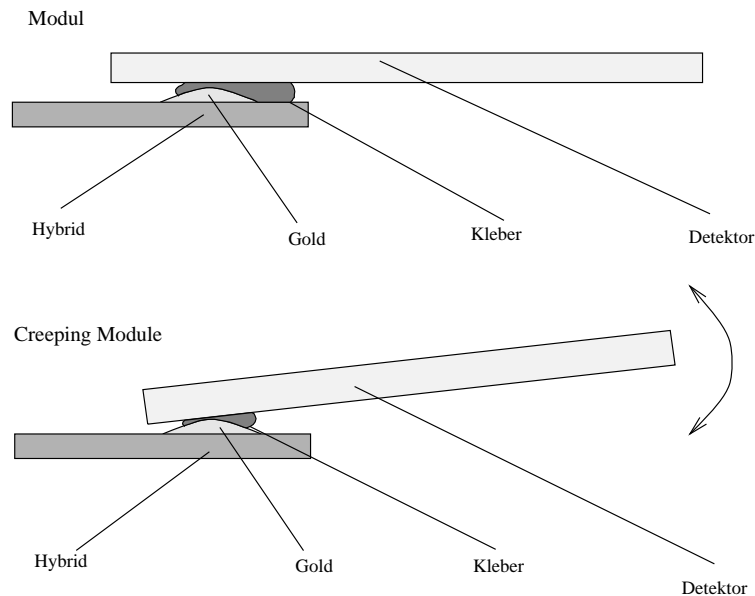


Abbildung 8.5: Skizze der Verklebung von Hybrid und erstem Detektor. Durch eine falsch eingestellte Höhe oder Winkel, entsteht eine verkleinerte Klebefläche, die auf dem Gold des Hybrides wie eine Wippe wirken kann. Ein geringes Fließen des Klebers bewirkt eine Veränderung des Winkels. Man erhält ein sogenanntes *Creeping Module*.

der Tests wird dabei an einem Bond mit einer Kraft von 2g gezogen. Hält der Bond, so hat er die notwendige Festigkeit, die Schweißverbindung ist gut, und damit ist neben einer guten mechanischen Festigkeit auch ein guter elektrischer Kontakt gewährleistet. Dieser Test kann auch an anschließend benutzten Objekten durchgeführt werden. Bei der Vielzahl der Bonds und der sehr engen Geometrie ist die Durchführung dieses Tests an jeder Drahtverbindung unmöglich.

Deshalb wurde ein Test mit Dummy-Detektoren¹ durchgeführt, bei dem die maximale Zugfestigkeit eines Bondes überprüft wird, wobei so stark gezogen wird, daß die Bondverbindung reißt. Der Bond sollte direkt am Ende des ersten Bondfußes reißen, denn hier ist die natürliche Schwachstelle eines Bondes. Nach einigen Versuchen wurde ein akzeptabler Parametersatz für den Bonder gefunden, auf den die Produktion abgestimmt wurde.

Bei der Verwendung eines 25µm starken Aluminiumdrahtes ist zu erwarten, daß die Drahtverbindung bei ungefähr 6g reißt. Im Histogramm in Abbildung 8.6 ist zu sehen, daß nur ein Bond unterhalb von 2g liegt und somit durch den erstgenannten Test fallen würde. Der Durchschnitt liegt bei 6.7g und entspricht damit sehr gut den Anforderungen. Die beiden Peaks, einer bei 6g, der andere bei 8g, entsprechen den beiden Lagen, mit denen gebondet wurde. Da die Bonds

¹Dummy-Detektoren bestehen nur aus einem Siliziumsubstrat mit aufgebracht Aluminiumstreifen.

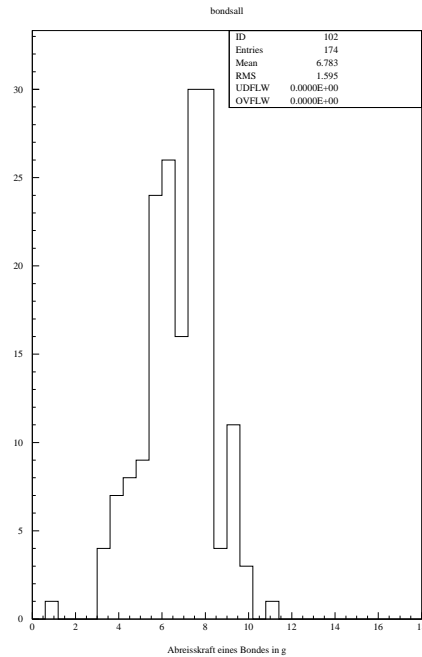


Abbildung 8.6: Die maximale Zugfestigkeit eines Bondes.

der zweiten Lage eine viel größere Loophöhe besitzen, sind diese Bonds in der Regel nicht so stabil wie die Bonds der ersten Lage. Durch diese Tests wurde sichergestellt, daß die Halbmodule zuverlässig gebondet werden können.

8.4 Die Mount Fujis

Bei der Auslese der Halbmodule wurde hin und wieder beobachtet, daß eine große Anzahl benachbarter Kanäle (bis zu 40 einzelne Streifen) als defekt klassifiziert wurde. Die Pedestals dieser Streifen wuchsen von beiden Seiten des defekten Bereiches bis in den Überlauf an. In der Mitte dieses Bereiches befand sich ein Kanal, mit stark erniedrigtem Pedestal. Der Verlauf der Pedestals ähnelte somit einem Vulkankrater. Daher wurde dieser Effekt Mount Fuji genannt. Bei diesen Detektormodulen wurde ferner ein erhöhter Strom gemessen.

Wurde der Streifen mit dem niedrigen Pedestal vom Verstärker durch Entfernen des Bonddrahtes oder Durchtrennen des Auslesestreifens abgekoppelt, arbeitete das Modul normal, weder die Ströme noch die Pedestals zeigten außergewöhnliche Meßwerte.

Die Back Plane-Ströme und die Bias-Ströme, die bei funktionstüchtigen Modulen ungefähr identisch sind, wurden getrennt für die RZ-Seite und die RΦ-Seite gemessen. Da nach Kirchhoff die Summe der Ströme immer Null sein muß, muß der Strom, der in die Back Plane hinein fließt und nicht aus der Bias Line

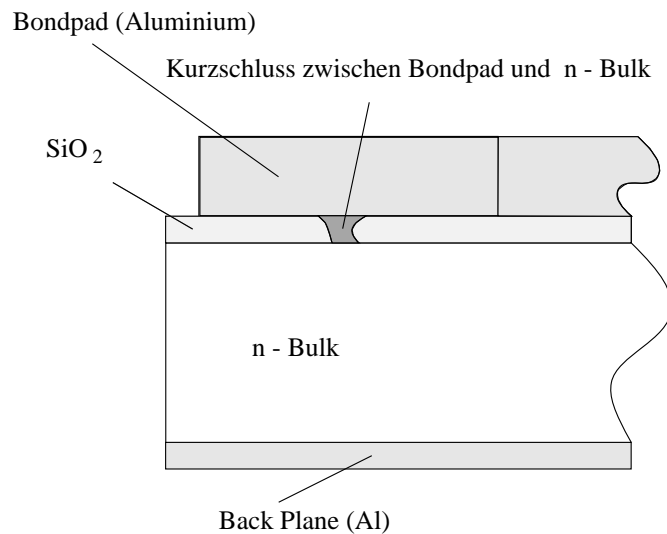


Abbildung 8.7: Skizze eines Mount Fujis. Durch die Zerstörung des Isolators SiO_2 , entstanden beim Bonden, fließt ein großer Strom in den Eingang des Verstärkers. Die Störung wird auf die Nachbarstreifen übertragen, die somit unbrauchbar werden. Wird der Streifen vom Verstärker abgekoppelt, zeigen die Nachbarstreifen normales Verhalten und können verwendet werden.

oder dem Guard Ring herausfließt, über den Auslesestreifen in den Eingang des Verstärkers abfließen. Der Verstärkereingang ist DC-gekoppelt und verträgt nur einen begrenzten Strom. Ist der Strom zu groß, wird der Triplexchip in seiner Arbeitsweise gestört und die Pedestals der Nachbarstreifen steigen an.

Ein solch hoher Strom ist nur für Pin Holes typisch. Jedoch wurde jeder einzelne Detektor auf diese Defekte hin untersucht und die bekannten Pin Holes nicht gebondet, also nicht mit dem Verstärker verbunden. Trotzdem trat diesen Effekt immer wieder auf, weshalb dieser Defekt während der Produktion entstanden sein muß.

Die Vermutung liegt nahe, daß dies beim Bonden geschehen ist, da nur hier einzelne Streifen bearbeitet werden. Beim Bonden wird eine Ultraschallschweißung zwischen Bond Pad und Aluminiumdraht durchgeführt, was für diesen Punkt des Detektors eine beträchtliche Belastung bedeutet. Unter dem Bond Pad dient als Isolator eine nur etwa $1\mu\text{m}$ dünne Schicht aus SiO_2 . Durch die verschiedenen Kristallstrukturen des Oxides und des Bulks steht diese Grenzschicht ohnehin unter mechanischen Spannungen. Ist diese Stelle beim Bonden zusätzlicher Belastung ausgesetzt, so kann es zum Bruch der Oxidschicht kommen, ein Pin Hole ist erzeugt. Dadurch ist eine ohmsche Verbindung zur Back Plane oder zum Diodenstreifen entstanden, was mit einem enormen Anstieg des Stromes verbunden ist. Nach dem Unterbrechen des Streifens oder Entfernen des Bondes kann der Strom nicht mehr in den Verstärker fließen und die Pedestals beeinflusst

en. Somit fehlt zwar dieser Streifen, aber die Nachbarstreifen sind sensitiv und können zur Datennahme herangezogen werden.

Zu Beginn der Herstellung von Halbmodulen traten im Mittel 2–3 Mount Fujis pro Modul auf. Daraufhin wurde der Bondvorgang optimiert und möglichst wenig Ultraschallenergie eingesetzt, wobei die Zuverlässigkeit der Bondverbindung nach wie vor gewährleistet sein mußte. Die Anzahl der Mount Fujis erniedrigte sich daraufhin auf durchschnittlich weniger als ein Mount Fuji pro Modul.

8.5 Die Ergebnisse der Auslesetests

Insgesamt wurden 16 Halbmodule gefertigt und ans CERN geschickt. 13 Halbmodule durchliefen alle Tests erfolgreich und können somit eingebaut werden. Bei manchen Modulen mußten einige Streifen zur besseren Funktionstüchtigkeit vom Verstärker abgekoppelt werden. Dies waren in der Regel Auslestestreifen mit Mount Fujis, auf die im Kapitel 8.4 eingegangen wurde.

Zwei Halbmodule bereiteten Schwierigkeiten bei der Auslese. Beide hatten keine einheitlichen Pedestals über weite Bereiche. Bei einem von diesen beiden war wahrscheinlich der Anschlußstecker zur Repeaterkarte defekt. Leichtes Berühren des Kabels veränderte die Pedestals beträchtlich. Möglicherweise wäre dieses Modul nach einem Steckerwechsel zu verwenden. Im Karlsruher Labor fehlt allerdings die notwendige Ausrüstung um diese Arbeit zu erledigen. Bei dem anderen Modul konnte der Defekt noch nicht eindeutig gefunden werden. Eine mögliche Ursache besteht darin, daß zwei oder drei Mount Fujis dicht nebeneinander liegen und die Triplexchips so stark gestört werden, daß diese über viele Kanäle nicht richtig arbeiten. Durch eine intensive Analyse der Auslese könnten die fehlerhaften Streifen wahrscheinlich gefunden werden.

8.6 Die Messungen der mechanischen Bauteile

Die mechanischen Messungen wurden in der Regel mit der ZEISS-Maschine mit Tastkopf durchgeführt. Bei vielen Teilen traten dabei dieselben Schwierigkeiten beim Einspannen der Teile auf, wie in Kapitel 4.5 beschrieben. Bei manchen Teilen war ein Festspannen ohne ein Verziehen nicht möglich. Solche Teile wurden dann mit Sekundenkleber auf eine Aluminiumplatte aufgeklebt. Sekundenkleber hat neben der schnellen Aushärtung den großen Vorteil, daß er sehr hart wird. Zum einen verhindert die große Härte ein Bewegen innerhalb der Klebung, zum anderen genügt ein kleiner Schlag auf die Klebestellen, um das Teil zu lösen. Für jedes Teil wurde ein Taster montiert, der bei den gegebenen Voraussetzungen eine optimale Antastung ermöglichte.

Alle mechanischen Messungen aufzuzählen und zu beschreiben, würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Deshalb befindet sich hier nur eine kleine, allge-

meine Zusammenfassung der Messungen.

Gemessen wurden sowohl die Ringe für den Closer, den Outer und Inner Layer als auch einige Proberinge, die für Testzwecke zu Beginn der Produktion hergestellt wurden. Die Vermessung der einzelnen Flächen auf den Ringen bestätigte die Präzision der Arbeit unserer Werkstatt. Die Adapterringe mit den vielen verschiedenen Radien und dem Kegel wurden ebenfalls vermessen. Viele Bauteile waren präziser, als es die geforderten Toleranzen vorgaben. Alle gemessenen Objekte der Trägerstrukturen, die zum Einbau kommen, entsprachen den gegebenen Spezifikationen.

Als Beispiel hierfür werden im folgenden die Messungen der Closer Ringe, siehe Abbildung 8.8, dargestellt. Die wichtigsten Daten aller vier Halbringe sind sowohl die Radien als auch die Winkel der Flächen, auf denen die Module aufgeschraubt werden. Dieser Ring zählt zu den einfacheren Teilen der mechanischen

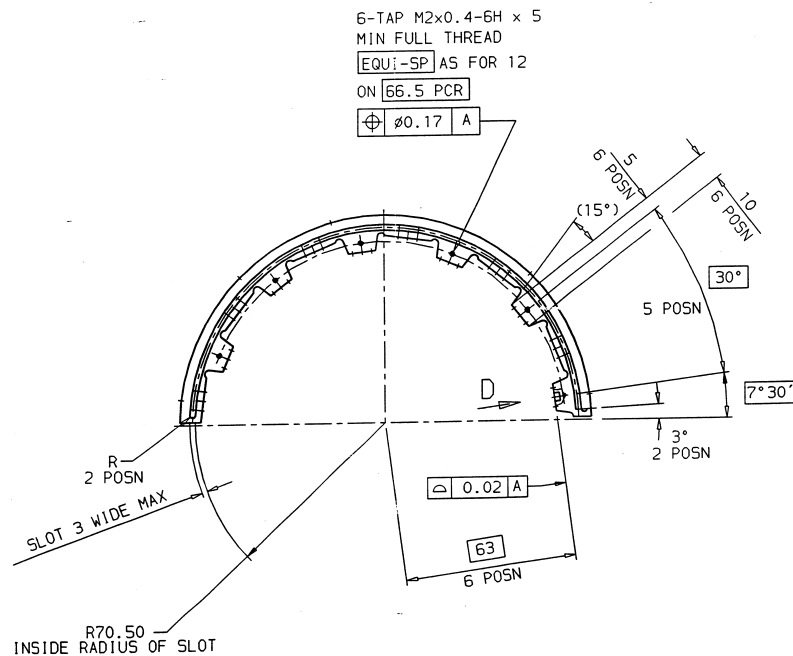


Abbildung 8.8: Ausschnitt aus der Konstruktionszeichnung eines Halbringes des Closer Layers. Da dieses Bild nur ein Teil des gesamten Planes ist, fehlen einige Details und Maßangaben. Der Closer Ring zählt zu den einfacheren Teile des Trägersystems.

Trägerstruktur. Durch ein Fehler in der Definition des Koordinatensystems weichen die Mittelwerte der Messungen in Abbildung 8.9 leicht von Null ab.

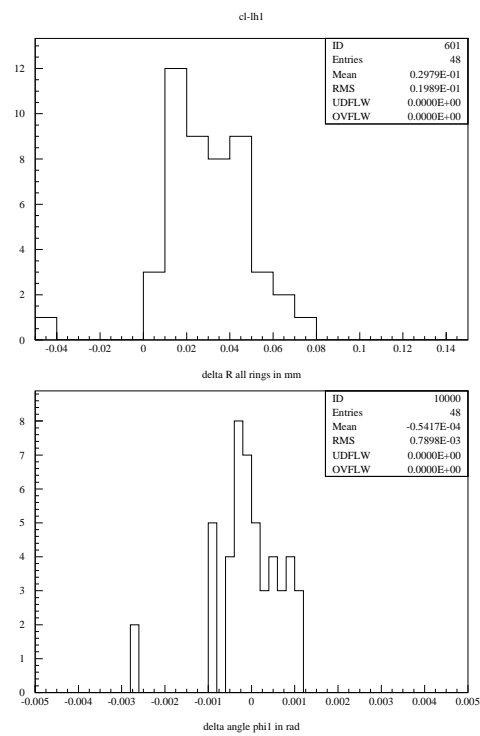


Abbildung 8.9: Die Vermessung der vier Halbringe des Closer Layer. Es sind die Abweichungen von den Sollwerten der einzelnen Flächen eingetragen.

Kapitel 9

Zusammenfassung

Das Institut für Experimentelle Kernphysik der Universität Karlsruhe beteiligte sich an der Herstellung des neuen Vertexdetektors für das DELPHI Experiment, der im Frühjahr 1996 eingebaut werden wird. Es wurden Teile der mechanischen Aluminiumträgerstruktur in der institutseigenen Werkstatt hergestellt. Halbmodule mit 1280 Kanälen wurden aus je vier längs- und quersegmentierten, 60mm langen Streifendetektoren aufgebaut. Mit dem in dieser Diplomarbeit vorgestellten System können Module mit einem sensitiven Bereich von bis zu 480mm hergestellt werden, wobei eine sehr hohe mechanische Präzision erreicht werden kann. Das Pickupsystem, bei dem die Detektoren für das Kleben umgedreht werden, erleichtert den eigentlichen Klebevorgang enorm, ohne daß ein Verlust der Genauigkeit in Kauf genommen werden muß. Bei 15 der produzierten Halbmodule wurde eine bessere mechanische Präzision erreicht, als in den Spezifikationen gefordert wurde. Nur bei einem Modul wurde ein Versatz eingebaut, da eine Koordinatentransformation vom Klebejig auf das Modul nicht richtig durchgeführt wurde. Dieses Modul konnte jedoch trotzdem verwendet werden. Eines der Halbmodule war ein sogenanntes Creeping Module, das eine nicht ausreichende Klebeverbindung zwischen Hybrid und erstem Detektor besaß. Ein geringfügiges Fließen des Klebers an dieser Klebestelle bewirkt, über der Länge von circa 240mm eines Halbmoduls, eine beträchtliche Verformung. Durch das Design des in Karlsruhe benutzten Klebejigs kann das Auftreten dieses Effektes jedoch zuverlässig vermieden werden.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde ferner ein kostengünstiges und sehr zuverlässiges Verfahren zum Bonden der Halbmodule entwickelt, mit dem während der Produktionsphase über 82000 einzelne Drahtverbindungen hergestellt wurden. Beim Bonden wurde ein Detektor eines Moduls beschädigt, das jedoch repariert werden konnte.

Nach den Ergebnissen der Detektortests waren auf der RZ-Seite im Durchschnitt 3.5 % und auf der $R\Phi$ -Seite 0.016% defekte Auslesekanäle zu erwarten. Die Anzahl der tatsächlich defekten Auslesekanäle lag jedoch auf beiden Seiten höher. Die zusätzlichen Fehler sind unter anderem auf das Bonden zurückzuführen, wo-

bei verschiedene Defekte auftreten können. Durch eine hochohmig oder fehlende Bondverbindung können die nachfolgenden Detektoren nicht mehr ausgelesen werden. Bei den kleinen Abständen zwischen den Bonds besteht die Möglichkeit, daß sich zwei benachbarte Bonddrähte berühren, wodurch ein Kurzschluß zwischen zwei Auslestreifen entsteht. Durch eine Zerstörung der Isolationsschicht (SiO_2) zwischen Bondpad und Siliziumbulk wird ein sogenannter Mount Fuji erzeugt. Nach einer Optimierung der Bondparameter wurde die Anzahl der Mount Fujis vermindert. Eine quantitative Analyse der aufgetretenen Defekte der Auslesekanäle konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden. Diese wird in [11] ausführlich beschrieben.

Sowohl das Klebesystem als auch das automatisierte Bonden können leicht modifiziert und in Zukunft für den Bau anderer Detektormodule mit ähnlichem Aufbau verwendet werden. Für die Aktivitäten innerhalb der Vertex-Gruppe in Karlsruhe, die sich mit dem Aufbau von Pixeldetektormodulen für den Very Forward Tracker des DELPHI Vertexdetektors beschäftigen, wurde der Bonder für das automatische Bonden der Pixeldetektormodule bereits angepasst und optimiert und findet somit weiterhin Verwendung.

Danksagung

Ich möchte mich an erster Stelle bei Herrn Prof. Wim de Boer bedanken, der diese Diplomarbeit ermöglichte und mir eine sehr interessante Aufgabenstellung innerhalb eines faszinierenden Forschungsprojektes gab.

Mein Dank gilt auch Herrn Dr. Gunnar Mæhlum, der als persönlicher Ansprechpartner immer zur Verfügung stand. Durch sein großes Wissen und seine weitreichende Erfahrung im Bereich der Siliziumdetektoren stand er bei Problemen immer zur Seite, förderte aber zur gleichen Zeit selbständiges, wissenschaftliches Arbeiten.

Des weiteren muß in diesem Zusammenhang das ausgezeichnete Arbeitsklima erwähnt werden, das innerhalb der gesamten Vertex-Gruppe (Dipl. Phys. Michael Kaiser und Stephan Meyer, Cand. Phys. Andreas Körpert, Frank Hartmann und Hannes Leb) herrschte. In dieser Gruppe erhielt ich viele wichtige Anregungen. Der Teamgeist war ein guter Nährboden für die Entwicklung eigener Ideen.

Die Werkstatt erledigte die mechanischen Arbeiten zu unserer vollsten Zufriedenheit, auch wenn manche Pläne nicht ganz korrekt waren.

In der Elektronik-Gruppe fand sich immer ein Ansprechpartner bei auftretenden Problemen aller Art.

Dank sagen möchte ich auch Herrn Kurt Kärcher für die kooperative Zusammenarbeit und die schnelle Beschaffung der unmöglichsten Materialien und Teile. Auch half er mir, die Zusammenhänge innerhalb des FZK und der Universität bei Reparaturen und Ein- und Ausfuhrformalitäten zu verstehen.

Ohne unsere Frau Edeltraud Haas wären wir wohl alle in dem bürokratischen Dschungel verloren gegangen, ein Dankeschön für die Übernahme des Papierkrieges.

Auch darf Savaş Bayrack nicht vergessen werden. Durch die fotografischen Tips und die Bereitstellung seiner Fotoausrüstung war er eine große Hilfe bei der Erstellung dieser Arbeit.

Bedanken möchte ich mich aber auch bei all den Nichtgenannten, die mir Studium und Diplomarbeit ermöglicht und erleichtert haben.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Die Lage des LEP Speicherringes	8
2.2	Die Vorbeschleuniger von LEP	9
2.3	Der DELPHI Detektor	11
2.4	Ein rekonstruiertes Event von DELPHI	15
3.1	Einige physikalischen Größen eines pn-Überganges	21
3.2	Das Bändermodell des pn-Überganges	22
3.3	Schnitt durch einen Detektor	23
3.4	Der RZ-320 Detektor	25
3.5	Der R Φ -Detektor	26
3.6	Prinzipdarstellung eines Pixeldetektor und des Flip Chip Bondens	28
3.7	Der Pixeldetektor	29
3.8	Das Datenblatt der C _{strip} -Messung	32
3.9	Das Hybrid	35
3.10	Die Schaltskizze des Triplexchips	36
4.1	Der Vertexdetektor	37
4.2	Die Seitenansicht eines Ganzmoduls des Outer Layers	38
4.3	Ein Halbmodul des Outer Layers	39
4.4	Der Montagering des Outer und Inner Layers	40
4.5	Der Kohlefaserzylinder	41
4.6	Die RZ-Detektoren und der Durchflugwinkel der Teilchen	42
4.7	Teilchenspuren, die zur Ausrichtung verwendet werden	44
5.1	Die ZEISS-Maschine	47
5.2	Die ZEISS-Maschine, bei mechanischer Messung	49
5.3	Die ZEISS-Maschine, bei optischer Messung	50
5.4	Der Klebejig (Sicht von schräg oben)	52
5.5	Der Klebejig (Sicht auf die Hybridauflage)	53
5.6	Der Pickupjig	54
5.7	Die Aufnahme mit dem Pickupjig	57
5.8	Das Sandwich beim Verkleben der beiden Seiten	59
5.9	Der Ganzmoduljig	59

6.1	Die Bondeinstellungen	62
6.2	Der Bondarm	63
6.3	Der Bondfuß	64
6.4	Der Schaltplan der Bond-Platine	67
6.5	Der automatische Bonder	70
6.6	Das Initialisierungsschema der Bond Pads	71
6.7	Das Bonden an den Chipgrenzen	72
6.8	Der Biasbond	73
6.9	Das Detektorbonden	73
7.1	Das Auslesesystem der Halbmodule	75
7.2	Das Pulshöhenspektrum	76
7.3	Die Hitmap	77
7.4	Der Laserscan einzelner Diodenstreifen	78
7.5	Die Ladungsverteilung	80
8.1	Die Koordinaten vor und nach dem Kleben	83
8.2	Die Koordinaten vor und nach dem Kleben, Histogramme	84
8.3	Die Winkel vor und nach dem Kleben	85
8.4	Das Creeping Module; Messung	86
8.5	Skizze zur Entstehung eines Creeping Modules	87
8.6	Die maximale Zugfestigkeit eines Bondes	88
8.7	Skizze zur Entstehung eines Mount Fujis	89
8.8	Der Closer Ring	91
8.9	Die Messung der Closer Ringe	92

Tabellenverzeichnis

2.1	Die Familie der Fermionen	5
2.2	Die bekannten Wechselwirkungen und ihre Eichbosonen	6
2.3	Die Detektoren zur Spurrekonstruktion von DELPHI	13
2.4	Die Detektoren zur Energiebestimmung von DELPHI	13
5.1	Einige technische Daten der ZEISS-Maschine	48
5.2	Der Koordinatenbezug Meßmaschine \Leftrightarrow DELPHI	51
5.3	Die Koordinaten der RZ-Detektoren	56
5.4	Die Koordinaten der R ϕ -Detektoren	58

Literaturverzeichnis

- [1] The Workshop on Physics at LEP2. *Interim Report on the Physics Motivations for an Energy upgrade of LEP2*. CERN-TH/95-151.
- [2] DELPHI Collaboration. *The DELPHI detector at LEP*. NIM A303 (1991) 233. North Holland.
- [3] H.Schaumburg. *Werkstoffe und Bauelemente der Elektrotechnik 2: Halbleiter*. B.G. Teubner Stuttgart 1991.
- [4] C. Kittel. *Einführung in die Festkörperphysik*. Oldenbourg, 1993.
- [5] H. Ibach, H. Lüth. *Festkörperphysik. Einführung in die Grundlagen*. Springer, 1990.
- [6] F.K.Schmidt. *Einführung in das Kernphysikalische Praktikum*. IEKP, Universität Karlsruhe.
- [7] Gunnar Maehlum. *A Measurement of lifetime of b -hadrons using a silicon microstrip detector at LEP*. Thesis 1993.
- [8] Stephan Meyer. *Silizium-Streifendetektoren. Entwicklung der Software und Messungen mit einer γ Quelle*. Diplomarbeit Universität Karlsruhe, IEKP-KA/95-2, 1995.
- [9] Christian Becker. *Silizium-Streifendetektoren. Entwicklung und Aufbau eines Teststandes*. Diplomarbeit Universität Karlsruhe, IEKP-KA/95-1, 1995.
- [10] Andreas Körpert. *Messungen an Halbleiterdetektoren für die Herstellung des 96 Upgrade des DELPHI Vertexdetektor*. Diplomarbeit Universität Karlsruhe, IEKP-KA/95-11, 1995.
- [11] Frank Hartmann. *Testen von Halbmodulen und Analyse der Meßdaten für den 96 Upgrade des DELPHI Vertexdetektor*. Vorläufiger Arbeitstitel zur Diplomarbeit, Universität Karlsruhe, 1996.
- [12] Anna Peisert. *Silicon microstrip detectors*. DELPHI 92-143 MVX 2, 1992, veröffentlicht in *Instrumentation in High Energy Physics*. World Scientific Publication Co. , Editor F. Sauli.

- [13] Richard S. Muller, Theodore I. Kamins. *Device Electronics for Integrated Circuits*. John Wiley & Sons, 1977.
- [14] M. Laakso et al. *Operation and radiation resistance of a FOXFET biasing structure for silicon strip detectors*. NIM A326 (1993) 214, North Holland.
- [15] P. Weilhammer. *Double-sided Si strip sensors for LEP vertex detectors*. NIM A342 (1994) 1, North Holland.
- [16] Thierry Mouthuy-CPPM. *DELPHI at CPPM*. Internet WWW <http://marpix1.in2p3.fr/Delphi/Delphi.html>.
- [17] N. Bingefors et al. *The DELPHI Microvertex detector*. NIM A328 (1993) 447, North Holland.
- [18] DELPHI Collaboration. *Proposal for the Upgrade of DELPHI in the Forward Region*. DELPHI 92-142 GEN 135, 1992.
- [19] DELPHI Collaboration. *Proposal for the DELPHI Very Forward Tracker*. DELPHI 93-52 GEN 146, 1993.
- [20] J. Friedrich Haag, Anton Kolbeck. *Stand und Entwicklung der Drahtbond-technik*. Fraunhofer-Institut für Festkörpertechnologie, München, erschienen VDI/VDE-Technologiezentrum Informationstechnik GmbH.
- [21] MEI 1204 Hybrid Wedge Bonder. *Operations Manual*.
- [22] ZEISS MC 550 Meßzentrum, UMESS 300 Universal-Software. *Bedienungsanleitung*.