

Ein Infrarot Laser
Positions-Kontroll-System
für das AMS Experiment

Jörg Vandenhirtz

I. Physikalisches Institut der Technischen Hochschule Aachen

PHYSIKALISCHE INSTITUTE
RWTH AACHEN
52056 AACHEN, GERMANY

Ein Infrarot Laser Positions-Kontroll-System für das AMS Experiment

Von der Fakultät für Mathematik, Informatik und
Naturwissenschaften der Rheinisch-Westfälischen Technischen
Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Naturwissenschaften genehmigte Dissertation.

vorgelegt von

Diplom-Physiker
Jörg Vandenhirtz

aus Aachen

Berichter: Professor Dr. W. Wallraff
Universitätsprofessor Dr. K. Lübelmeyer
Tag der mündlichen Prüfung: 10. Oktober 2001

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar

Abstract

The **Anti Matter Spectrometer** (AMS) is designed for the space based search for cosmic antimatter and dark matter. The AMS detector will be installed on the **International Space Station** (ISS) in 2003. In June 1998 a precursor version of the final AMS-02 detector was flown on board of the space shuttle *Discovery* for the 10-day Mission STS-91. During this flight AMS-01 collected more than 10^8 high energetic ($p \geq 0.8$ GeV) cosmic ray events (see chapter 3).

The momentum measurement system of the precursor AMS-01 detector is a 6-plane silicon tracker embedded in a permanent magnet with a magnetic field of $\int B \times l dl = 0.14$ Tm². The position of the 6 tracker planes is monitored by 4 infrared laser beams ($\lambda = 1083$ nm). The development and the results of this light and space proofed **Tracker Alignment System** (TAS) are major parts of this thesis. Position measurements with an accuracy of $dx \leq 3$ μ m are possible (see chapter 4).

Furthermore the measured positions of the TAS are reproduced by the results of the so called cosmic alignment which also has been developed during this thesis. Combining the results of these two alignment methods the momentum measurement of AMS-01 has been improved by 20% (see chapter 7).

Last but not least, the readout bonding scheme of the silicon sensors has been optimized with the TAS laser system and a micro focus lens, such that charge measurement has been improved by 30% without decreasing the accuracy of the position measurement of the sensors (see chapter 8).

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Die Ziele des AMS Experiments	9
1.2	Das Konzept des AMS Experiments	9
2	Das Universum	13
2.1	Die Entstehung des Universums	14
2.2	Theoretische Hintergründe und experimentelle Fakten	14
2.2.1	Das Weltall expandiert	15
2.2.2	Die 3 K Hintergrundstrahlung	16
2.3	Offene Fragen und Problemstellungen	18
2.3.1	Antimaterie	18
2.3.2	Dunkle Materie	24
2.3.3	Kosmische Strahlung	27
3	Das AMS Experiment	29
3.1	Der Aufbau des AMS-01 Detektors	32
3.1.1	Die Flugzeitähler (TOF)	32
3.1.2	Die Antizähler (ACC)	32
3.1.3	Der Aerogel Čerenkov Zähler	33
3.1.4	Der Permanentmagnet	33
3.1.5	Der Silizium Spurdetektor von AMS-01	35
3.2	Der Aufbau des AMS-02 Detektors	40
4	Das IR Laser Positions-Kontroll-System TAS	43
4.1	Anforderungen an das TAS	44
4.2	Realisierung und Aufbau des TAS	45

4.2.1	Das Lasersystem	45
4.2.2	Die Alignment Sensoren	46
4.2.3	Die TAS Elektronik (TASE)	51
4.2.4	Positionsbestimmung aus den Laserprofilen	52
4.3	Erste Tests im Labor	58
4.3.1	Optische Eigenschaften der SI Sensoren (Aachen 6/97)	58
4.3.1.1	Die Transmissionseigenschaften der Silizium Sensoren für das IR Laserlicht	58
4.3.1.2	Die Beugungs- und Brechungseigenschaften der Silizium Sensoren für das IR Laserlicht	62
4.3.2	Mechanische Stabilität des TAS (Garching 8/97)	65
4.3.3	Thermo Vakuum Test des TAS (Garching 8/97)	66
4.3.4	Ortsauflösung des TAS (Genf 9/97)	67
4.4	Der Einbau des TAS in AMS-01 (Zürich 10/97)	70
4.5	TAS Messungen in AMS-01 an der ETHZ (Zürich 12/97)	72
5	Der STS-91 Weltraumflug von AMS-01 (NASA 6/98)	75
5.1	Die STS-91 Laserdaten	78
5.2	Zusammenfassung des AMS-01 STS-91 Laser Alignment	84
6	TAS Messungen nach dem STS-91 Weltraumflug von AMS-01	85
6.1	TAS Messungen am KSC (Florida 7/98)	86
6.2	TAS Messungen am GSI (Darmstadt 9/98)	88
6.3	TAS Messungen am CERN (Genf 12/98)	92
6.4	Zusammenfassung der TAS Messungen nach dem STS-91 Weltraumflug	95
7	Positionsmessungen mit STS-91 Teilchendaten (CERN 11/99)	97
7.1	Impulsbestimmung	98
7.2	Cosmic Alignment	103
7.3	Simulation des Cosmic Alignment	117
7.4	Alignment Korrektur	121
7.5	Orbitstruktur	123
7.6	Zusammenfassung des AMS-01 STS-91 Alignment	130

8	Ladungsmessungen an den AMS-01 SI Sensoren (Genf 5/99)	133
8.1	Messaufbau	136
8.2	Messungen	137
8.3	Analyse	138
8.3.1	Ladungsmessung	138
8.3.2	Ortsmessung	142
8.4	Zusammenfassung der Ladungsmessungen	148
9	Zusammenfassung	149
10	Danksagung	151
11	Abbildungsverzeichnis	153
12	Tabellenverzeichnis	159
13	Literaturverzeichnis	161
14	Lebenslauf	169

Kapitel 1

Einleitung

Das AMS¹ Experiment ist ein Teilchen Spektrometer, das im Jahre 2003 auf der internationalen Raumstation ISS² installiert werden soll und dort außerhalb der Erdatmosphäre für ca. 3 Jahre Daten aus dem kosmischen Teilchenfluss sammeln soll, um so genauere Details über die Zusammensetzung und Entwicklung des Universums zu gewinnen.

1.1 Die Ziele des AMS Experiments

Das AMS Experiment wurde mit den folgenden drei Hauptzielen konzipiert:

1. **Die Suche nach kosmischer Antimaterie im Weltraum (vgl. Kapitel 2.3.1)**
2. Die Suche nach Kandidaten für die dunkle Materie (vgl. Kapitel 2.3.2)
3. Die Untersuchung der Zusammensetzung und Energieverteilung der kosmischen Strahlung (vgl. Kapitel 2.3.3)

1.2 Das Konzept des AMS Experiments

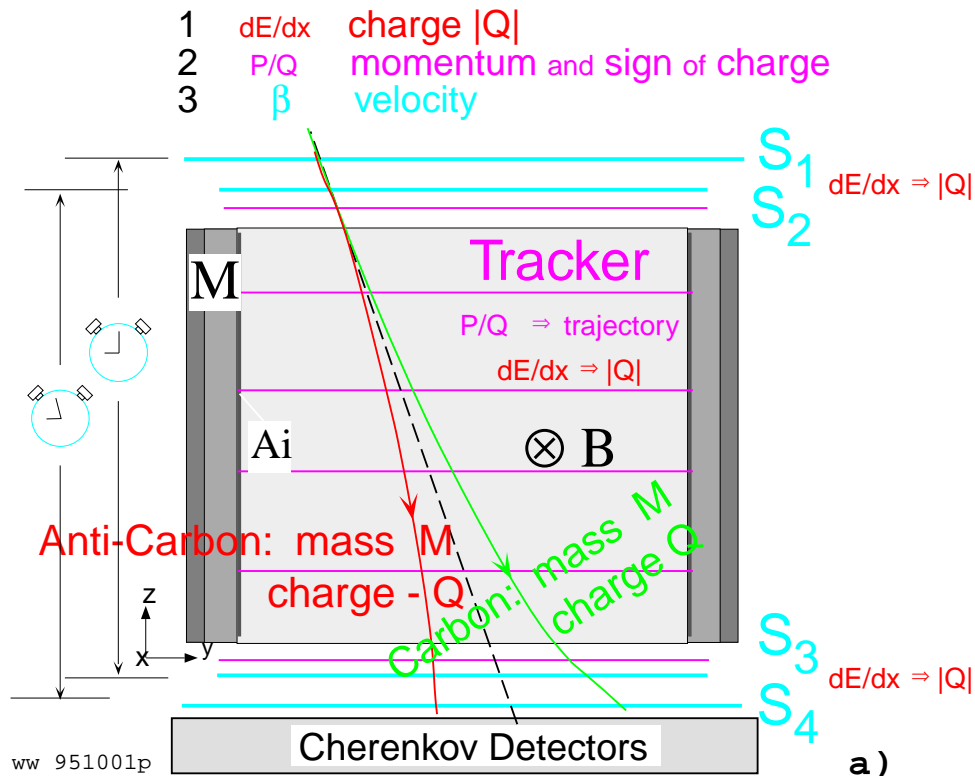
AMS ist das erste magnetische Teilchen Spektrometer im Weltall mit einer hohen Akzeptanz von ca. $0,6 \text{ m}^2\text{sr}$ und einer Impulsauflösung von $\Delta p/p \approx (6 - 12\%)p$ in einem Impulsbereich von 0,2 bis $500 \text{ GeV}/\text{amu}^3$ (siehe Abbildung 3.12). AMS ist für eine Betriebszeit von ≥ 30.000 Stunden auf der internationalen Raumstation ISS ausgelegt. In dieser Messzeit werden ca. 10^{11} Teilchenspuren aufgezeichnet und analysiert werden.

¹Anti Matter Spectrometer

²International Space Station

³atomic mass unit

AMS basic measurements



tracker : — scintillators S:— anticounter Ai:— magnet M: NdFe

Abbildung 1.1: Das prinzipielle Konzept von AMS

Mit dieser Konfiguration kann Antimaterie von Materie aufgrund des unterschiedlichen Krümmungsvorzeichens der Spuren im homogenen Magnetfeld unterschieden werden (siehe Abbildung 1.1).

Genau genommen besteht das AMS Experiment aus 2 verschiedenen Ausbaustufen:

1. dem **AMS-01** Detektor, einem vorläufigen Modell des endgültigen AMS Detektors mit nicht vollständig bestückten ($\approx 50\%$) Versionen der einzelnen Komponenten und Subdetektoren. Dieser Detektor wurde hauptsächlich konzeptioniert, um während des STS-91 Shuttle Flugs die technische Machbarkeit eines Teilchendetektors im Weltraum zu untersuchen (vgl. Kapitel 3.1).
2. dem **AMS-02** Detektor, der z. Zt. endgültigen Version des AMS Detektors, der voraussichtlich am 4. Oktober 2003 mit dem Shuttle Flug UF-4

auf die internationale Raumstation ISS transportiert und dort installiert wird, um für ca. 3 Jahre Daten zu nehmen. Der AMS-02 Detektor verfolgt die gleichen prinzipiellen Ideen wie AMS-01, unterscheidet sich aber dennoch in einigen Komponenten stark von seinem Vorgängermodell AMS-01, z. B. TRD, supraleitender Magnet etc. (vgl. Kapitel 3.2)

In der hier vorliegenden Arbeit wird jedoch ausschließlich der AMS-01 Detektor behandelt, hier insbesondere das in Aachen entwickelte **T**racke**r** **A**lign**m**ent **S**ystem, kurz TAS von AMS-01, da der AMS-02 Detektor sich zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit erst in der Vorbereitungsphase befand.

Im ersten Kapitel dieser Arbeit wird etwas genauer auf die zugrunde liegenden physikalischen Hintergründe von AMS eingegangen, während im zweiten Kapitel die Konzeptionierungen der beiden AMS Detektoren genauer beleuchtet werden.

Ansonsten ist die Reihenfolge der Kapitel chronologisch und reicht von der Konzeptionierung des Tracker Alignment Systems (vgl. Kapitel 4.2) über erste Labortests des TAS im Hinblick auf seine Weltraumtauglichkeit (vgl. Kapitel 4.3), die Installation des TAS in AMS-01 (vgl. Kapitel 4.4) bis hin zu der neuntägigen STS-91 Space Shuttle Mission mit AMS-01 an Bord der Weltraumfähre *Discovery* im Juni 1998 (vgl. Kapitel 5), sowie die Messungen nach dem Weltraumflug STS-91 (vgl. Kapitel 6).

Die letzten beiden Kapitel 7 und 8 beschreiben Kontrollen der Laser Alignment Daten sowie der Silizium Detektor Signal Aufbereitung. Es werden zum einen die Teilchendaten der STS-91 Mission zur Positionsbestimmung herangezogen, um diese mit den Ergebnissen des TAS zu vergleichen (Kapitel 7), zum anderen wird das TAS zur Ladungsmessung auf Silizium Sensoren von AMS-01 „zweckentfremdet“, um so das Bonding Schema der Sensoren bezüglich der Ladungsmessung zu optimieren (Kapitel 8).

Kapitel 2

Das Universum

Schon seit Urzeiten sind wir Menschen vom Anblick des sternklaren Nachthimmels fasziniert. Angesichts der kaum zu begreifenden Größe des Kosmos stellt sich uns die brennende Frage nach dem Sinn und Ursprung unserer Existenz. Diese älteste Frage der Menschheit beschäftigt auch moderne Teilchen- und Astro-Physiker. Auch sie schauen in die Sterne auf der Suche nach Antworten. Sie tun dies mittlerweile allerdings nicht mehr mit dem bloßem Auge, sondern vielmehr mit riesigen erdgebundenen oder Satelliten gestützten Teleskopen, die immer tiefere Einblicke in die Unendlichkeiten des Weltalls erlauben (siehe Abbildung 2.1).



Abbildung 2.1: Die Spiralgalaxie NGC1365 [64]

Diese immer komplizierteren und teureren Geräte, deren finanzielle Etats meist nur noch von internationalen Kollaborationen aufgebracht werden können, suchen nicht mehr ausschließlich im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums, sondern auch im langwelligeren Bereich (Infrarot, Radiowellen etc.) sowie im kurzwelligeren Bereich (UV, Röntgenstrahlung etc.). Neben der Untersuchung der elektromagnetischen Strahlung ist auch die Untersuchung des kosmischen Teilchenflusses interessant, um Hinweise auf die Entwicklung des Universums zu erhalten. Anhand der Zusammensetzung und der Energieverteilungen dieser „Botschafter“ aus den Tiefen des Weltalls können die entsprechenden Vorhersagen bestehender Modelle zur Entwicklung des Universums überprüft werden. Auf diese Weise erhoffen sich namhafte Wissenschaftler auf der ganzen Welt, den Antworten ein wenig näher zu kommen.

2.1 Die Entstehung des Universums

Die derzeit anerkannteste Theorien über die Entstehung des Universums, enthält den Urknall als Ausgangspunkt allen Seins. Der Erfolg dieser Theorie liegt vor allen Dingen daran, dass sie von allen bisher formulierten Theorien die meisten experimentell bestätigten Vorhersagen gemacht hat (z. B. die Rotverschiebung im Spektrum ferner Galaxien, bedingt durch die Expansion des Universums und den Dopplereffekt oder die 3 K Hintergrundstrahlung). Allerdings beinhaltet sie auch noch einige ungelöste Probleme (z. B. die derzeit immer noch ungeklärte Frage nach dem Verbleib der Antimaterie, der AMS u. a. auf die Spur zu kommen versuchen will).

Die Urknall Theorie geht davon aus, dass das Universum aus einem singulären Zustand mit unendlicher Energiedichte heraus entstanden ist und seitdem expandiert. Dies ist der naheliegendste Versuch eines Modells, welches die verschiedenen im nächsten Kapitel 2.2 beschriebenen, experimentell beobachteten Tatsachen zu erklären vermag. Die „theoretische Singularität“ am Anfang allen Seins entsteht im Modell durch die Extrapolation des offensichtlich expandierenden Universums zurück in der Zeit. Eine Singularität ist jedoch eine rein theoretisches Konstrukt und kann daher nicht der Ursprung des Universums gewesen sein. In diesem Punkt versagt das Modell also.

2.2 Theoretische Hintergründe und experimentelle Fakten

Aus der Urknall Theorie ergeben sich eine Reihe von Vorhersagen und Konsequenzen, die zum Teil bereits experimentell bestätigt sind. Die beiden wichtigsten sollen hier kurz beschrieben werden:

2.2.1 Das Weltall expandiert

Die Homogenitätsannahme besagt, dass das Universum kein Zentrum und keinen Rand besitzt. Nach dem Relativitätsprinzip ist nicht nur kein Raumpunkt, sondern auch kein Zeitpunkt ausgezeichnet, d. h. das kosmologische Prinzip sollte an jedem Ort zu jeder Zeit gegolten haben. (Den Urknall als „theoretische Singularität“ müssen wir hier ausschließen.)

Aus der Annahme der Zeitunabhängigkeit des kosmologischen Prinzips [124] folgt unmittelbar, dass zu jedem Zeitpunkt die Relativgeschwindigkeit $v(t)$ zweier kosmologischer Objekte (z. B. zweier Galaxienhaufen) proportional zu ihrem Abstand $r(t)$ sein muss, falls das Universum nicht stationär ist sondern expandiert. Es gilt also das sogenannte Hubble'sche Gesetz 2.1 mit dem Hubbleparameter $H(t)$ (siehe Gleichung 2.2) als Proportionalitätsfaktor. [50]

$$\dot{r}(t) = v(t) = H(t) \cdot r(t) \quad (2.1)$$

t	Zeit seit dem Urknall (im Bezugssystem, in dem die kosmische Hintergrundstrahlung isotrop ist)
$\dot{r}(t), v(t)$	Relativgeschwindigkeit zweier kosmologischer Objekte zur Zeit t
$H(t)$	Hubbleparameter zur Zeit t
$r(t)$	Abstand der beiden kosmologischen Objekte zur Zeit t

Die Spektrallinien des Lichts, das wir von fernen Galaxien hier bei uns auf der Erde empfangen, sind tatsächlich zu längeren Wellenlängen hin verschoben. Diese Rotverschiebung kann als Dopplereffekt gedeutet werden. Aus der Richtung der Verschiebung zum Roten hin, muss geschlossen werden, dass sich die fernen Galaxien von der Erde wegbewegen. Nach dem kosmologischen Prinzip heißt dies, dass sich alle Galaxien voneinander entfernen, dass das Universum also expandiert (siehe Abbildung 2.2).

In den zwanziger Jahren begann Edwin P. Hubble, die Rotverschiebung der Spektrallinien von Sternen systematisch zu studieren. Er schätzte anhand der Helligkeiten der jeweils hellsten Sterne die Entfernungen von Galaxien ab und stellte diesen Entfernungen die aus der Rotverschiebung ermittelten Fluchtgeschwindigkeiten gegenüber. Seine und anderer Beobachtungsergebnisse interpretierend kam er 1929 zu dem Schluss, dass die Fluchtgeschwindigkeiten proportional zu den Entfernungen der jeweiligen Galaxien zunehmen (siehe Abbildung 2.3). [125]

Der heutige Wert des Hubble Parameters, die sogenannte Hubble Konstante, beträgt [54, 85]

$$H_0 = 100 \cdot h \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}, \text{ wobei } h = (0,71 \pm 0,07) \times \begin{matrix} 1,15 \\ 0,95 \end{matrix} \quad (2.2)$$

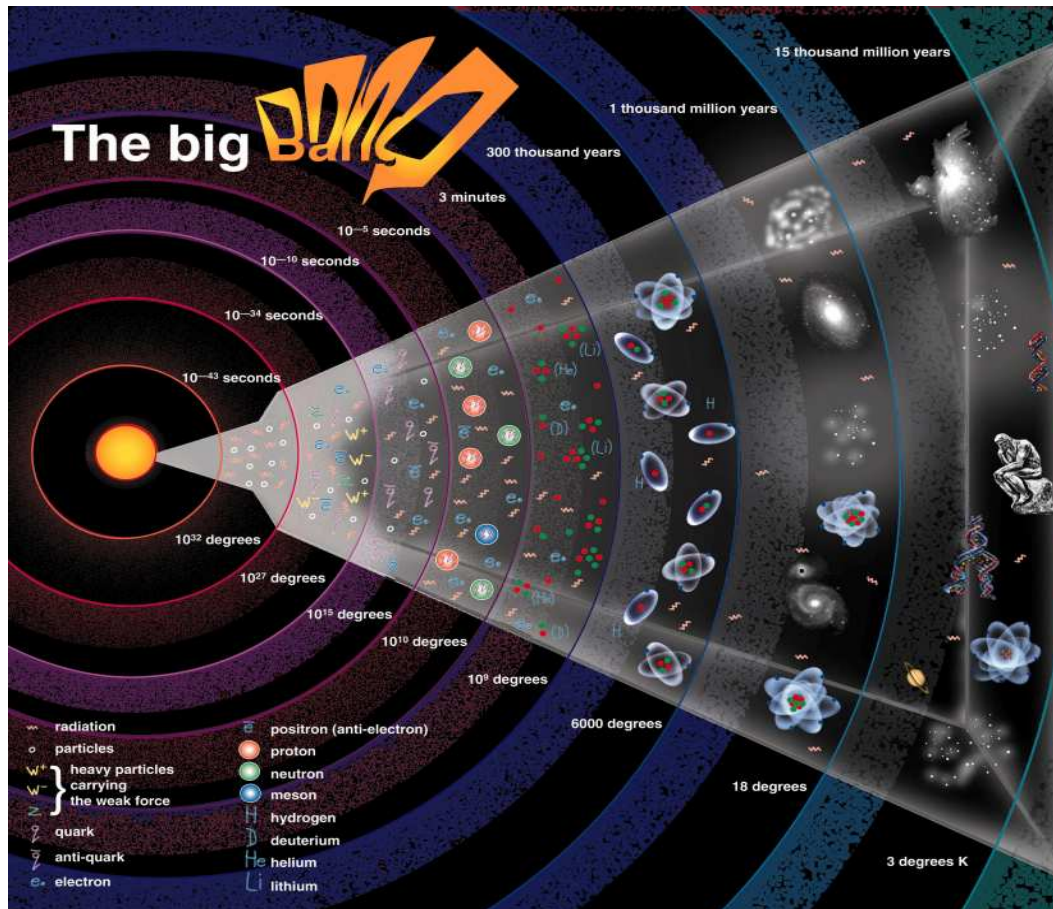


Abbildung 2.2: Die Expansion des Universums seit dem Urknall (Big Bang)

2.2.2 Die 3 K Hintergrundstrahlung

Wenn man von der Erde aus mit Teleskopen und Antennen in verschiedene Richtungen tief in das Weltall „hineinschaut“, so sieht man neben der Verteilung der leuchtenden Materie die spektrale Verteilung und Intensität der aus dem Urknall übrig gebliebenen sogenannten 3 K Hintergrundstrahlung.

Die Idee dieser Hintergrundstrahlung aus dem frühen Universum geht auf G. Gamov und J. Peebles [7, 13, 83] zurück. Sie gingen davon aus, dass wenn man die Strahlung vom Urknall ab, bei fortschreitender Expansion des Raumes verfolgt, die Wellenlänge der Strahlung aufgrund der Dopplerverschiebung größer werden muss. D. h. die Energie der Strahlung nimmt mit fortschreitendem Alter des Universums ab und die Temperatur des momentanen Gleichgewichtszustands zwischen Strahlung und Materie sinkt bis zur Rekombination. Die spektrale Verteilung der mit der Materie im thermischen Gleichgewicht befindlichen Strahlung ist die Planck-Verteilung eines schwarzen Körpers (das All ist der ideale Hohlraum) zur jeweiligen Temperatur T .

Irgendwann ist die Temperatur der Strahlung so niedrig (ca. $10^{3,5}$ K, Z

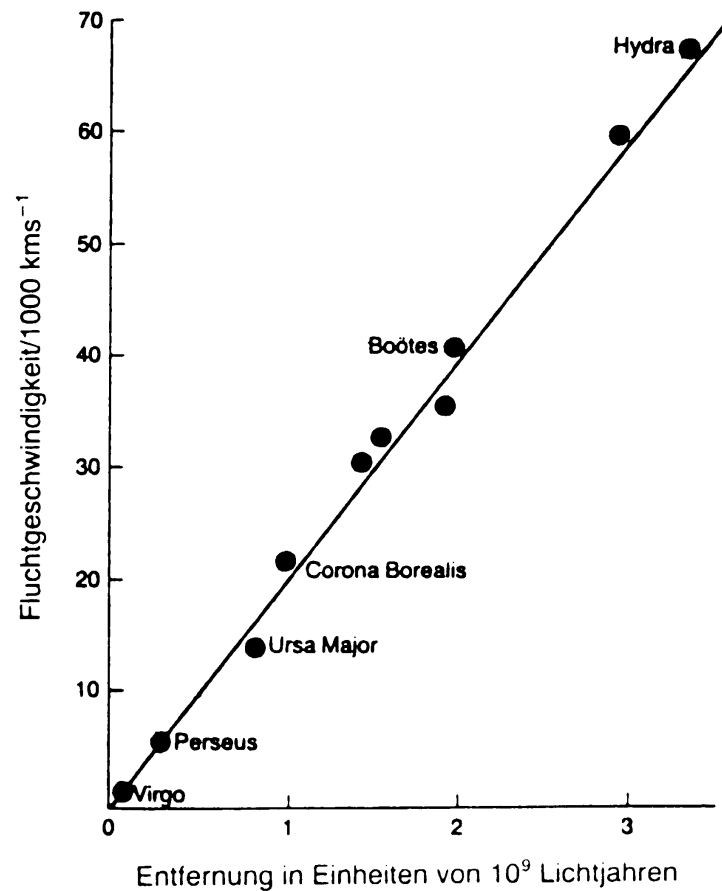


Abbildung 2.3: Fluchtgeschwindigkeiten einiger Galaxien in Abhängigkeit von ihrer Entfernung zur Erde [126]

≈ 1.100), dass diese nicht mehr in der Lage ist, gebildete Atome zu ionisieren. Von dieser Zeit an wird die Materie für die Strahlung durchlässig. Die Strahlung koppelt von der Materie ab und durchquert ungehindert den Raum. Folglich muss sie auch heute noch als Hintergrundstrahlung vorhanden sein. Allerdings hat die Strahlung, die die Erde heutzutage erreicht, eine Distanz von mehr als 10^{10} Lichtjahren zurückgelegt und sich dabei aufgrund der Dopplerverschiebung auf 3 K abgekühlt. [121]

Die Entdeckung der 3 K Hintergrundstrahlung erfolgte 1964 eher zufällig, als die beiden Radioastronomen A. Penzias und R. Wilson sich bemühten, den Rauschpegel einer Radioantenne der Bell Telephone Company auf Crawford Hill bei Holmdale, New Jersey zu reduzieren. Die Antenne war errichtet worden, um Nachrichten über Satellit zu vermitteln und war deshalb vom Design her besonders rauscharm. Von daher konnten die beiden Radioastronomen sich den überhöhten Rauschpegel der Antenne im Mikrowellenbereich nicht erklären. Penzias wurde erst in einem Telefongespräch von einem Freund auf die vermutete Ursache und die sensationelle Bedeutung der Entdeckung aufmerksam gemacht. Penzias und Wilson erhielten 1978 für ihre Entdeckung, die für

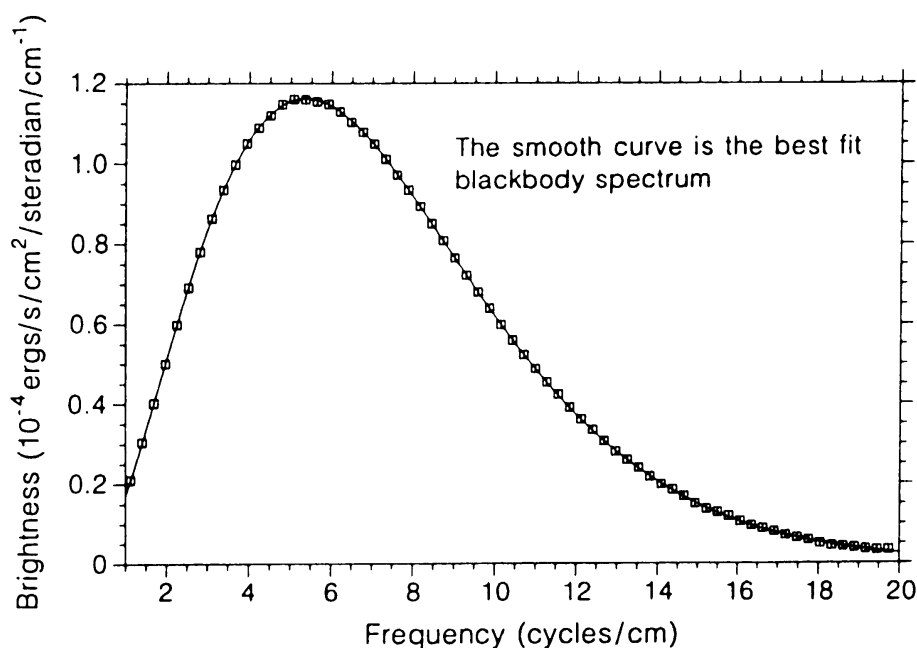


Abbildung 2.4: Planck-Verteilung der 2,7 K Hintergrundstrahlung (COBE-Daten, NASA) [54]

die Kosmologie von grundlegender Bedeutung war und ist, den Nobelpreis für Physik. [127]

Die spektrale Verteilung der Mikrowellen Hintergrundstrahlung ist heutzutage sehr genau vermessen (siehe Abbildung 2.4). Sie entspricht -wie bereits erwähnt- einer Schwarzkörperstrahlung von $2,726 \pm 0,005$ K. [128]

Anisotropien in der 3 K Hintergrundstrahlung können die Keimpunkte für die Strukturbildung im Universum gewesen sein. Diese werden zur Zeit von COBE [24] genau vermessen (siehe Abbildung 2.5).

2.3 Offene Fragen und Problemstellungen

Es gibt jedoch auch einige Konsequenzen der Urknall Theorie, die bis zum heutigen Zeitpunkt noch nicht experimentell beobachtet worden sind. AMS versucht, einigen dieser Fragestellungen auf die Spur zu kommen. Diese werden in den folgenden drei Kapiteln beschrieben.

2.3.1 Antimaterie

Im Jahre 1928 gelang es dem englischen Physiker Paul Dirac, zwei bis dato unabhängige Theorien miteinander zu vereinen, nämlich Einsteins spezielle Relativitätstheorie, die die Dynamik eines Teilchen bei hohen Geschwindigkeiten

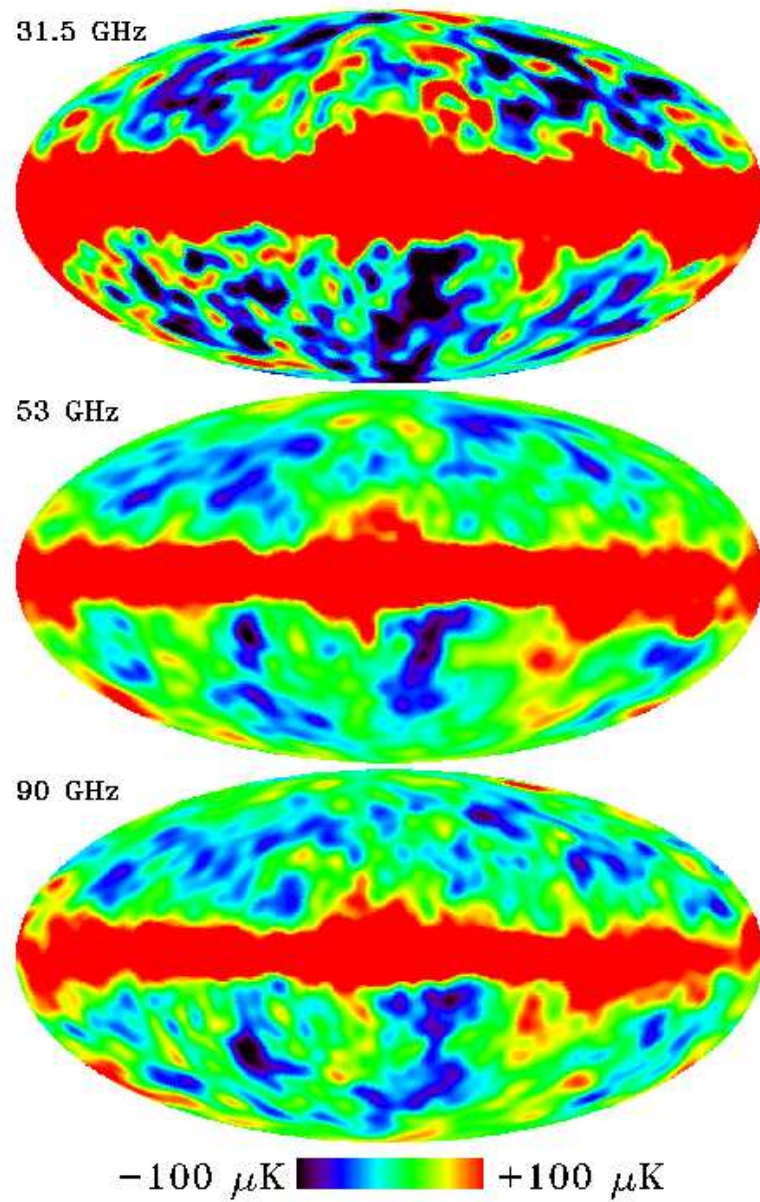


Abbildung 2.5: Fluktuationen in der 2,7 K Hintergrundstrahlung [24]

nahe der Lichtgeschwindigkeit beschreibt und Heisenbergs/Schrödingers Theorie der Quantenmechanik, die besagt, dass Energie nicht in beliebig kleinen Portionen abgestrahlt oder absorbiert werden kann, sondern nur als Vielfache von diskreten, unteilbaren Einheiten, den sogenannten Quanten.

Dirac verband diese beiden Theorien in der sogenannten Dirac-Gleichung (2.3), die das Verhalten oder besser die Zustände ψ eines relativistischen Teilchens der Masse m und mit Spin $1/2$ (typischerweise eines Elektrons) beschreibt. Für diese Leistung wurde Paul Dirac 1933 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet. [90]

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0 \quad (2.3)$$

Die Dirac Gleichung brachte allerdings ein neues Problem auf den Tisch. Sie hat nämlich -ähnlich einer quadratischen Gleichung- zwei verschiedene Lösungen für die Energie des Teilchens, die sich ausschließlich in ihrem Vorzeichen unterscheiden.

Dirac interpretierte diesen Umstand so, dass laut seiner Theorie zu jedem Teilchen ein sogenanntes Antiteilchen existieren müsste. Antimaterie lässt sich also als Gegenstück zu Materie beschreiben, wobei sich beide jedoch in ihren ladungsartigen Quantenzahlen im Vorzeichen unterscheiden. (Baryonen- und Leptonenzahl, sowie Ladung sind entgegengesetzt, aber vom Betrag her genau gleich.)

Alle anderen physikalischen Eigenschaften sind exakt identisch, d. h. insbesondere, dass für Antimaterie die gleichen physikalischen Gesetzmäßigkeiten gelten, wie für Materie. Ein Antiproton kann z. B. mit einem Anti Elektron (Positron) genauso zu einem Anti Wasserstoffatom gebunden werden, wie ein Proton und ein Elektron im Wasserstoff. Selbiges gilt für die höheren Kerne. Der Aufbau von Anti Festkörpern bzw. ganzen Anti Sternen oder gar Anti Menschen aus Anti Atomen und Anti Molekülen würde nach den gleichen physikalischen Gesetzmäßigkeiten erfolgen, wie der Aufbau „normaler“ Materie.

Ein Anti Stern würde genauso Anti Wasserstoff Kerne in Anti Helium Kerne verschmelzen, wie die Sonne es mit Wasserstoff und Helium macht und ein Anti Stern würde am Ende genauso in einer „Anti“ Supernova enden und seine Anti Atome in das Weltall schleudern, wie es bei jeder Supernova der Fall ist. Derartige Anti Teilchen mit genügend hohen Energien könnten aus anderen (Anti) Galaxien bis in unsere Galaxie vordringen und müssten demnach auch hier bei uns nachzuweisen sein.

Tatsächlich wurde das erste Antiteilchen, nämlich das Anti-Elektron (oder auch Positron genannt) vier Jahre nach Diracs theoretischer Vorhersage von Carl Anderson, einem jungen Professor am California Institute of Technology gefunden, als dieser 1932 kosmische Teilchenschauer in einer Nebelkammer untersuchte und dabei eine Spur eines Teilchen fand das positiv geladen war, aber die Masse eines Elektrons hatte. Für diese Entdeckung des Positrons

erhielt Anderson 1936 den Nobelpreis.

Bis zur Entdeckung des Antiprotons vergingen weitere 22 Jahre. Segré und Chamberlain entdeckten 1955 das Antiproton am Bevatron in Berkeley, Kalifornien und erhielten dafür 1959 den Nobelpreis. Ein Jahr später folgte die Entdeckung des Antineutrons durch B. Cork, O. Piccione, W. Wenzel und G. Lambertson ebenfalls am Bevatron.

Heutzutage sind die Anti Partner aller bekannten Teilchen experimentell bestätigt. Antiprotonen werden an den großen Beschleunigeranlagen sogar in großen Mengen produziert und in sogenannten Speicherringen aufbewahrt. Bei (fast) allen physikalischen Reaktionen bei denen Antimaterie erzeugt wird, beobachtet man eine vollkommene Symmetrie¹ zwischen Materie und Antimaterie.

Dies ist im Einklang mit der Theorie, die in der Anfangsphase des Universums ebenfalls eine gleiche Verteilung von Materie und Antimaterie im Universum vorhersagt. In unserer Umwelt existiert aber offensichtlich nur Materie und keinerlei Antimaterie.

Dieser Widerspruch ist eine der wichtigsten offenen Fragestellungen der Physik, der AMS auf den Grund zu gehen versucht, indem AMS gezielt nach natürlichen Vorkommen von Antimaterie sucht.

Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Arten, um Antimaterie zu suchen:

1. Treffen Materie und Antimaterie aufeinander, so vernichten sie sich gegenseitig und zerstrahlen in Energie in Form von γ -Quanten mit einer typischen Energien E_γ (siehe Gleichung 2.4).

$$\begin{aligned} \bar{p}p &\rightarrow n\pi^0 + m(\pi^+\pi^-), \pi^0 \rightarrow 2\gamma, E_\gamma \approx 65 \text{ MeV} \\ e^+e^- &\rightarrow 2\gamma (3\gamma), E_\gamma \approx 0,5 \text{ MeV} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Diese Anihilationsstrahlung müsste im elektromagnetischen Spektrum der kosmischen Strahlung sichtbar sein, falls es in unserer Nähe irgendwo natürliche Antimaterie gibt. Dies ist allerdings nicht der Fall. Ansonsten ist die Photonenstrahlung allerdings kein geeignetes Instrument zur Suche nach kosmischer Antimaterie, da sich das elektromagnetische Spektrum eines reinen Antimaterie Sterns in keiner Weise von dem Spektrum eines Materie Sterns unterscheidet.

2. Es bleibt also die direkte Suche nach Antimaterie Teilchen in der kosmischen Strahlung. Seit der bereits erwähnten Entdeckung des Anti Elektrons (Positrons) in der kosmischen Strahlung 1932 durch Anderson ist klar, dass sich auch natürliche Antimaterie in dieser Strahlung befindet. Um den Einfluss der Erdatmosphäre zu minimieren, wurde Ende der sechziger Jahre damit begonnen, ballongestützte Experimente zur

¹Ausnahme: die leichte CP Verletzung beim Kaon Zerfall

Untersuchung der kosmischen Strahlung durchzuführen. Mit diesen Experimenten wurden seit 1997 ca. 30 Antiprotonen gefunden, jedoch keine schwereren Antikerne. AMS hat während seines zehntägigen Raumflugs diese Antiprotonen Statistik mehr als verdreifacht. Leider geben Positronen und Antiprotonen keinen direkten Hinweis auf das Vorhandensein von natürlicher Antimaterie, da beide -genau wie die künstlich erzeugte Antimaterie in den Teilchenbeschleunigern- durch Wechselwirkungen von hochenergetischen Teilchen aus der kosmischen Strahlung mit dem interstellaren Staub oder den Atomen der Erdatmosphäre entstehen können. Erst der Nachweis eines schwereren Anti Kerns z. B. Anti Helium $\bar{\text{He}}$ würde eindeutige Hinweise auf das Vorhandensein von Regionen mit Antimaterie geben. Allerdings könnte auch $\bar{\text{He}}$ ein Überbleibsel aus der Entwicklung des Universums kurz nach dem Urknall sein. Die Entdeckung noch schwererer Kerne mit $Z > 2$, vorzugsweise sehr stabile Kerne, z. B. Anti Kohlenstoff $\bar{\text{C}}$ oder gar Anti Eisen $\bar{\text{Fe}}$, würde die Existenz von Anti Sternen beweisen, da solche Kerne nicht zufällig durch Nukleosynthese im freien Raum entstehen können, sondern nur durch die thermonuklearen Prozesse im Verlaufe der Entwicklungsgeschichte eines Anti Sterns.

Mit den bisherigen Experimenten zur gezielten Suche nach kosmischer Antimaterie kann man das Vorhandensein von Antimaterie bis zu einem Radius von 10 Mpc^2 ausschließen (siehe Abbildung 2.6). [60, 61] Dies heißt aber nichts anderes, als dass es entweder keine Materie-Antimaterie Symmetrie in unserem Universum gibt, die Theorie also in diesem Punkt falsch liegt, oder aber, falls es doch Antimaterie gibt, diese sehr weit von uns entfernt sein muss.

Das offensichtliche Fehlen von Antimaterie in dem von uns sichtbaren Teil des Universums steht also im direkten Widerspruch zur Urknall Theorie, die ansonsten in vielen Punkten im Einklang mit den experimentellen Befunden steht. Dies veranlasst die Physiker zu Spekulationen über Modelle mit neuer Physik. [84]

Im Jahre 1967 formulierte A. D. Sakharov ein mögliches Lösungsmodell für dieses Dilemma, die sogenannte Baryogenese, die eine Entwicklung des zunächst (kurz nach dem Urknall) symmetrischen Universums in ein unsymmetrisches zulässt.

Für die Baryogenese sind allerdings die folgenden vier Bedingungen unbedingt erforderlich:

1. Baryonenzahl Verletzung

d. h., dass die Anzahl der Baryonen (p, n etc.) keine Erhaltungsgröße

²¹ $1 \text{ Mpc} = 10^6 \text{ parsec} = 3,2615 \cdot 10^6 \text{ Lichtjahre} = 3,0856 \cdot 10^{19} \text{ km}$. 1 parsec ist der Abstand, unter dem man den Radius der Erdumlaufbahn um die Sonne unter einem Winkel von 1 Bogensekunde sieht.

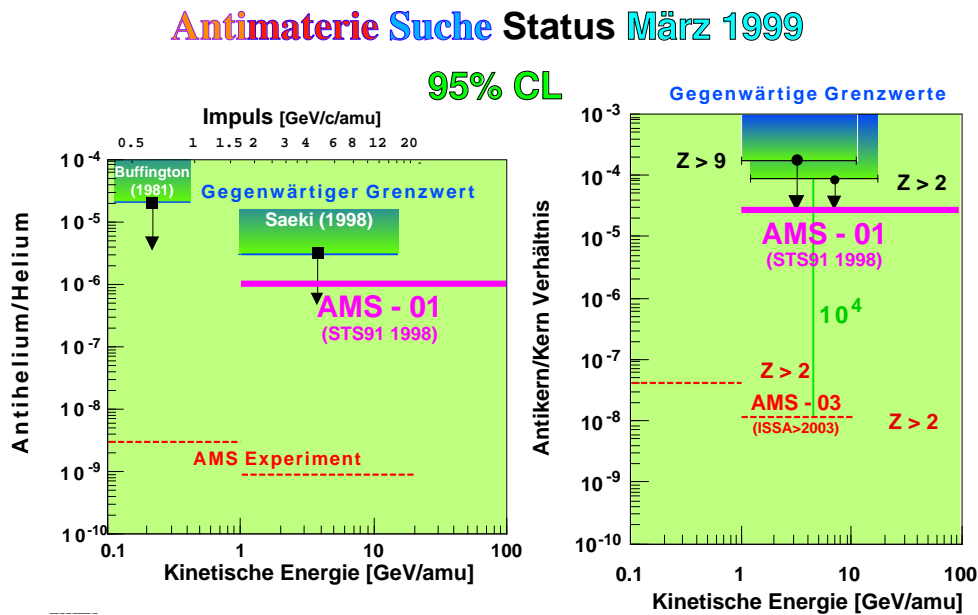


Abbildung 2.6: Gegenwärtige Grenzen zur Suche nach kosmischer Antimaterie

ist, ansonsten kann sich ein anfänglich baryonsymmetrisches Universum niemals zu einem unsymmetrischen entwickeln. Eine Verletzung der Baryonenzahl wurde experimentell allerdings noch nie beobachtet. Es gibt jedoch auch keinen zwingenden theoretischen Grund für die Erhaltung der Baryonenzahl, da keine langreichweitige Wechselwirkung an die Baryonenzahl koppelt. Das Fehlen von Antimaterie ist somit das zur Zeit stärkste experimentelle Indiz für die Baryonenzahl Verletzung. [84]

2. C Verletzung

d. h., dass die Ladungskonjugation C nicht exakt ist, ansonsten kann sich ein anfänglich symmetrisches Universum, das invariant unter C ist, niemals zu einem unsymmetrischen Universum entwickeln, das nicht invariant unter C ist. Die C Verletzung wurde bereits bei der schwachen Wechselwirkung experimentell beobachtet. [84]

3. CP Verletzung

d. h., dass das Produkt aus Ladungs- und Paritätskonjugation keine exakte Symmetrie ist, da sich ein anfänglich CP invariantes Universum niemals zu einem nicht CP invariantem Universum entwickeln kann. Mit der CP-Symmetrie erhält man gleiche Zerfallsraten für Materie und Antimaterie. Somit muss mit CP Symmetrie auch das Verhältnis von Materie zu Antimaterie konstant bleiben. Eine sehr kleine CP Verletzung wurde bereits experimentell beobachtet, und zwar ausschließlich beim Kaon-Zerfall. Der Zerfall des Kaons in ein negativ geladenes Pion, ein Positron und ein Elektron-Neutrino ($K_L^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e$) kommt ca. 0,0033 mal

häufiger vor, als der Zerfall in ein positiv geladenes Pion, ein Elektron und ein Anti Elektron Neutrino ($K_L^0 \rightarrow \pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e$). Bei diesem Zerfall gibt es also ausnahmsweise keine exakte Materie Antimaterie Symmetrie. [121]

4. Kein thermisches Gleichgewicht

ansonsten wäre das anfängliche Gleichgewicht zwischen Materie und Antimaterie erhalten geblieben, da nach dem CPT Theorem die Masse eines Teilchens gleich der Masse seines Anti Teilchen ist. Das CPT Theorem besagt, dass bei gleichzeitiger Ladungs-(Charge)-, Paritäts- und Zeit-(Time)-Konjugation die physikalischen Gesetze unverändert gültig bleiben müssen. [84]

Es existieren einige Lösungsansätze die diesen Sakharov Bedingungen genügen, z. B. Theorien, die ohne kosmische Antimaterie auskommen, so z. B. die **Grand Unified Theories** (GUT's), die eine Vereinheitlichung der starken und der elektroschwachen Wechselwirkung bei sehr hohen Energien $> 10^{14}$ GeV anstreben, oder die elektroschwache Baryogenese, die mit C- und CP-Verletzung auskommt, dafür aber eine anomale elektroschwache Baryonenzahl Verletzung postuliert, die bisher auch noch über keine experimentelle Bestätigung verfügt. [50]

Das größte Problem der Theorien mit kosmischer Antimaterie ist, die offenbar großräumige Trennung (ca. 20 Mpc) von Materie und Antimaterie zu erklären. Ein relativ anerkannter Lösungsansatz ist hier die spontane CP Symmetriebrechung. Alles in allem lässt sich jedoch sagen, dass sowohl die experimentelle, als auch die theoretische Situation bezüglich des Verbleibs der Antimaterie zur Zeit noch äußerst unklar ist. Bisher gab es noch kein hochempfindliches Experiment zur Suche nach Antimaterie im Weltraum.

2.3.2 Dunkle Materie

Ein weiteres Problem der Astrophysik beschäftigt sich mit dem Problem, dass im Universum offenbar wesentlich mehr gravitierende Materie vorhanden sein muss, als wir sehen. [6] Aus Abschätzungen, die sich aus der Dynamik von Galaxien ergeben, macht diese sogenannte „Dunkle Materie“ ca. 90% der Masse im Universum aus. Das Universum ist also dominiert von dieser unsichtbaren Materieform, deren Existenz zwar -wie im folgenden gezeigt wird- bewiesen ist, über deren Zusammensetzung es aber nur spekulative Theorien gibt. Von daher ist die Frage nach der Zusammensetzung der Dunklen Materie neben der Frage nach dem Verbleib der Antimaterie eine weitere wichtige Frage der modernen Astrophysik, der AMS auf den Grund zu kommen versucht.

Abschätzungen der Masse der leuchtenden Materie im Universum ergeben einen Dichteparameter Omega von

$$\Omega_L \approx 0,007 \quad (2.5)$$

Demnach wäre das Universum offen ($\Omega < 1$). Aus der Häufigkeit der leichten Elemente kann man auf der Grundlage der Theorie der Nukleosynthese im Rahmen des Standardmodells einen Wert für den Dichteparameter baryonischer Materie ableiten, der wesentlich größer ist als Ω_L [48, 129, 130].

$$\Omega_{NS} \approx 0,02 \cdot h^{-2} \text{ wobei } h = (0,71 \pm 0,07) \times \begin{matrix} 1,15 \\ 0,95 \end{matrix} \quad (2.6)$$

Das bedeutet, dass im Universum eine große Masse nicht leuchtender baryonischer Materie existieren sollte (z. B. in Form von Schwarzen Löchern³, Gaswolken, braunen und weißen Zwergen, Neutronensternen, Jupiter ähnlichen Objekten etc.). Messungen mit dem Röntgen Satelliten ROSAT zeigen, dass viele Galaxienhaufen große Mengen heißen Gases enthalten. Durch diesen Befund wird das Problem der Diskrepanz zwischen Ω_L und Ω_{NS} etwas entschärft.

Aus der Beobachtung der gravitativen Wechselwirkung der Galaxien und der daraus resultierenden Dynamik kann man mit Hilfe der Newtonschen Mechanik schließen, dass die Massen der Galaxien typischerweise zehnmal so groß sein müssen als wir aufgrund der leuchtenden Materie vermuten. Die Galaxien scheinen also von nicht leuchtenden Halos dunkler Materie umgeben zu sein. Man unterscheidet dabei zwischen zwei unterschiedlichen Annahmen für die dunkle Materie:

- **Kalte dunkle Materie**
(CDM, **C**old **D**ark **M**atter) bestehend aus niederenergetischen Teilchen [30, 31]
- **Heiße dunkle Materie**
(HDM, **H**ot **D**ark **M**atter) bestehend aus hochenergetischen Teilchen [33, 34]

Der Nachweis, dass die dunkle Materie existiert, ist anhand von Messungen der Rotationsgeschwindigkeiten von Galaxien schon erbracht worden. Nach dem dritten Kepller'schen Gesetz sollte die Rotationsgeschwindigkeit einer Spiralgalaxie nämlich mit steigender Entfernung r zum Rotationszentrum mit $1/\sqrt{r}$ abfallen. Genauere Messungen haben aber gezeigt, dass nicht der Fall ist, sondern dass die Rotationsgeschwindigkeiten teilweise sogar weiter mit dem Radius ansteigen, oder zumindest konstant bleiben, und dies über Bereiche, die weit über die leuchtende Scheibe (Arme) der Galaxien hinausragen (siehe Abbildung 2.7).

³Die Baryonenzahl eines schwarzen Loches ist nicht definiert. Nur die elektrische Ladung bleibt beim Kollaps erhalten.

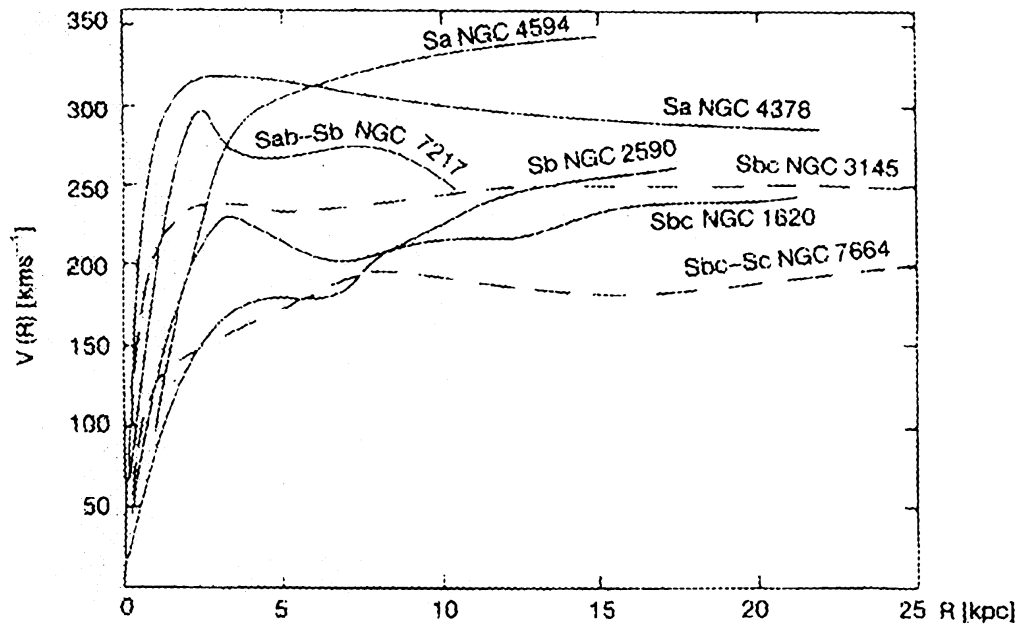


Abbildung 2.7: Rotationsgeschwindigkeiten für sieben Spiralgalaxien [63]

Aus der Dynamik der Galaxien geht also hervor, dass die sichtbar leuchtende Materie höchstens ein Zehntel der gesamten Galaxienmaterie ausmacht. Offen ist also „nur“ noch die Frage nach den Kandidaten für die dunkle Materie.

Berücksichtigt man die beobachtete Häufigkeit leichter Elemente, die mit der Theorie der Nukleosynthese in Einklang steht, so kommt man zu dem Schluss, dass die im Universum nachweisbare dunkle Materie nicht ausschließlich aus baryonischer Materie bestehen kann. Ein großer, vielleicht sogar der größte Teil der Masse unseres Universums kann nicht aus Quarks bestehen. Er muss vielmehr von Teilchen gebildet werden, die aus den ersten Augenblicken des Urknalls übrig geblieben sind, z. B. Leptonen (Neutrinos) oder supersymmetrischen Teilchen.

Denkbar wären z. B. supersymmetrischen Teilchen und/oder WIMP's (**W**eak **I**nteracting **M**assive **P**articles). Dies sind hypothetische, mit Masse behaftete Teilchen, die keinerlei elektromagnetische Wechselwirkung untereinander und mit normaler Materie eingehen. [56] Daher kann man sie nur indirekt über Zerfallsprodukte in Stoßreaktionen nachweisen. Eine solche Reaktion für ein WIMP χ mit einem Anti WIMP $\bar{\chi}$ wäre z. B. der Zerfall in ein Z_0 Boson, welches dann wiederum in ein Quark Antiquark Paar $q \bar{q}$ sowie ein weiteres für diese Reaktion unwichtiges Teilchen x (z. B. Gluon) zerfallen würde, um dann schließlich in ein Proton Antiproton oder Elektron Positron Paar und dem Teilchen x zu zerfallen (2.7). Die Dunkle Materie könnte also durch eine Überhöhung der Antiprotonen- und Positronenrate nachgewiesen werden. [75]

$$\chi + \bar{\chi} \rightarrow Z_0 \rightarrow q + \bar{q} + x \rightarrow f + \bar{f} + x \quad f = \begin{cases} p \\ e \\ \dots \end{cases} \quad (2.7)$$

Auch Neutrinos könnten wesentlich, aber nicht ausschließlich zur dunklen Materie beitragen, falls sie eine Masse besitzen. Neuere Experimente, z. B. *Super Kamiokande* in Japan zeigten anhand von Neutrino Oszillationen, dass die bisher als masselos angenommenen Neutrinos durchaus eine Masse besitzen können. [65]

2.3.3 Kosmische Strahlung

Neben der Suche nach Antimaterie und dunkler Materie kann man mit Hilfe des AMS-Detektors auch die chemische Zusammensetzung und Energieverteilung der kosmischen Strahlung (Abbildung 2.8) genauer als je zuvor messen. Durch den langjährigen extraterrestrischen Einsatz dieses Experiments lässt sich auch die Empfindlichkeit um einen Faktor von 10^3 bis 10^4 gegenüber bisherigen Experimenten erhöhen.

Aus Messungen der Verhältnisse B/C lässt sich die Geschwindigkeit des galaktischen Windes und die Dicke des galaktischen Halo bestimmen.

Die Isotopenverhältnisse bezüglich D/p, $^3\text{He}/^4\text{He}$ und $^{10}\text{Be}/^9\text{Be}$ erlauben Aussagen über die Propagation der kosmischen Strahlung, bzw. darüber, wie lange sich ein kosmisches Strahlungsteilchen in der Galaxis aufhält. [60]

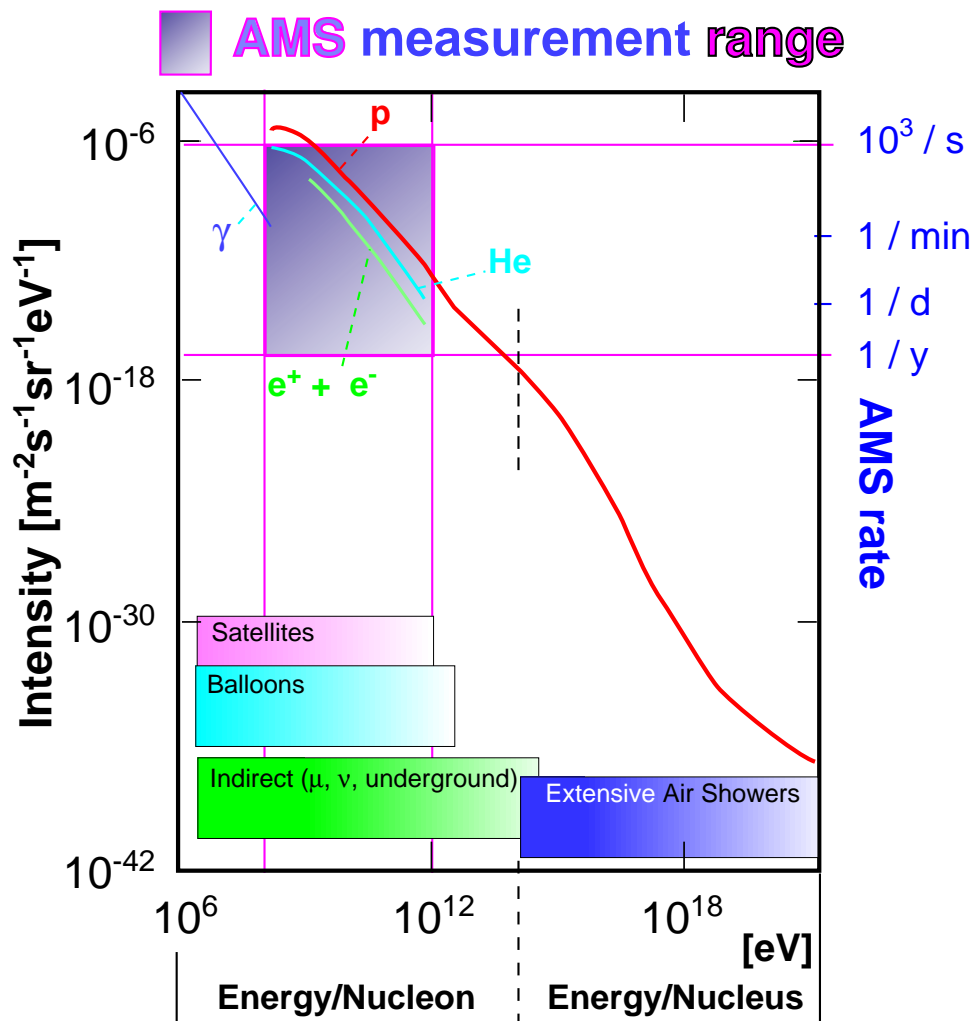


Abbildung 2.8: Das Spektrum der kosmischen Strahlung sowie der Messbereich und die Raten von AMS und gängigen Experimenten

Kapitel 3

Das AMS Experiment

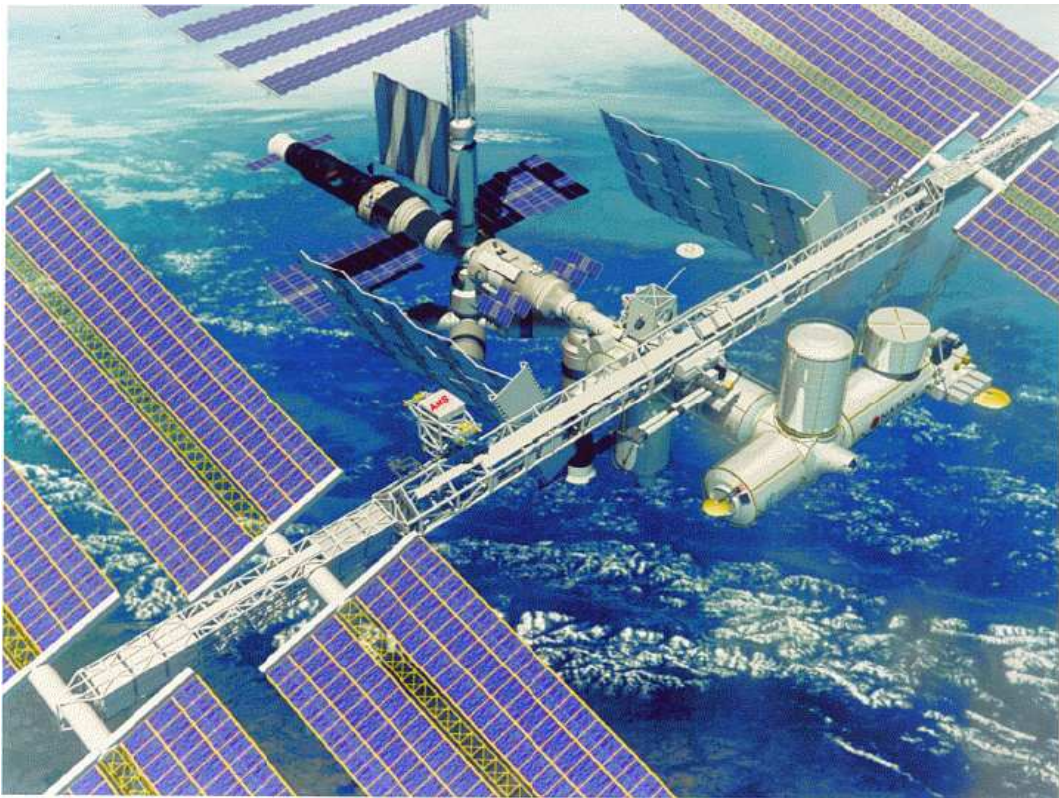


Abbildung 3.1: Der AMS Detektor auf der internationalen Raumstation ISS [123]

Die Abkürzung AMS stand ursprünglich für **Alpha Magnetic Spectrometer**, da das Experiment auf der internationalen Raumstation (siehe Abbildung 3.1) installiert werden soll, die in den Anfängen von AMS zunächst noch **International Space Station Alpha**, oder kurz ISSA hieß. Nachdem die NASA¹ aber 1998 feststellte, dass bereits ein Satellit mit dem

¹National Aero Space Administration

Namen *Alpha* existierte, wurde die ISSA kurzerhand in ISS umbenannt.

Konsequenterweise musste auch AMS umbenannt werden und heißt seitdem **Anti Matter Spectrometer**, so dass die Abkürzung AMS beibehalten werden konnte und gleichzeitig eine der Haupt-Zielsetzungen von AMS, nämlich die Suche nach kosmischer Antimaterie im Namen deutlich wird. Es werden jedoch weiterhin beide Namen synonym benutzt.

Das AMS Experiment wurde in internationaler Zusammenarbeit verschiedener Universitäten, Forschungseinrichtungen und Industriebetriebe entwickelt (siehe Tabelle 3.1). Der Sprecher der AMS-Kollaboration ist der Nobelpreisträger Prof. S. C. C. Ting vom MIT.

Beim AMS Experiment handelt es sich also um einen hochauflösenden Teilchendetektor, der im Jahre 2003 auf der Internationalen Raumstation ISS installiert werden soll und dort -außerhalb der störenden Erdatmosphäre- für ca. 3 Jahre Daten über die Zusammensetzung und Energieverteilung des kosmischen Teilchenflusses sammeln soll (siehe Abbildung 3.1).

Durch den langjährigen Einsatz außerhalb der störenden Erdatmosphäre wird AMS in der Lage sein, die Sensitivität bezüglich des Verhältnisses von Materie zu Antimaterie von derzeit 10^6 (AMS-01 und bisherige Experimente [111]) auf $10^8 - 10^9$ zu verbessern.

Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten und Subdetektoren von AMS beschrieben, die zum Erreichen dieser Ziele notwendig sind.

<p>I. + III. Physikalisches Institut der RWTH-Aachen, Deutschland Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de Physique des Particules, Frankreich Louisiana State University, USA John Hopkins University, USA Chinese Academy of Sciences, China Chinese Academy of Launching Vehicle Technology, China University and INFN Bologna, Italien University of Bucharest, Romänien Massachusetts Institute of Technology, USA National Central University, Taiwan Laboratorio de Instrumentacao e Fisica Experimental de Particulas Coimbra, Portugal University of Maryland, USA INFN Sezione di Firenze, Italien Max-Planck Institut für Extraterrestrische Physik, Deutschland European Organization for Nuclear Research CERN, Schweiz University of Geneva, Schweiz Institut des Sciences Nucleaires Grenoble, Frankreich Helsinki University of Technology, Finland Instituto Superior Técnico Lisboa, Portugal Chung-Shan Institute of Science and Technology, Taiwan Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas Madrid, Spanien INFN Sezione die Milano, Italien Kurchatov Institute Moskau, Russland Institute of Theoretical and Experimental Physics Moskau, Russland University and INFN Perugia, Italien Academia Sinica Taipei, Taiwan Kyungpook National University, Korea University of Turku, Finland Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Schweiz</p>

Tabelle 3.1: Die Mitgliedsorganisationen der AMS Kollaboration

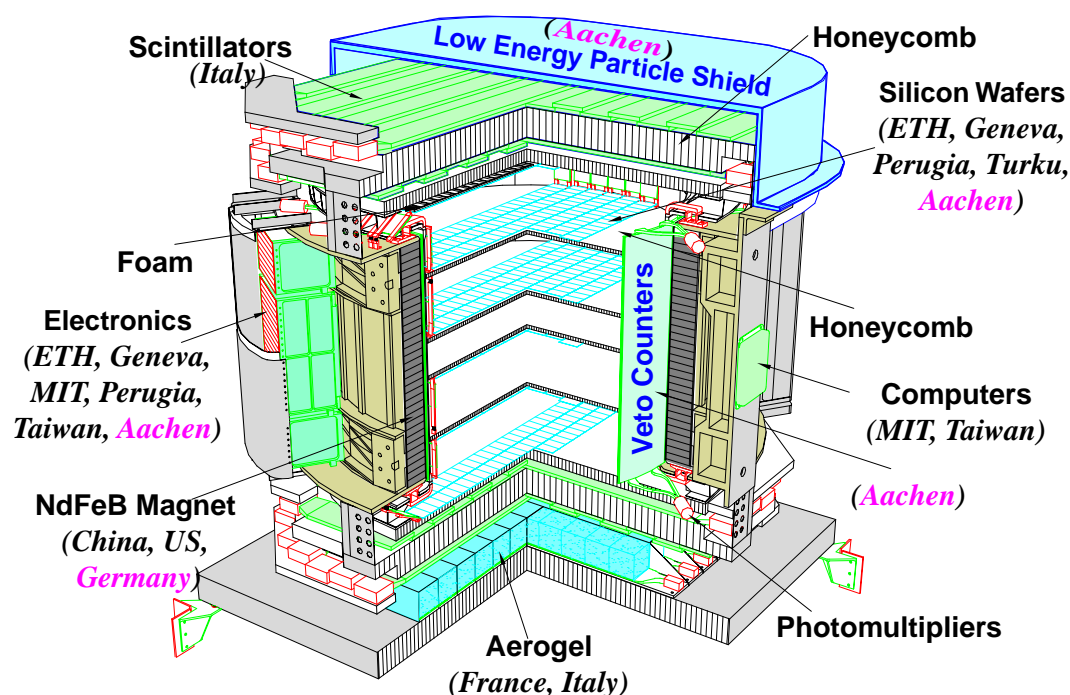


Abbildung 3.2: Der AMS-01 Detektor [122]

3.1 Der Aufbau des AMS-01 Detektors

Der in dieser Arbeit maßgebliche AMS-01 Detektor ist in Abbildung 3.2 dargestellt und besteht aus den folgenden Komponenten:

3.1.1 Die Flugzeitähler (TOF)

AMS ist eingebettet in je 2 Lagen von Plastik Szintillations Zählern (je 2 oben und 2 unten), um den Detektor zu triggern und die Flugzeit der Teilchen durch den Detektor zu bestimmen (**T**ime **O**f **F**light). Insbesondere misst das TOF auch die Flugrichtung der Teilchen, um Teilchen die verkehrt herum, also von unten nach oben durch den Detektor fliegen (=negative Flugzeit) aufzuspüren, damit diese nicht ein Antiteilchen vortäuschen können. Die Zeitauflösung des TOF beträgt 110 ps (siehe Abbildung 3.3). Die Szintillatoren werden über Photomultiplier ausgelesen die besonders unempfindlich bezüglich des hohen Magnetfelds sind. [131]

3.1.2 Die Antizähler (ACC)

Rund um den Spurdetektor befinden sich ebenfalls Szintillatoren zum Detektieren von Teilchen, die schräg (also durch die Seiten) in den Detektor eintreten oder ihn schräg verlassen. Solche Ereignisse können durch Streuung im Magne-

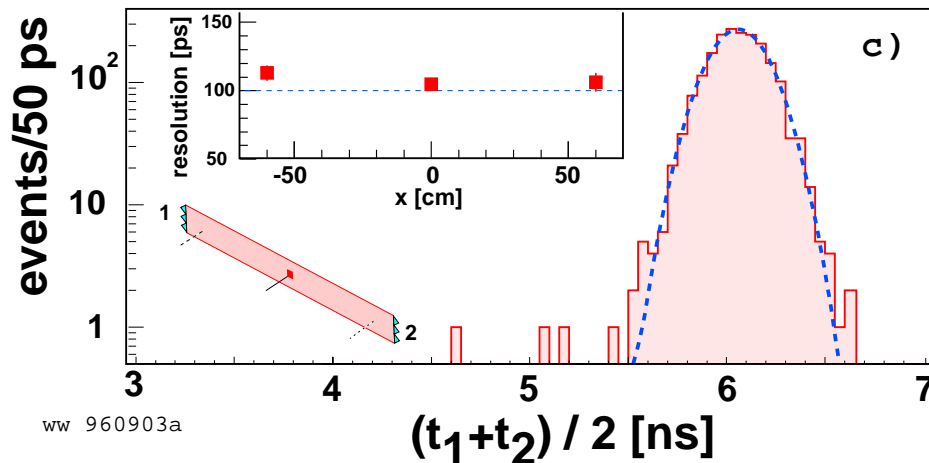


Abbildung 3.3: Zeitauflösung der Flugzeitähler von AMS-01

ten ebenfalls Spuren vortäuschen, die als Antiteilchen fehlinterpretiert werden könnten. Daher werden derartige Ereignisse vom **Anti Coincidence Counter** ausgeschlossen. [132]

3.1.3 Der Aerogel Čerenkov Zähler

Am unteren Ende des AMS-01 Detektors befindet sich ein Silica-Aerogel Schwellen Čerenkov Zähler zum Trennen von Elektronen und Antiprotonen. Die Schwelle liegt bei $p = 3,8 \text{ GeV}/c$ für Antiprotonen. [133]

3.1.4 Der Permanentmagnet

Eine der wichtigsten Komponenten dieses Spektrometers ist der 1,9 t schwere Permanentmagnet (siehe Abbildung 3.4). Er hat einen Durchmesser von 1,114 m und eine Höhe von 0,8 m und liefert ein homogenes Dipolfeld von $B \cdot l^2 = 0,15 \text{ Tm}^2$. Diese für einen Permanentmagneten relativ hohe Feldstärke konnte erst durch neuere NdFeB Legierungen (Vakuumschmelze Hanau, D) erreicht werden. Die Temperaturabhängigkeit des erzeugten Magnetfelds beträgt: [60]

$$\frac{dB}{dT} = 0,15\%/K \quad (3.1)$$

Die konischen NdFeB Blöcke sind in einem doppelwandigen Aluminium Zylinder in 64 Segmenten rund um den Silizium Spurdetektor angeordnet und so metallisiert, dass sie in der Summe ein nahezu homogenes Feld im Inneren des Magneten liefern, während das äußere magnetische Dipolmoment fast verschwindet (siehe Abbildung 3.5). Damit wird verhindert, dass im Welt- raum ein Drehmoment auf AMS wirkt, durch das der Detektor sich durch sein

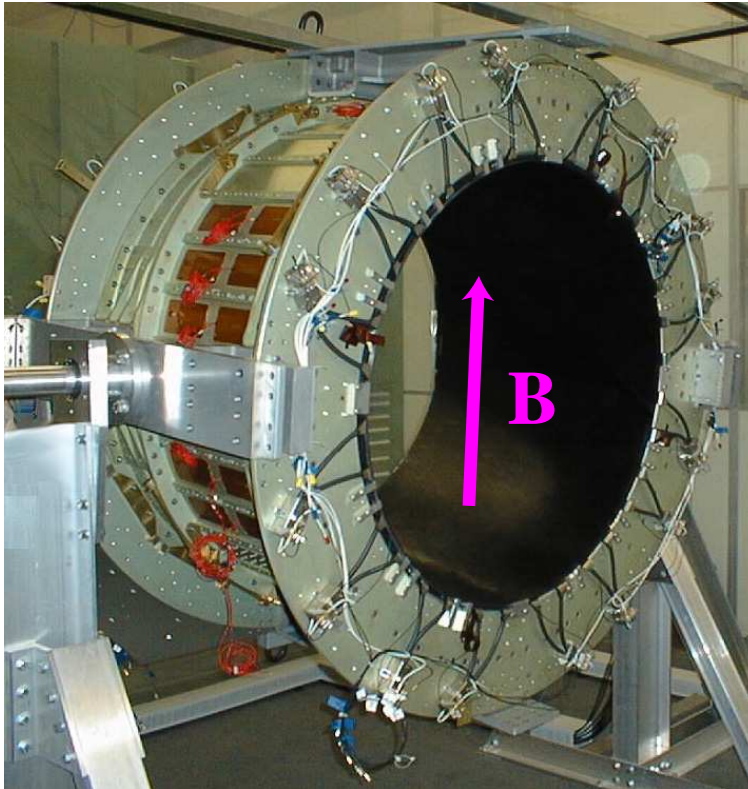
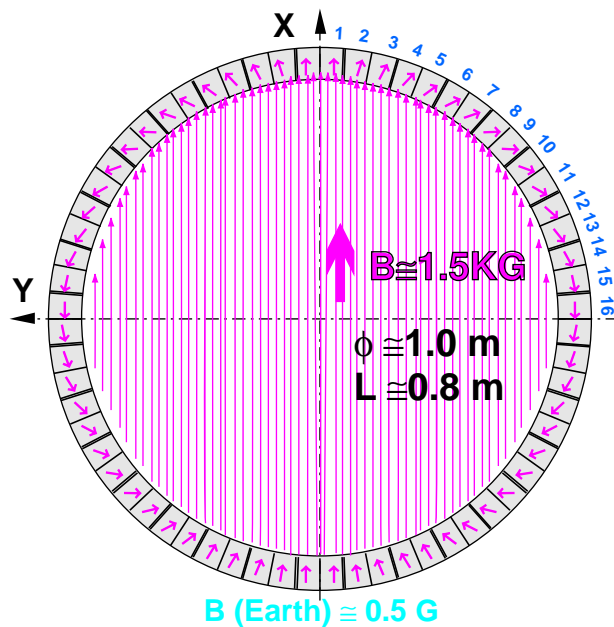


Abbildung 3.4: Der AMS-01 Permanent Magnet



External Magnetic Dipole Moment = 0

Abbildung 3.5: Die Magnetisierung und das B-Feld des AMS-01 Magneten

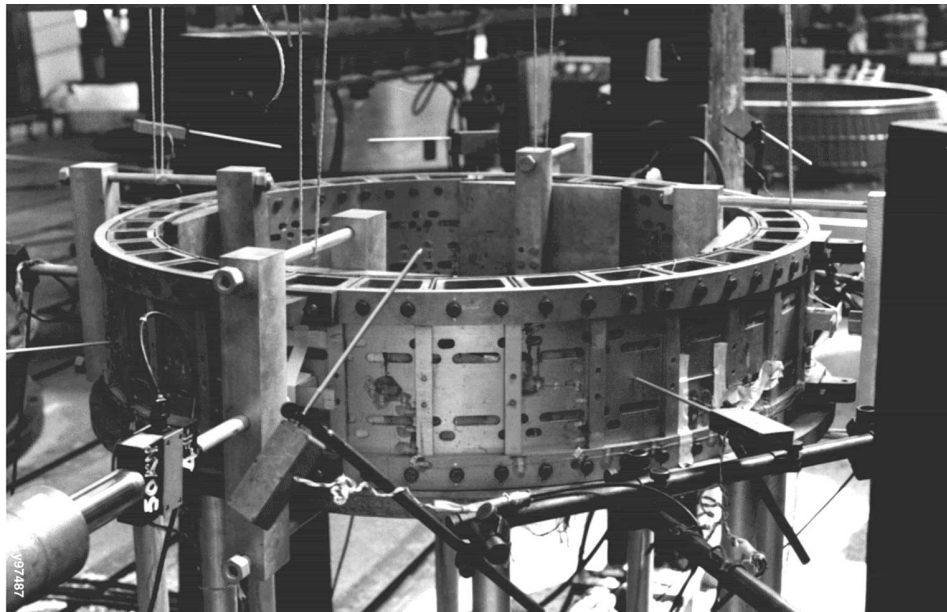


Abbildung 3.6: Eine Scheibe des AMS-01 Magneten beim mechanischen Belastungstest für die Weltraumtauglichkeit

äußeres Dipolmoment ähnlich einer Kompassnadel im Erdmagnetfeld ausrichten würde.

Wie alle Komponenten des AMS Experimentes musste auch der Magnet zahlreichen mechanischen Tests unterworfen werden, die seine mechanische Stabilität auf Weltraumtauglichkeit überprüfen, damit die Beschleunigungen und Vibrationen, die während der Start- und Landephase des Space Shuttles auftreten, ohne Probleme überstanden werden können (siehe Abbildung 3.6).

3.1.5 Der Silizium Spurdetektor von AMS-01

Der Spurdetektor des AMS-01-Experiments -kurz Tracker- besteht aus 6 Ebenen mit insgesamt ca. $2,6 \text{ m}^2$ doppelseitigen Silizium-Detektoren. [74, 75] Die $4,11 \times 7,3 \text{ cm}^2$ großen und $300 \mu\text{m}$ dicken, n-dotierten Silizium Wafer sind zu je 11 - 14 Wafern auf sogenannten „Leitern“ aufgeklebt. Am Ende jeder Leiter befinden sich zwei Hybrids mit je $(10 + 6)$ 64-Kanal-Vorverstärkern zur Auslese der insgesamt 1024 Kanäle pro Leiter (siehe Abbildung 3.7).

Eine Ebene besteht aus 12 solchen Leitern. Diese sind auf einer sehr leichten, aber steifen Platte aus einer kohlefaserverstärkten Honigwabenstruktur montiert (siehe Abbildung 3.8). Durch die Wahl des leichten Materials hat der Spurdetektor eine mittlere Dichte von nur $0,032$ elektromagnetischen Strahlungslängen X_0 . Damit wird die bei der Impulsauflösung (vor allem bei kleinen Impulsen) störende Vielfachstreuung auf ein Minimum reduziert. Die Anordnung der 6 Ebenen ist in Abbildung 3.9 zu sehen. Die z -Anordnung und Kon-

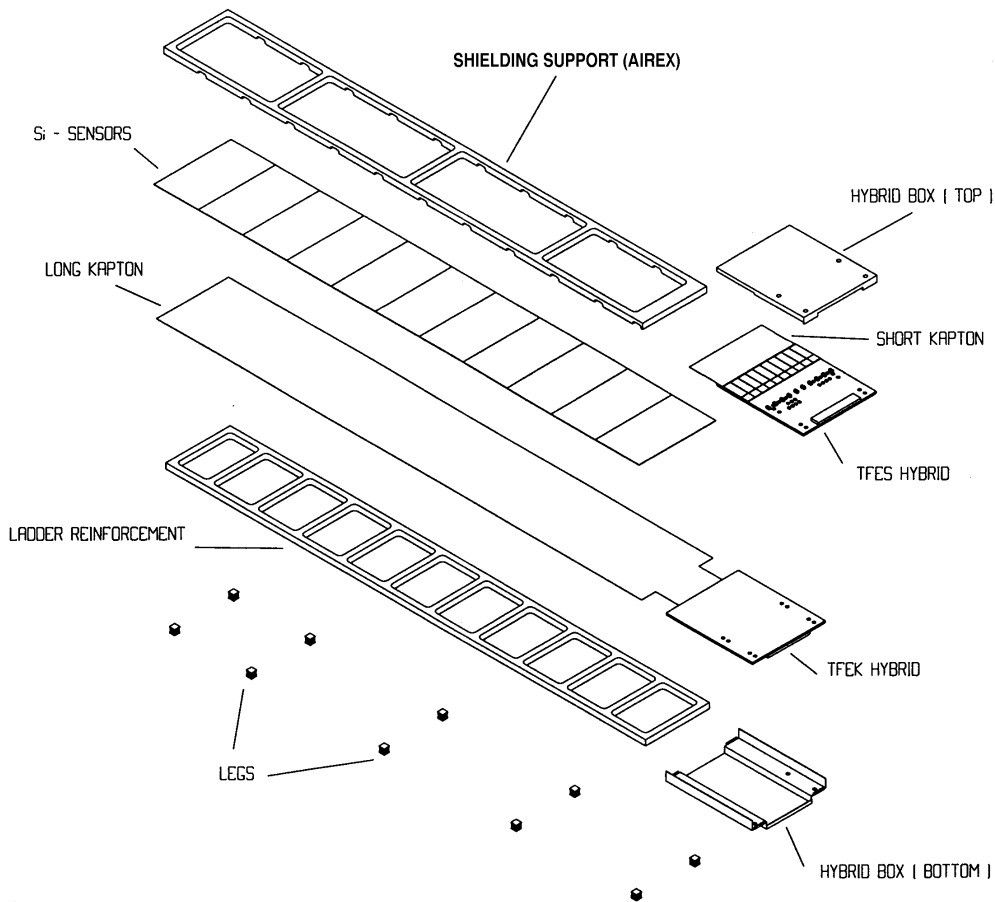


Abbildung 3.7: Eine AMS-01 Leiter mit 12 Silizium Wafern

figuration der 6 Ebenen ist in der Tabelle 3.2 angegeben.

Die Silizium-Wafer sind ein Weiterentwicklung der Silizium Sensoren des L3 Detektors [135]. Sie sind auf der gleichrichtenden Seite, der sogenannten S-Seite alle $27,5 \mu\text{m}$ mit $4 \mu\text{m}$ breiten Implantaten (siehe Abbildung 3.10) versehen, von denen jedes zweite aluminisiert ist, was einen Aluminium-Streifen Abstand von $55 \mu\text{m}$ ergibt. Auf der ohmschen Seite, der sogenannten K-Seite, sind die Auslesestreifen alle $52 \mu\text{m}$ implantiert und aluminisiert (siehe Abbildung 3.11). Die Streifen auf der S-Seite verlaufen genau senkrecht zu denen auf der K-Seite.

Auf beiden Seiten wird nur jeweils jeder 4. Streifen ausgelesen, wobei die nicht aluminisierten Implantate mitgezählt werden. Das ergibt einen Abstand der Auslese-Streifen von $110 \mu\text{m}$ für die S-Seite und $208 \mu\text{m}$ für die K-Seite. Auf der S-Seite liegt jeweils ein nicht ausgelesener „Floating-Streifen“ und 2 Implantate zwischen 2 Auslese-Streifen, während auf der K-Seite 3 Floating-Streifen zwischen 2 Auslese-Streifen liegen. Für die Signalbildung sind allerdings die Implantate maßgeblich.

Die oben beschriebene Geometrie der Silizium Wafer ergibt 640 Auslese-

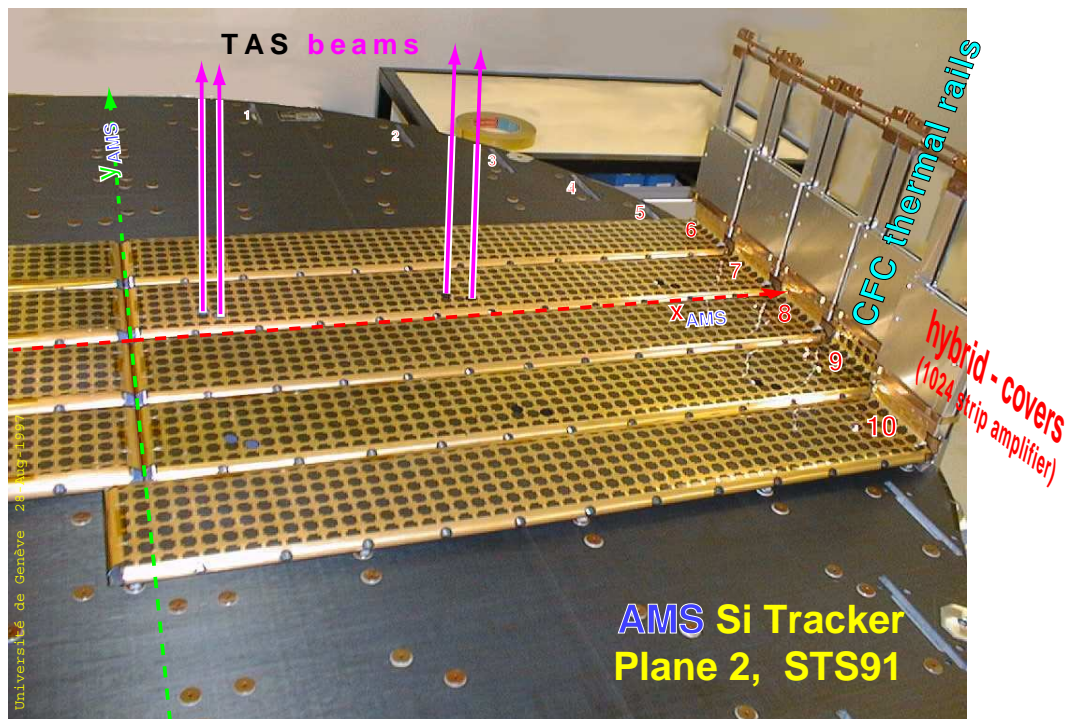


Abbildung 3.8: Ebene 2 des AMS-01 Silizium Spurdetektors bei der Montage der Leitern in Genf

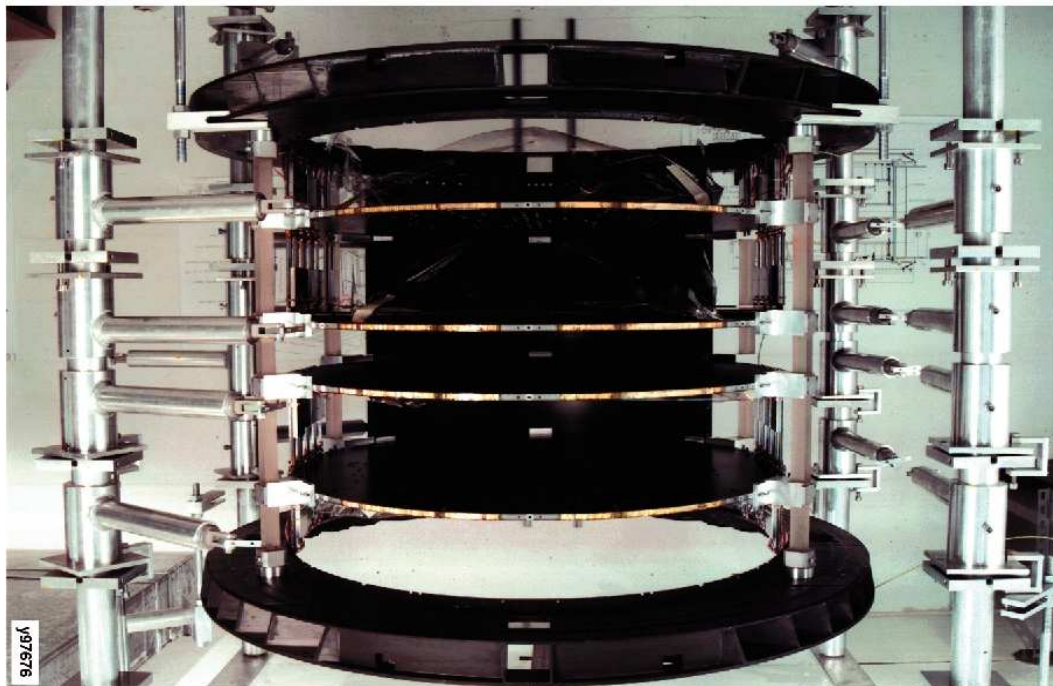


Abbildung 3.9: Die 6 AMS-01 Ebenen aus CFC bei der Montage in Zürich

Ebene	Ø [m]	Dicke [cm]	Dicke [X ₀]	Anzahl Leitern	Si-Sensoren pro Leiter	z [mm]	y-Richtung
1	1,6	4,0	(0,024)	10	15	+510	↓
2	1,0	1,4	0,008	8	12	+214	↑
3	1,0	1,4	0,008	8	12	+78	↑
4	1,0	1,4	0,008	8	12	-78	↓
5	1,0	1,4	0,008	8	12	-214	↓
6	1,6	4,0	(0,024)	10	15	-510	↑

Tabelle 3.2: Konfiguration des Silizium Spur Detektors bei AMS-01

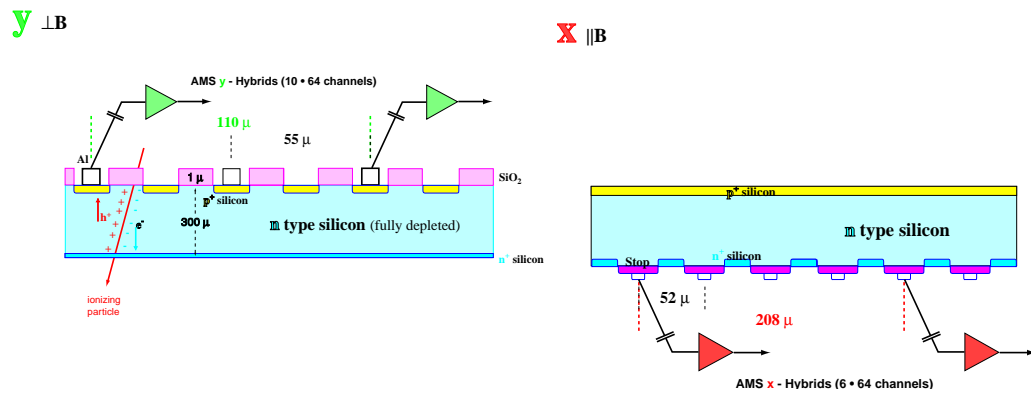


Abbildung 3.10: Das Prinzip der Silizium Wafer bei AMS-01

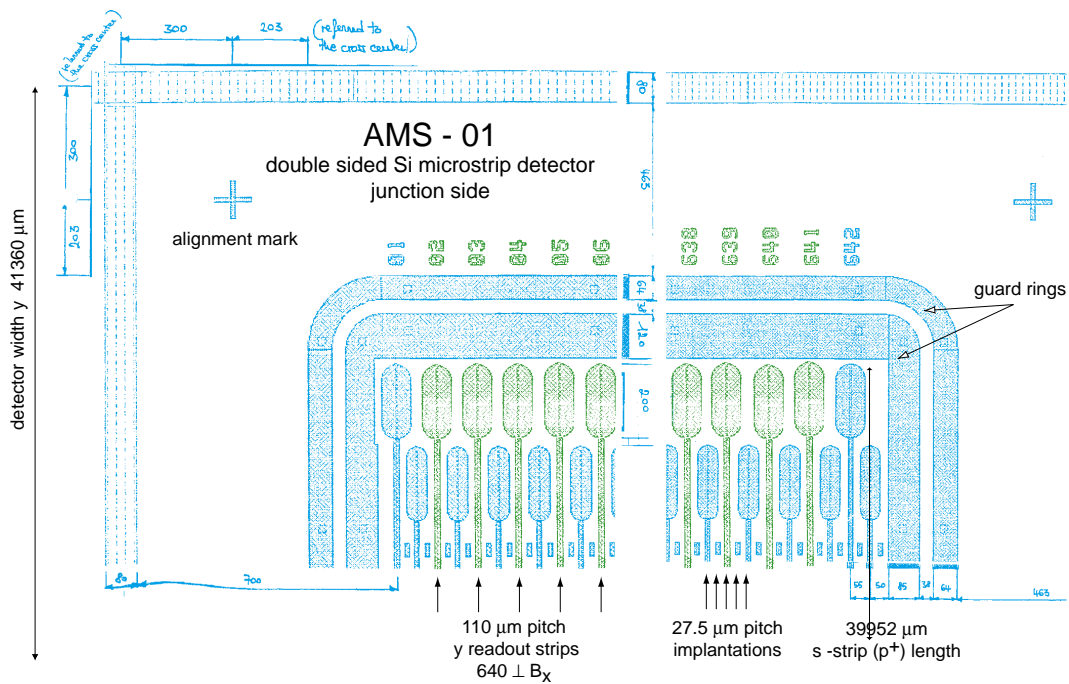


Abbildung 3.11: Layout der Wafer beim AMS-01 Silizium-Detektor

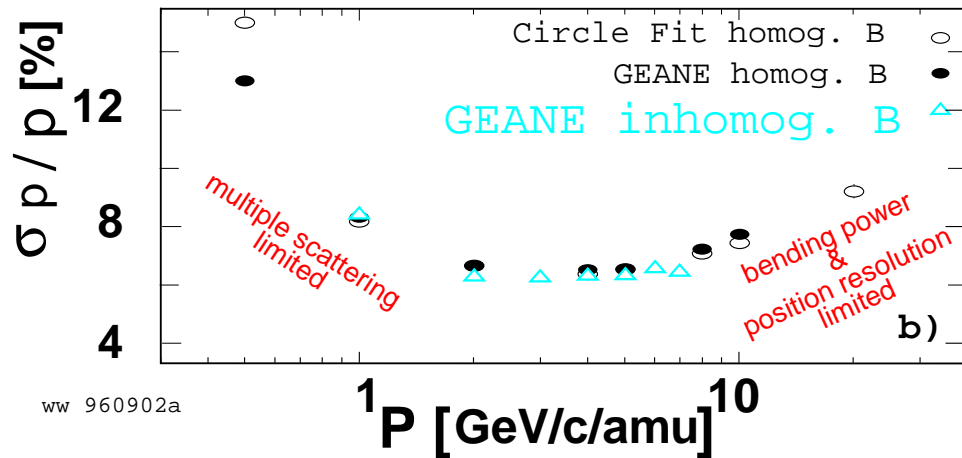


Abbildung 3.12: Impulsaufösung des Silizium Spurdetektors von AMS-01

Streifen pro Leiter auf der S-Seite, parallel zur Leiter und zur Messung der y -Koordinate der Teilchenspuren durch den Detektor und 384 Auslese-Streifen pro Leiter auf der K-Seite, senkrecht zur Leiter und zur Messung der x -Koordinate der Teilchenspuren durch den Detektor. Die S-Seite hat einen engeren Streifen-Abstand da die y -Koordinate des Experiments die für die Impulsbestimmung interessantere Koordinate, senkrecht zum Magnetfeld ist (vgl. Kapitel 7.1).

Mit dieser Konfiguration erreicht der Silizium Spurdetektor von AMS-01 eine Akzeptanz von ca. $0,32 \text{ m}^2\text{sr}$ (für volle Belegung von AMS-02 ca. $0,6 \text{ m}^2\text{sr}$) und eine Impulsaufösung von $\Delta p/p \approx (6 - 12\%)p$ in einem Impulsbereich von $0,2$ bis $500 \text{ GeV}/\text{amu}^2$. Bei niedrigen Impulsen ist die Impulsaufösung durch die Vielfachstreuung beschränkt und bei hohen Impulsen durch die Stärke des Magnetfelds (siehe Abbildung 3.12).

²atomic mass unit

3.2 Der Aufbau des AMS-02 Detektors

Der sogenannte AMS-01 Detektor ist ein vorläufiges Modell des eigentlichen AMS-Detektors, der voraussichtlich im Jahr 2003 auf der internationalen Raumstation ISS installiert wird. Mit AMS-01 sollte hauptsächlich die technische Machbarkeit eines Teilchendetektors im Weltraum, anhand des 10-tägigen Shuttle Flugs STS-91 untersucht werden. [116]

Der endgültige AMS-Detektor hat z. Zt. die Bezeichnung AMS-02 und ist in Abbildung 3.13 dargestellt. Die Hauptunterschiede zu AMS-01 liegen in den folgenden Punkten:

- Anstatt des Permanentmagneten, der bei AMS-01 verwendet wurde, kommt bei AMS-02 ein supraleitender Magnet zum Einsatz. Dieser supraleitende Magnet wiegt ca. 1 t und erzeugt ein magnetisches Feld von $B \cdot l^2 = 0,862 \text{ Tm}^2$, also fast sechs mal so viel, wie bei AMS-01 ($B \cdot l^2 = 0,15 \text{ Tm}^2$). Nach Gleichung 7.5 geht dies linear in die Impulsauflösung des Detektors ein, so dass die zu erwartende Impulsauflösung ebenfalls sechs mal so gut sein wird wie bei AMS-01.
- Oberhalb des oberen Flugzeitzählers (TOF) wird ein Übergangsstrahlungs-Detektor (TRD, **T**ransition **R**adiation **D**etektor) [70] zur Trennung von hochenergetischen ($10 \text{ GeV} \leq E \leq 300 \text{ GeV}$) Protonen und Positronen bzw. Antiprotonen und Elektronen montiert. Diese ergeben im Silizium Spurdetektor aufgrund ihres hohen Impulses trotz des höheren Magnetfelds fast gerade Spuren, deren Krümmung/Impuls daher nur ungenau bestimmt werden kann. Die Teilchen unterscheiden sich jedoch in ihrem γ -Faktor. Bei einem hohen γ -Faktor werden bei einem Durchgang durch eine Grenzschicht Photonen (Übergangsstrahlung) emittiert, die vom TRD erfasst werden. Der TRD besteht aus 20 Lagen. Daher können die TRD Signale zusätzlich zur Bestimmung der Flugrichtung und der Spurfindung benutzt werden, und somit die Impulsauflösung des Detektors verbessern, wenn TDC's eingesetzt würden. Außerdem bietet der TRD ein weiteres Triggersignal zusätzlich zu dem des TOF.
- Oberhalb des TRD ist außerdem ein **S**ynchrotron **R**adiation **D**etektor (SRD) [69] zum Nachweis sehr hochenergetischer Elektronen im TeV Bereich geplant. Die Synchrotron Strahlung entsteht, wenn geladene Teilchen beschleunigt werden, wie es z. B. bei Elektronen im Erdmagnetfeld der Fall ist.
- Unterhalb des Čerenkov Zählers (RICH) befindet sich noch ein elektromagnetisches Kalorimeter (EMC) in Form eines Sandwich Kalorimeters, zur Bestimmung der elektromagnetischen Energie.

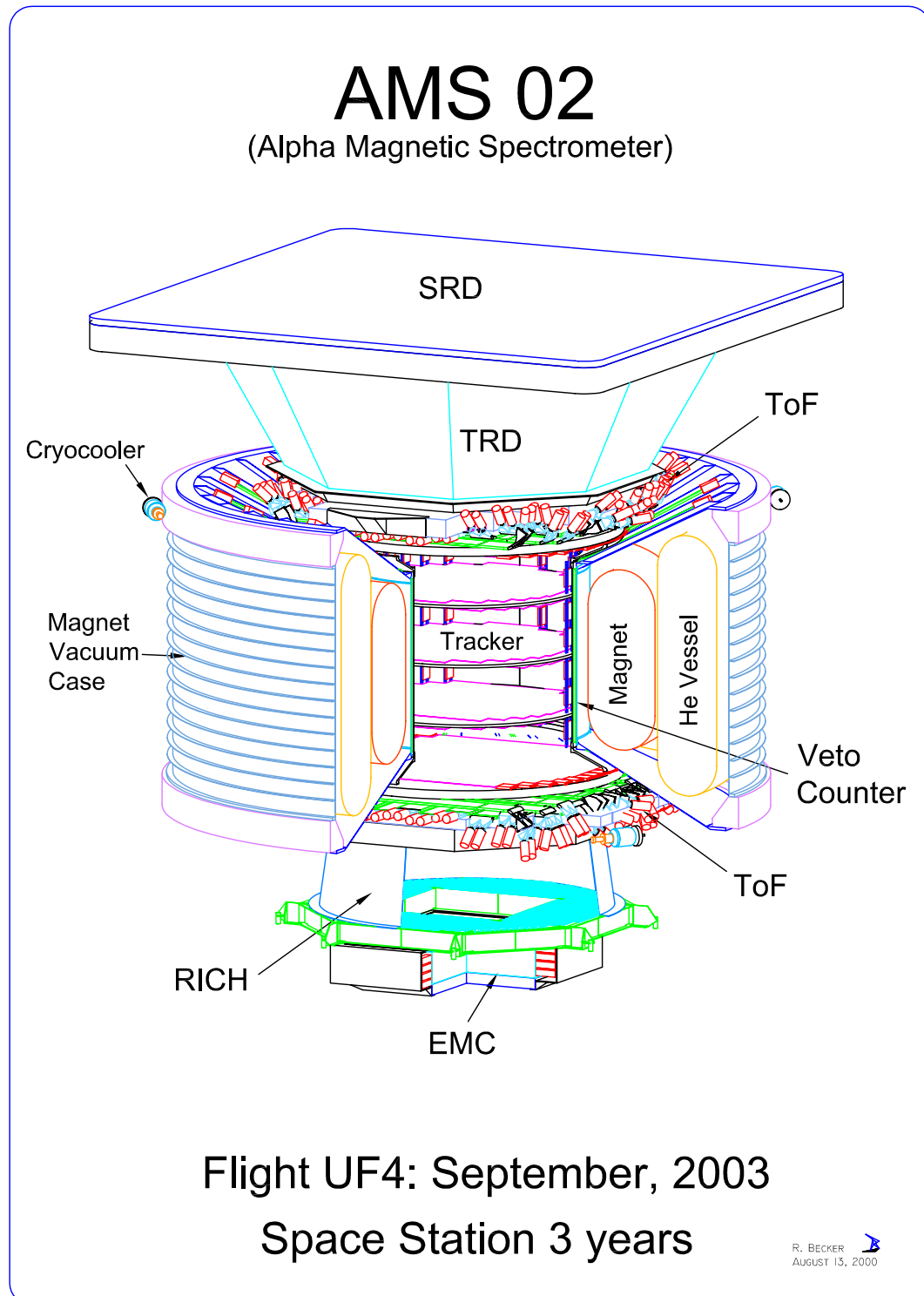


Abbildung 3.13: Der AMS-02 Detektor [122]

- Der Silizium Spur Detektor (Tracker) besteht nicht mehr aus sechs sondern aus acht Lagen Silizium Sensoren. Außerdem sind die Ebenen voll mit Silizium Sensoren belegt und nicht wie bei AMS-01 nur zu 50%.
- Das **Tracker Alignment System** TAS wird mit zusätzlichen Laserstrahlen ausgerüstet werden (voraussichtlich insgesamt 10), um so genauere Alignmentdaten über den zentralen Bereich des Silizium Spur Detektors zu erhalten. Die Laser Intensität wird nicht mehr ausschließlich über die Pulsdauer bestimmbar sein, sondern zusätzlich auch über den Laserstrom, um so einen höheren dynamischen Bereich zur Verfügung zu haben, den man -wie die Messungen bei AMS-01 gezeigt haben- zum Erreichen der weiter entfernten Ebenen braucht. Außerdem werden die Laserstrahlen nicht mehr nur von unten, sondern von beiden Seiten des Detektors (oben und unten) eingespeist. Auf diese Weise muss jeder Strahl nur noch 4 Ebenen durchqueren. Dadurch werden die Dynamikprobleme, die durch die Abschwächung des Laserlichts beim Durchgang durch die einzelnen Silizium Sensoren in den entfernten Ebenen entstehen, zusätzlich entschärft (vgl. Kapitel 4.3.1.1).

Kapitel 4

Das IR Laser Positions-Kontroll-System TAS

Damit AMS fähig ist, sowohl die Impulse von leichten, niederenergetischen Teilchen, wie z. B. Elektronen oder Positronen, als auch die Impulse von schweren (Anti-) Kernen, wie z. B. Helium, Kohlenstoff oder sogar Eisen genau zu erfassen, benötigt AMS einen großen dynamischen Bereich für die Impulsmessung von 0,2 bis 500 GeV/amu mit einer Impulsauflösung von $\Delta p/p \approx (6 - 12\%)p$ in einem Impulsbereich von 0,2 bis 500 GeV/amu¹ (vgl. Kapitel 3.1.5).

Um diese gewünschte Impulsauflösung zu erreichen, muss der Silizium Spurdetektor über eine Ortsauflösung von besser als 30 μm verfügen, da der Impuls bei AMS über die Auslenkung der Teilchenbahn im Magnetfeld gemessen wird (vgl. Kapitel 7.1 Abbildung 3.12).

Auch wenn man mit den Silizium Detektoren prinzipiell eine Ortsauflösung von weniger als 10 μm erreichen kann, so muss man dennoch die Position der Sensoren innerhalb des Magneten genau kennen, um diese Messgenauigkeiten für die Spurmessungen zu erreichen. Bei hochenergetischen Teilchen wird die durch das Magnetfeld erzeugte Krümmung der Teilchenbahnen so klein, dass kleinste mechanische Verschiebungen der Sensoren von ca. 30 μm zu Fehlmessungen führen können.

Bei den starken Beschleunigungen und Vibrationen, denen der AMS Detektor beim Start des Space Shuttles ausgesetzt ist, sind derartige mechanische Verformungen durchaus möglich. Außerdem können die starken Temperaturschwankungen von 0°C bis zu 30°C, denen der AMS Detektor im Orbit unterliegt, ebenfalls leicht zu solchen Verformungen der Nachweisstruktur führen.

Eine unabhängige Kontrolle dieser Verformungen ist auch mittels kosmischer Teilchen möglich (vgl. Kapitel 7). Aus Gründen der für die Weltraumfahrt unbedingt notwendigen Redundanz ist aber ein zweites, unabhängiges Überwachungssystem wünschenswert. Zu diesem Zweck wurde das Tracker

¹atomic mass unit

Alignment System kurz TAS entwickelt, dessen Konzeption und Entwicklung ein zentraler Punkt dieser Arbeit ist und dessen Eigenschaften in dem folgenden Unterkapitel behandelt werden.

4.1 Anforderungen an das TAS

Aus den oben genannten Überlegungen ergibt sich das folgende Anforderungsprofil für das **Tracker Alignment System TAS**:

- **Ortsauflösung < 30 μm**

Die mechanische Stabilität und die Ortsauflösung des TAS müssen besser als 30 μm sein, da ansonsten die für den Tracker erforderliche Positionierungsgenauigkeit von 30 μm für Teilchenspuren nicht erreicht werden kann (vgl. Kapitel 7.1).
- **Weltraumtauglich**

Das TAS muss weltraumtauglich sein, d. h. insbesondere:

 - **Thermo Vakuum stabil**

Das TAS muss sowohl unter den Temperaturschwankungen im Orbit (0°C - 30°C) als auch im Vakuum des Weltraums einwandfrei funktionieren. Insbesondere dürfen laut NASA Anforderung für die Weltraumtauglichkeit bei der Realisierung des TAS keinerlei Materialien verwendet werden, die im Vakuum ausgasen (wie z. B. die meisten Kunststoffe etc.), da solche Ausgasungen benachbarte, eventuell optisch empfindliche Systeme beeinträchtigen können, indem sie sich auf diesen wieder ablagern.
 - **Vibrationsfest**

Bei Start und Landung des Space Shuttles treten starke Beschleunigungen (ca. 1,8 g) und vor allem enorme Vibrationen auf. Diese dürfen dem TAS keinen Schaden zufügen. Daher muss die mechanische Stabilität des TAS laut NASA Anforderungen für Beschleunigungen bis 6 g ausgelegt sein. [134] Insbesondere muss laut NASA Anforderung sichergestellt sein, dass sich durch die auftretenden Vibrationen keine Teile (z. B. Schrauben, Muttern etc.) lösen können, da diese -schwerelos im Weltraum herumschwirrend- lebenswichtige Systeme gefährden können.
- **Wartungsfrei**

Da man im Weltraum -im Gegensatz zu erdgebundenen Experimenten- nicht einfach an den Detektor heran kann, um defekte Bauteile auszuwechseln, müssen die Geräte in der Weltraumfahrt wartungsfrei konzipiert werden.

- **kompakte Bauform**

In der sogenannten „Payload Bay“ des Space Shuttles herrscht nur ein begrenzter Platz, auf dem alle Systeme von AMS untergebracht werden müssen. Kompaktheit ist daher ein wichtiges Gebot bei der Konzeptionierung der einzelnen Komponenten.

- **Geringes Gewicht**

Jedes Kilogramm im Weltraum kostet im Transport ungefähr 20.000 DM. Daher zählt bei der Weltraumfahrt jedes Gramm, um Kosten zu sparen.

4.2 Realisierung und Aufbau des TAS

Zur Erfüllung der oben genannten Anforderungen an das **Tracker Alignment System TAS** wurde das folgende Konzept entwickelt:

4.2.1 Das Lasersystem

Das **Tracker Alignment System TAS** für AMS-01 besteht aus 4 Infrarot Laserstrahlen mit einer Wellenlänge von $\lambda = 1083$ nm, die die sechs Ebenen des Silizium Spur Detektors von AMS-01 geradlinig durchleuchten und in jeder Ebene ein Signal hinterlassen, das zur Positionsbestimmung herangezogen werden kann (siehe Abbildung 4.1).

Das Laserlicht wird von 2 Laserdioden erzeugt, die in der sogenannten TAS-Box (Abbildung 4.2) sitzen. In dieser Box wird das Laserlicht der zwei Dioden in zwei Monomode Fasern eingekoppelt. Die Fasern durchlaufen dabei einen passiven Splitter, der das Laserlicht auf zwei miteinander verschmolzene Glasfasern aufteilt und so aus den ursprünglich zwei Strahlen vier macht.

Über diese Glasfasern wird das Laserlicht von der TAS-Box, die an der Außenseite von AMS-01 montiert ist, durch einen Schacht in der Ebene 6 (die unterste Ebene des Detektors) in das Innere des Detektors transportiert. In diesem Schacht sitzt der sogenannte „Beamportholder“, eine Röhre aus CFC (**C**arbon **F**ibre **C**omposite), einem äußerst stabilen und leichten Kohlefaserverbundstoff, der sich vor allem durch einen extrem niedrigen Temperatur Ausdehnungs Koeffizienten auszeichnet (siehe Abbildung 4.3).

Dieser Beamportholder trägt die vier Auskoppelungs Optiken in Fassungen aus Neusilber, die die vier Laserstrahlen auf einen Durchmesser von ca. 1 mm mit einer Strahldivergenz von weniger als 0,8 mrad fokussieren und parallel in den Silizium Spur Detektor von AMS-01 hinein strahlen. Die vier Laserstrahlen sind in 2 Paaren angeordnet:

- ein Strahlenpaar am „linken“ Ende des Beamportholders, in der Nähe des Zentrums des Silizium Spurdetektors, im folgenden **U1/O1** genannt,

AMS tracker IR Laser Alignment

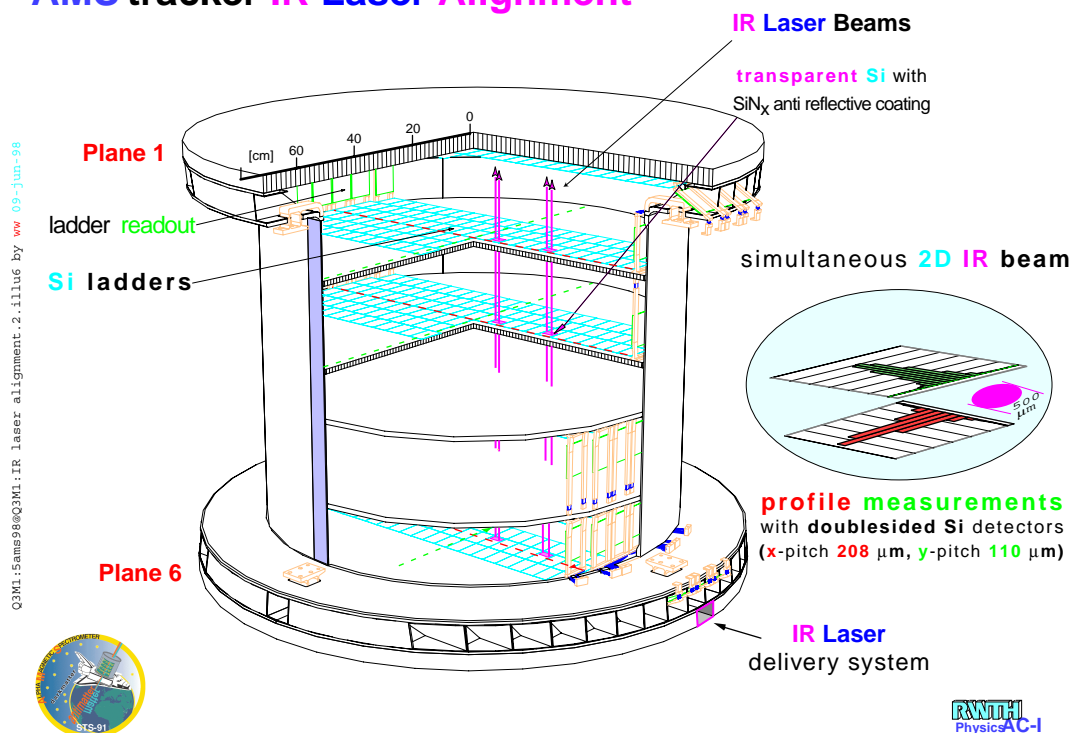


Abbildung 4.1: Die prinzipielle Funktionsweise des TAS

und

- ein Strahlenpaar in der Mitte des Beamportholders, im folgenden **U2/O2** genannt.

Außerdem gibt es noch ein drittes Paar Optiken am rechten Ende des Beamportholders, am Rand des Silizium Spurdetektors (**U3/O3**), das allerdings nicht von der TAS-Box mit Laserlicht versorgt wird. Die zugehörigen Monomode Fasern enden in sogenannten F-Connectoren an der Außenseite des AMS-01 Detektors, um sie zu Testzwecken mit einem externen Laser zu befeuern.

Der Beamportholder ist unterhalb der Ebene 6 an jedem Ende mit einem Kugelgelenk aus Titan befestigt. Mittels einer an jedem Ende befindlichen Schraube kann die Neigung des Beamportholders in φ und θ eingestellt werden, um so die Laserstrahlen möglichst senkrecht zur Ebene 6 in den Detektor einzustrahlen (vgl. Kapitel 4.4).

4.2.2 Die Alignment Sensoren

Damit die 4 Infrarot Laserstrahlen auch alle 6 Ebenen des Silizium Spur Detektors durchdringen können, muss dafür gesorgt werden, dass der Detektor an den Stellen, an denen die Laserstrahlen den Detektor durchqueren, optisch

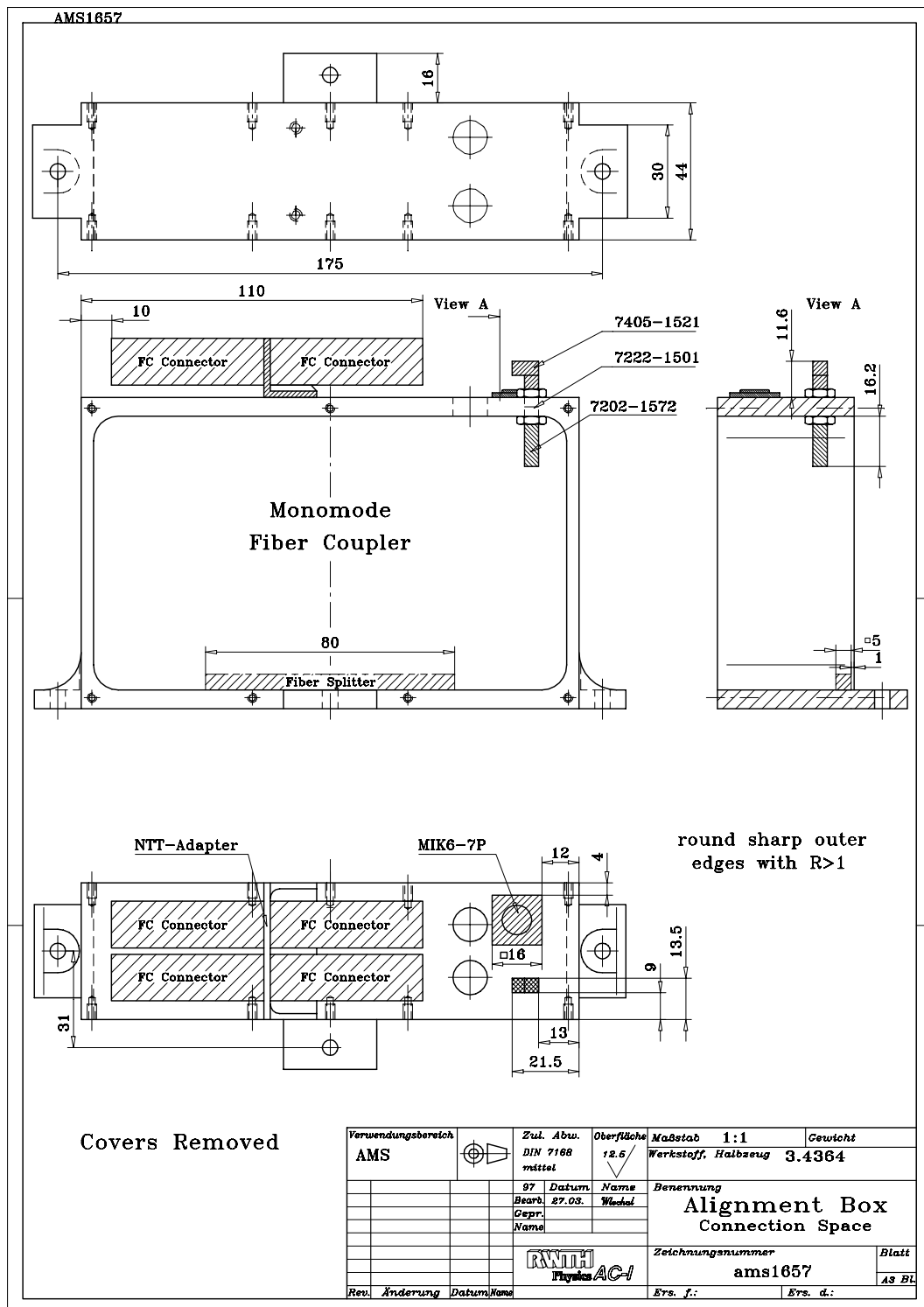


Abbildung 4.2: Der Aufbau der TAS-Box

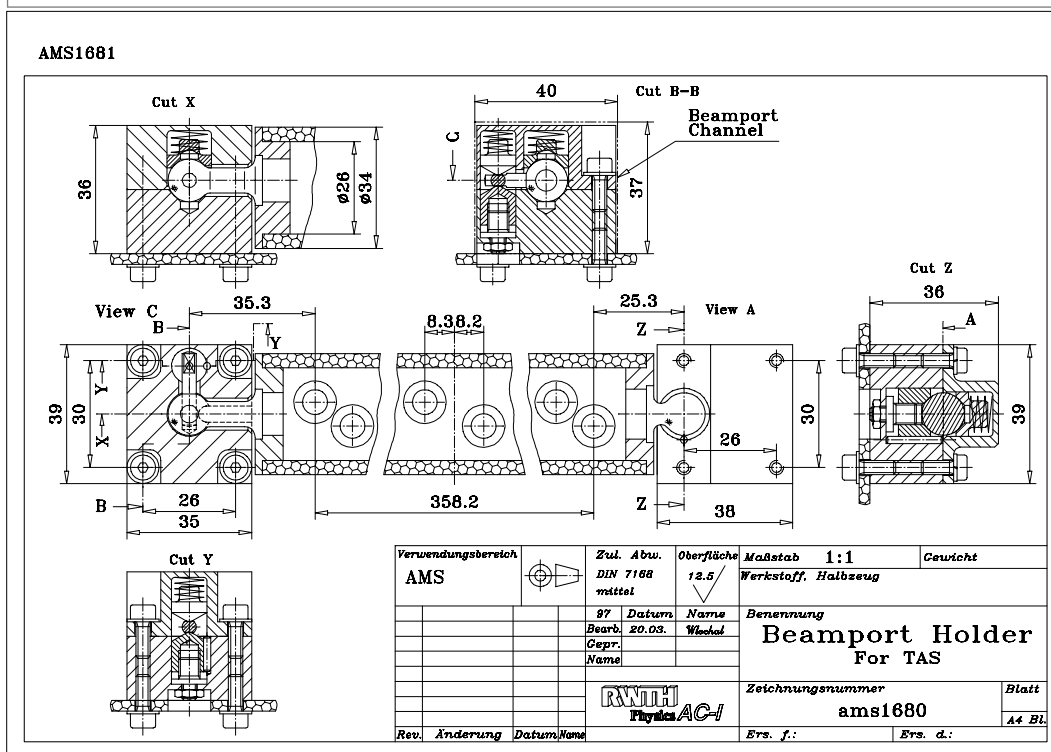
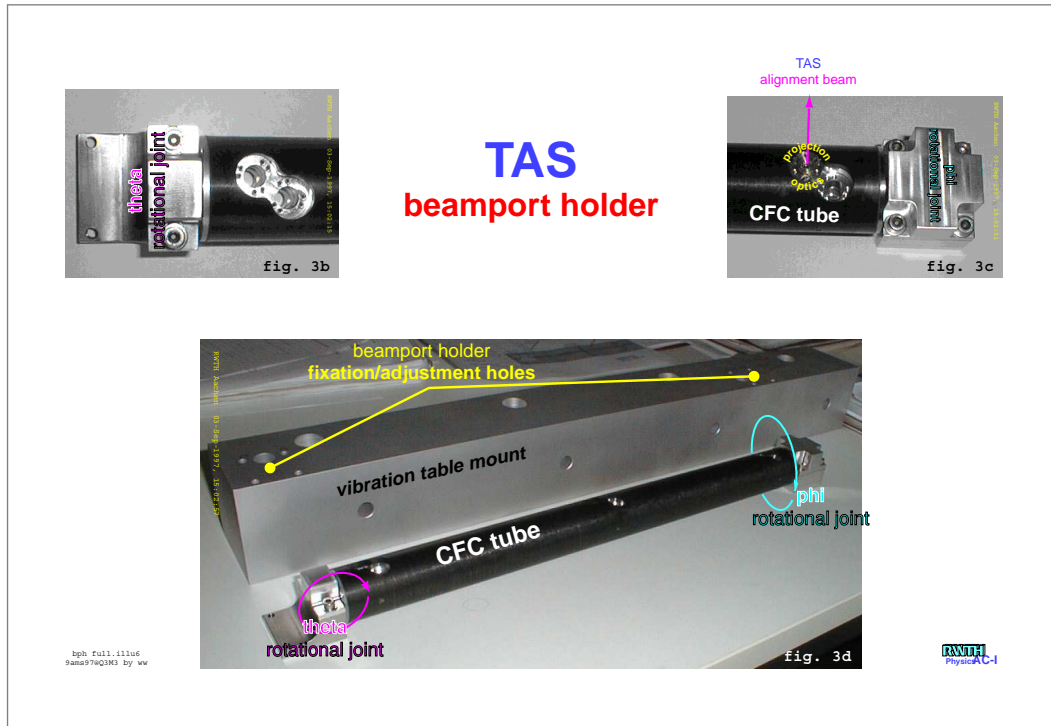


Abbildung 4.3: Der Beamportholder des TAS

durchlässig ist. Dies setzt zum einen Löcher an den entsprechenden Stellen in der mechanischen und elektronischen Struktur des Detektors voraus, zum anderen aber auch eine gewisse Transparenz der Silizium Wafer für das infrarote Laserlicht.

Die Löcher in der mechanischen Struktur sind sehr einfach realisierbar. Hier kommt es nur darauf an, dass die Löcher tatsächlich überall an der richtigen Stelle sitzen, da schon ein geringer Versatz von einigen Millimetern eine totale Blockierung der Laserstrahlen ab dieser Stelle verursachen könnte.

Nicht ganz so trivial ist diese Angelegenheit dagegen bei den Löchern in der elektronischen Struktur. Da die Silizium Wafer des AMS-01 Spurdetektors beidseitig ausgelesen werden, müssen die Signale der Auslestreifen auf der S-Seite (zur Messung der y -Koordinate) über ein sogenanntes Kaptonkabel zu der Auslese Elektronik auf den Hybriden am Ende einer jeden Leiter geführt werden.

Dieses Kaptonkabel besteht aus einer elektrisch hochisolierenden Kaptonfolie, auf die eine dünne, elektrisch leitende Kupferschicht aufgetragen ist. Aus der Kupferschicht werden in einem photographischen Verfahren ca. $50\ \mu\text{m}$ schmale Streifen heraus geätzt, damit auf diese Weise unabhängige Leiterbahnen für die Signalübertragung eines jeden Auslestreifen der Silizium Sensoren zur Verfügung stehen. Die Kaptonkabel sind auf der K-Seite der Silizium Wafer aufgeklebt und führen die Signale der Auslestreifen in einer Art Zickzack Kurs zur Auslese Elektronik am Ende der Leiter. Fast die kompletten Silizium Wafer sind also mit dem Kaptonkabel belegt.

Sowohl das Kapton, als vor allem auch die auf dem Kapton befindlichen Kupferstreifen sind für das infrarote Laserlicht des TAS undurchsichtig. Daher müssen auch im Kaptonkabel Löcher an den Stellen, an denen die Laserstrahlen durch den Silizium Spur Detektor hindurchgehen, eingefügt werden, um die Laserstrahlen nicht zu blockieren. Damit die elektronische Signalübertragung an diesen Stellen jedoch nicht unterbrochen wird, müssen die entsprechenden Kupfer Leiterbahnen in einer engeren Geometrie um diese Löcher im Kaptonkabel herumgeführt werden (siehe Abbildung 4.4).

Leider konnten bei AMS-01 aus Zeitgründen nicht alle Alignment Sensoren mit dem modifizierten Kaptonkabel ausgestattet werden. So sind die Alignment Sensoren auf der Ebenen 2 nicht mehr mit modifiziertem Kaptonkabel versehen worden.

Der eigentliche Clou des **Tracker Alignment Systems TAS** liegt jedoch darin, dass das Silizium für infrarotes Licht nahezu transparent ist. Nur so ist es überhaupt möglich, dass die vier Infrarot Laserstrahlen des TAS den Silizium Spurdetektor komplett durchdringen können.

Die Wellenlänge des Infrarot Laserlichts ist mit $\lambda = 1083\ \text{nm}$ so gewählt, dass die entsprechende Photonen Energie von $1,148\ \text{eV}$ in der Nähe der Energiebandlücke des Silizium von $1,140\ \text{eV}$ [76] liegt. Dadurch werden in der Ver-

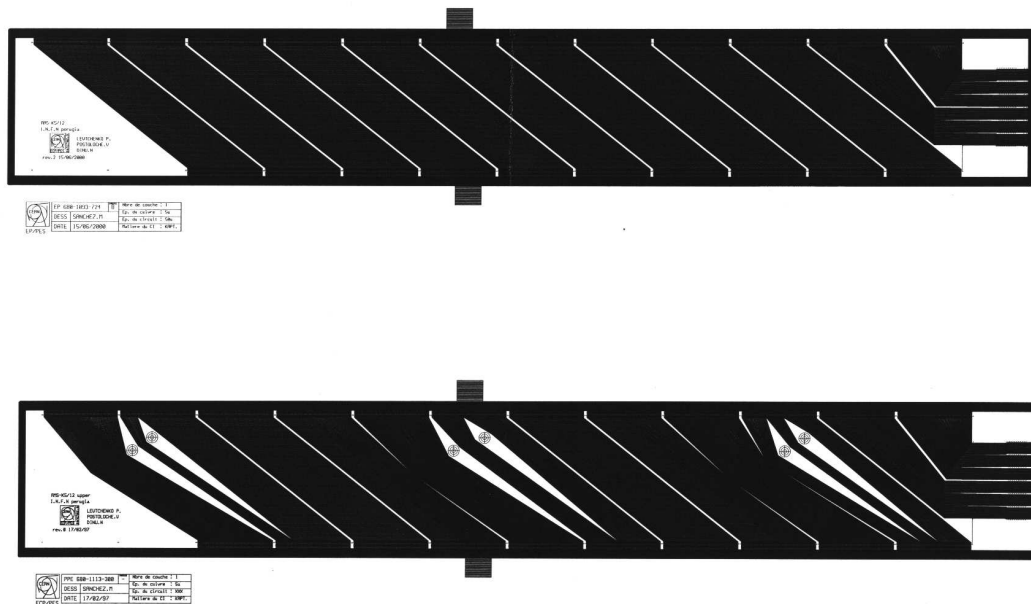


Abbildung 4.4: Das Kaptonkabel ohne (oben) und mit Löchern (unten) für das TAS (siehe auch Abbildung 3.7)

armungszone der Silizium Sensoren genügend viele Elektronen Loch Paare erzeugt, um ein messbares Signal zu erhalten, obwohl die überwiegende Mehrheit der Photonen (ca. 80%) das Silizium ungehindert durchqueren können (siehe Abbildung 4.10).

Zur Erhöhung der Transmission wurden die Alignment Sensoren auf beiden Seiten noch mit einer speziellen Anti Reflex Schicht aus ca. 770 nm SiO_2 und ca. 600 nm SiN_x bedampft, die die Reflexion auf einige wenige Prozent verringert (siehe Abbildung 4.11).

Der Vorteil dieses Konzepts liegt auf der Hand: Durch dieses neuartige Prinzip ist es möglich, dass das **Tracker Alignment System TAS** -im Gegensatz zu herkömmlichen Alignment Systemen- komplett ohne zusätzliche Sensoren und Auslese Elektronik auskommt. Die Silizium Sensoren des Spurdetektors, deren Position gemessen werden soll, fungieren gleichzeitig als Alignment Sensoren und die für die Auslese der Teilchensignale sowieso angeschlossene Elektronik liest die Laser Alignment Signale genauso gut wie Teilchensignale. Der Detektor überwacht sich sozusagen selber. Dadurch ist das System sehr kompakt und leicht, zwei wichtige Anforderungen in der Weltraumfahrt (vgl. Kapitel 4.1).

Natürlich muss dabei sichergestellt werden, dass die Laserstrahlen auch

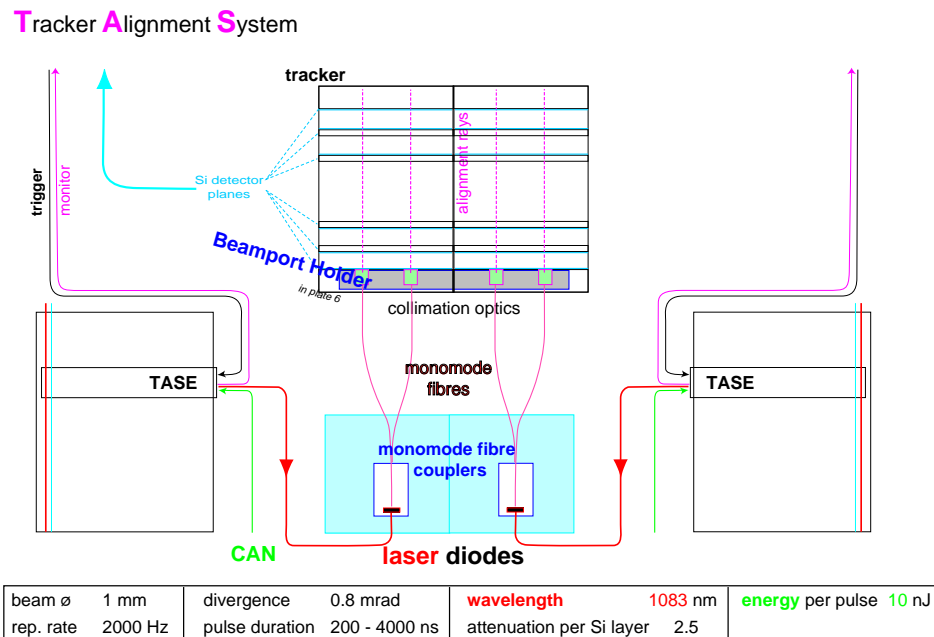


Abbildung 4.5: Der Aufbau des TAS inklusive Elektronik TASE

wirklich durch alle 6 Ebenen hindurch kommen und die Strahlprofile durch die Silizium Sensoren nicht in einer Art deformiert werden, die sie für die Positionsmessung unbrauchbar machen. Diese optischen Eigenschaften der Silizium Sensoren werden in Kapitel 4.3.1 genauer untersucht.

4.2.3 Die TAS Elektronik (TASE)

Damit die Laserdioden funktionieren, müssen sie gepulst werden. Diese Aufgabe übernehmen die beiden TAS Elektronik Boards TASE, die in den Elektronik Rahmen an der Außenseite des AMS-01 Detektors untergebracht sind.

Jedes der beiden TASE Boards pulst eine der beiden Laserdioden in der TAS-Box. Die Stromstärke pro Puls liegt fest bei 130 mA. Die Pulsdauer kann über das CAN-Bus Interface zwischen $0,2 \mu\text{s}$ und $25 \mu\text{s}$ variiert werden. Dies entspricht einer Energie von ca. 10 nJ pro Laser Puls. Den schematischen Aufbau des Tracker Alignment Systems TAS inklusive der Elektronik TASE zeigt Abbildung 4.5.

Die Dynamik des Lasersignals kann also ausschließlich über die Pulslänge eingestellt werden. Diese ist in Betrieb mit der Tracker Auslese Elektronik (TDR) mit $4 \mu\text{s}$ Pulsdauer nach oben begrenzt, da die Integrationszeit der Detektor-Elektronik nur $4 \mu\text{s}$ beträgt. Sämtliche Ladungen die von einem länger als $4 \mu\text{s}$ breiten Laserpuls nach der Integrationszeit der Elektronik erzeugt werden, tragen also nicht mehr zum gemessenen Signal bei und sind somit für eine Erhöhung des Signalpegels ungeeignet. Aufgrund der internen

Verzögerung von $2 \mu\text{s}$ im AMS-01 Triggersystem können effektiv jedoch nur $2 \mu\text{s}$ der Signale benutzt werden.

Dies ist ein Problem des TAS in seiner jetzigen Version, da sich gezeigt hat, dass die Abschwächung des Laserlichts in den einzelnen Silizium Ebenen des Detektors, bedingt durch die Aluminisierung der Sensoren so stark ist, dass selbst mit maximalem Lasersignal ($2 \mu\text{s}$) in den laserfernen Ebenen 1 und 2 nicht mehr genügend Laser Intensität zur Verfügung steht, um dort noch ein messbares Signal zu erzeugen (vgl. Kapitel 4.3.1.1).

Für die zukünftigen TASE Boards von AMS-02 wäre also eine zusätzliche Kontrolle über den Laserstrom erforderlich, um so die Dynamik des Lasersignals zu erhöhen (vgl. Kapitel 4.3.1.1).

4.2.4 Positionsbestimmung aus den Laserprofilen

Der auf ca. 1 mm Durchmesser fokussierte Laserstrahl des **Tracker Alignment Systems TAS** hat aufgrund des Transports durch die Monomode Faser ein Profil, das einer Gaussfunktion mit einem Offset y_0 entspricht (Gleichung 4.1). Der Offset y_0 wird von Messlauf zu Messlauf neu bestimmt, da er bedingt durch thermische Instabilitäten schwankt.

$$y(x) = \bar{y} \cdot e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2 \cdot \sigma^2}} + y_0 \quad (4.1)$$

- \bar{x} Mittelwert der Gaussfunktion = Position
- \bar{y} maximale Amplitude der Gaussfunktion
- σ Breite der Gaussfunktion
- y_0 Offset

Der Laserstrahl trifft auf der S-Seite der Silizium Sensoren ($110 \mu\text{m}$ Abstand der Auslesestreifen) ca. 20 Auslesestreifen und auf der K-Seite der Silizium Sensoren ($208 \mu\text{m}$ Abstand der Auslesestreifen) ca. 10 Auslesestreifen (siehe Abbildung 4.7).

Die Kanäle der Siliziumstreifen Detektoren registrieren die aufgesammelten Ladungen, die zuvor durch die Photonen der Laserstrahlen in dem Detektormaterial erzeugt worden sind. Aus den 640 Kanälen auf der S-Seite zur Messung der y -Koordinate und den 384 Kanälen auf der K-Seite zur Messung der x -Koordinate ergibt sich ein 1024 Kanäle breiter Fluss von Signalen. Diese 1024 Kanäle werden von 16 VA Verstärker Chips mit je 64 Kanälen verstärkt, und dann von Analog-Digital Wandlern, den sogenannten ADC's (**A**nalog **D**igital **C**onverter) mit 12 bit Auflösung in digitale Signale umgewandelt, die dann auf Festplatte gespeichert werden. Die 12 bit entsprechen dabei einer Auflösung von $2^{12} = 4096$ Stufen (ADC-Kanälen) für den kompletten dynamischen Bereich von AMS-01.

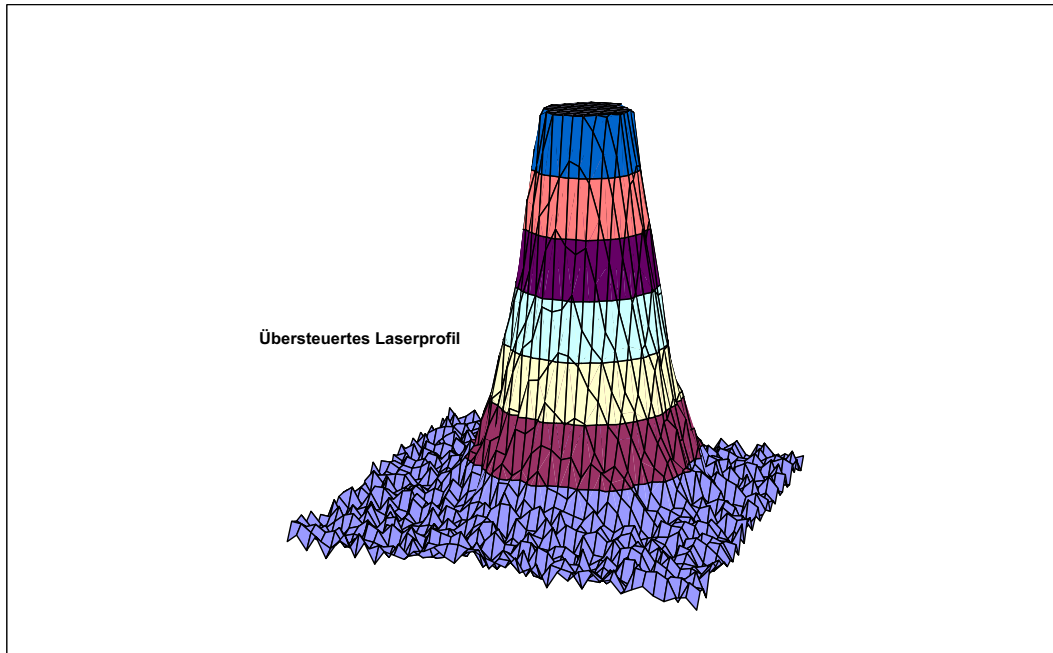


Abbildung 4.6: Ein übersteuertes Laserprofil

Wenn die Signale den dynamischen Bereich von AMS-01 überschreiten, erreicht man eine Sättigung. Dies ist z. B. auf den lasernahen Ebenen 6 und 5 der Fall, wenn man mit hohen Laserintensitäten ($2 \mu\text{s}$ Pulsbreite) Daten nimmt (siehe Abbildung 4.6). Derartige Signale werden bei der Analyse nicht berücksichtigt.

Um die Lasersignale vom Hintergrund -dem sogenannten Pedestal- der Vorverstärker der Silizium Detektoren zu trennen, werden zunächst Messungen bei ausgeschaltetem Laser gemacht (siehe Abbildung 4.7 oben). Bei diesen Pedestal Messungen wird aus 100 Ereignissen der Mittelwert eines jeden Kanals, sowie dessen statistische Schwankung σ bestimmt (siehe Gleichung 4.2 und 4.3).

$$\text{PED}(n) = \frac{1}{anz} \cdot \sum_{evt=1}^{anz} \text{ADC}_{evt}(n) \quad (4.2)$$

$$\sigma(n) = \frac{1}{anz} \cdot \sqrt{\sum_{evt=1}^{anz} \{\text{PED}(n) - \text{ADC}_{evt}(n)\}^2} \quad (4.3)$$

n	Nummer des Auslesestreifens
$\text{PED}(n)$	Pedestal des Auslesestreifens n
anz	Anzahl der gemittelten Ereignisse $anz = 100$
evt	Nummer des Ereignisses
$\text{ADC}_{evt}(n)$	ADC Wert des n -ten Auslesestreifens des Ereignis evt
$\sigma(n)$	statistische Schwankung des Auslesestreifens n

Die typischen statistischen Schwankungen der einzelnen Auslesekanäle liegen bei $\sigma(n) \leq 10$ ADC-Kanälen. Nun wird die gleiche Messung mit eingeschaltetem Laser wiederholt. Das eigentliche Lasersignal $\text{LAS}_{evt}(n)$ (Abbildung 4.7 unten) eines Auslestreifens n vom Ereignis evt erhält man, indem man von dem Rohsignal $\text{ADC}_{evt}(n)$ (Abbildung 4.7 Mitte) den in Gleichung 4.2 ermittelten Pedestal für jeden Auslesekanal einzeln abzieht (Gleichung 4.4).

$$\text{LAS}_{evt}(n) = \text{ADC}_{evt}(n) - \text{PED}(n) \quad (4.4)$$

n	Nummer des Auslestreifens
evt	Nummer des Ereignisses
$\text{LAS}_{evt}(n)$	Signalwert des n -ten Auslestreifens des Ereignis evt
$\text{ADC}_{evt}(n)$	ADC Wert des n -ten Auslestreifens des Ereignis evt
$\text{PED}(n)$	Pedestal des Auslestreifens n (Gleichung 4.2)

An die auf diese Weise ermittelten Lasersignale wird nun die in Gleichung 4.1 beschriebene Gaussfunktion mit einem Offset angefitet. Dabei werden die 4 Fitparameter \bar{x}, \bar{y}, σ und y_0 so lange iterativ variiert, bis die Quadratsumme χ^2 der Abstände der n Signalwerte $\text{LAS}(n)$ zu den entsprechenden Werten des Gaussfits $y(n)$ minimal wird (Gleichung 4.5).

Der Offset als zusätzlicher, vierter Fitparameter der Gaussfunktion ist notwendig, um das sogenannten „Common Mode“ Rauschen der Silizium Detektoren zu berücksichtigen. Dieses Rauschen entsteht durch langsame, äußere elektromagnetische Störungen, die auf alle Kanäle gleichermaßen einwirken und so die Null Linie von Ereignis zu Ereignis leicht verschieben.

Die Varianz des Pedestals liegt bei $\sigma(n) \leq 10$ ADC Kanälen. Auslesekanäle mit einem $\sigma(n) > 10$ ADC-Kanälen werden bei dem Fitverfahren ignoriert (siehe Abbildung 4.8), da ihr überhöhtes Eigenrauschen zu künstlichen Verschiebungen des Gaussfits führen kann. Ebenso werden „tote“ Auslesekanäle mit eine $\sigma(n) \leq 1$ ADC Kanal bei Fit ignoriert. Glücklicherweise liegen in den Signalregionen der Alignmentsensoren wenig rauschende bzw. tote Auslesekanäle. Weniger als 5% der signalgebenden Auslesekanäle des TAS besitzen einen der beiden genannten Defekte.

Der Zentralwert der gefitteten Gaussfunktion (Fitparameter \bar{x}) liefert dann einen guten Referenzwert für die Positionsmessung.

$$\chi^2 = \frac{1}{anz} \cdot \sum_{n=1}^{anz} \{\text{LAS}(n) - y(n)\}^2 \quad (4.5)$$

χ^2	mittlerer quadratischer Abstand des Gaussfits zum Laserprofil
anz	Anzahl der Signalstreifen $anz \approx 10$ für K und $anz \approx 20$ für S
n	Nummer des Signalstreifens
$\text{LAS}(n)$	Signalwert des n -ten Auslestreifens
$y(n)$	Wert der Fitfunktion für den n -ten Auslestreifen

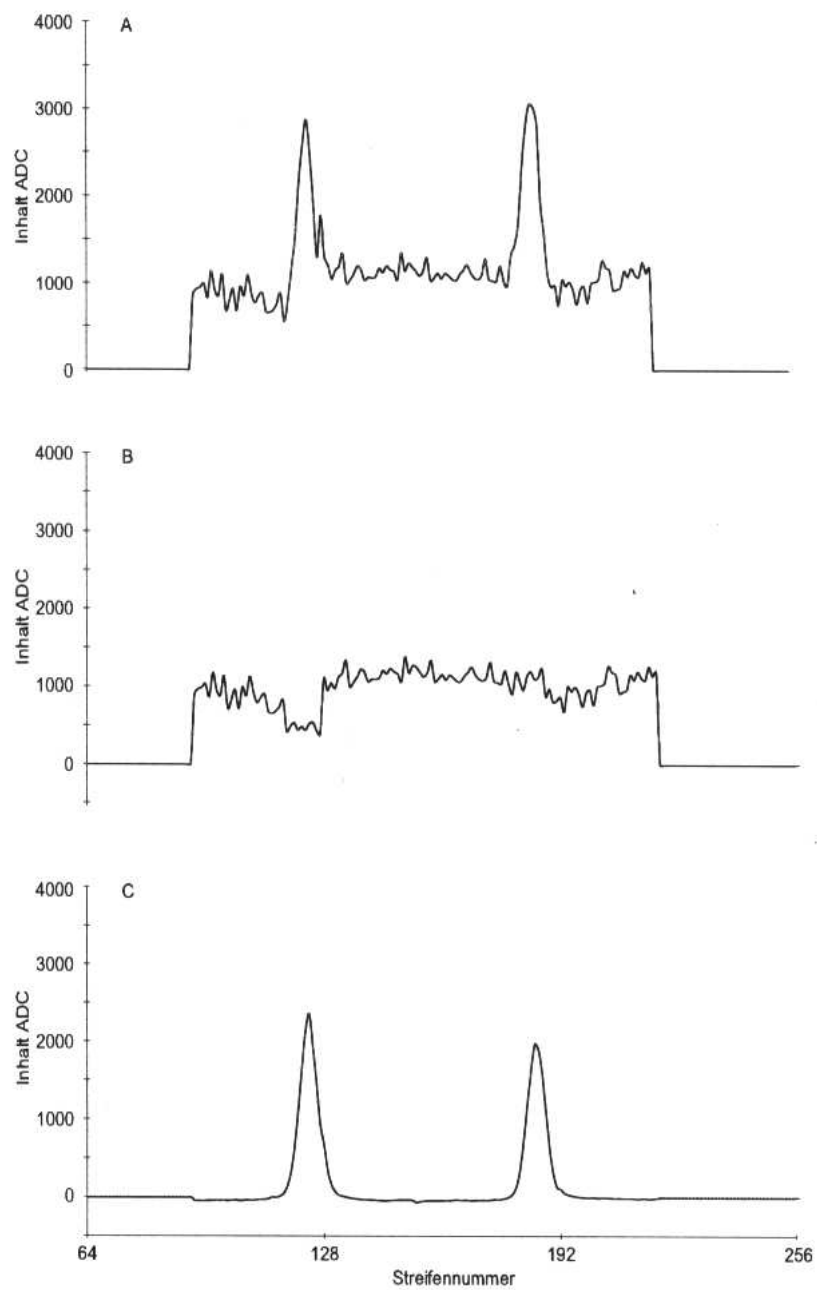


Abbildung 4.7: Die Pedestal Subtraktion der Lasersignale (oben: Laser Rohsignal (A), Mitte: mittlerer Pedestal (B), unten Pedestal subtrahiertes Lasersignal (C))

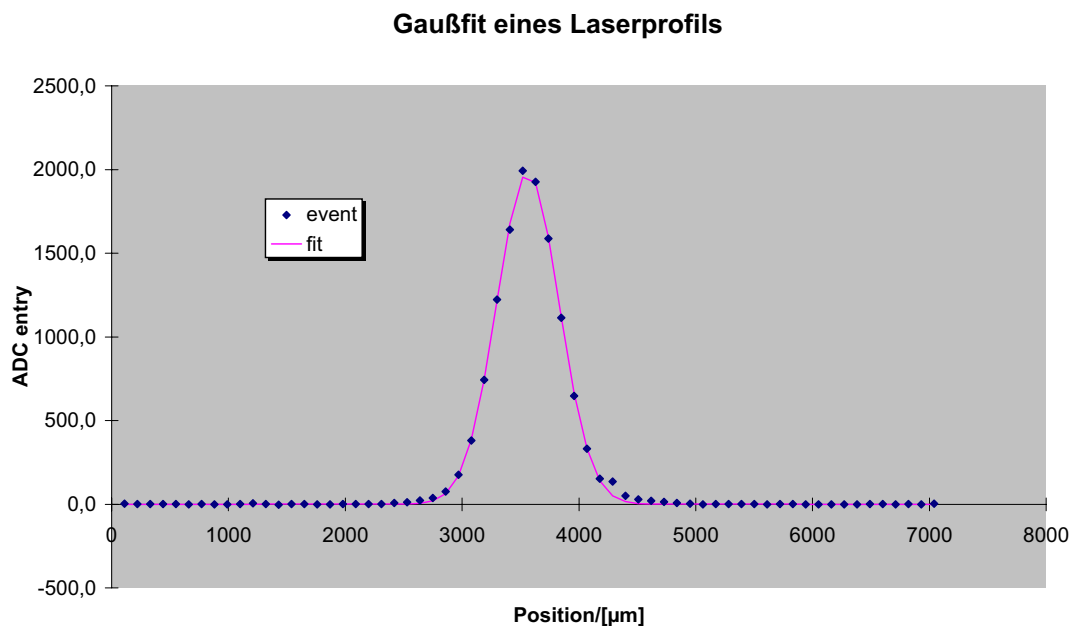


Abbildung 4.8: Gaussfit an ein TAS Laserprofil

Die mit diesem Verfahren gewonnene Positionsgenauigkeit zwischen zwei aufeinander folgenden Laserpulsen ist bei genügend hoher Dynamik des Lasersignals (≥ 200 ADC Kanäle) besser als $2 \mu\text{m}$. Abbildung 4.9 zeigt die Höhenlinien von 400 aufeinander folgenden Laserpulsen auf Ebene 4, also nach Durchgang durch 2 Ebenen von je $300 \mu\text{m}$ Silizium. Wie man sieht, weichen die einzelnen Ereignisse kaum voneinander ab. Die Streuung der aus diesen Profilen nach dem oben beschriebenen Gaussfit Verfahren ermittelten Schwerpunkte ist kleiner als $2 \mu\text{m}$.

Außerdem kann man in dieser Abbildung erkennen wie wenig das Gausprofil der Laserstrahlen durch die Silizium Wafer beeinträchtigt wird. Das aus den 400 Ereignissen gewonnene mittlere Laserprofil zeigt nach wie vor ein sehr gute Übereinstimmung mit der gefitteten Gaussglocke, obwohl der Laser an dieser Stelle schon 2 Lagen von $300 \mu\text{m}$ Silizium durchdrungen hat.

Die Genauigkeit der Positionsmessung nimmt jedoch mit der Dynamik des Signals sehr stark ab. So erreicht man bei einer Laser Amplitude von ca. 20 ADC Kanälen nur noch Positionsgenauigkeiten von ca. $10 \mu\text{m}$. Dies ist ein weiteres Argument dafür, die Dynamik des **Tracker Alignment Systems TAS** für AMS-02 zu erhöhen.

TAS beam profile during STS91, plane 4 (behind 2 layers i.e. 600 μm) of Si,

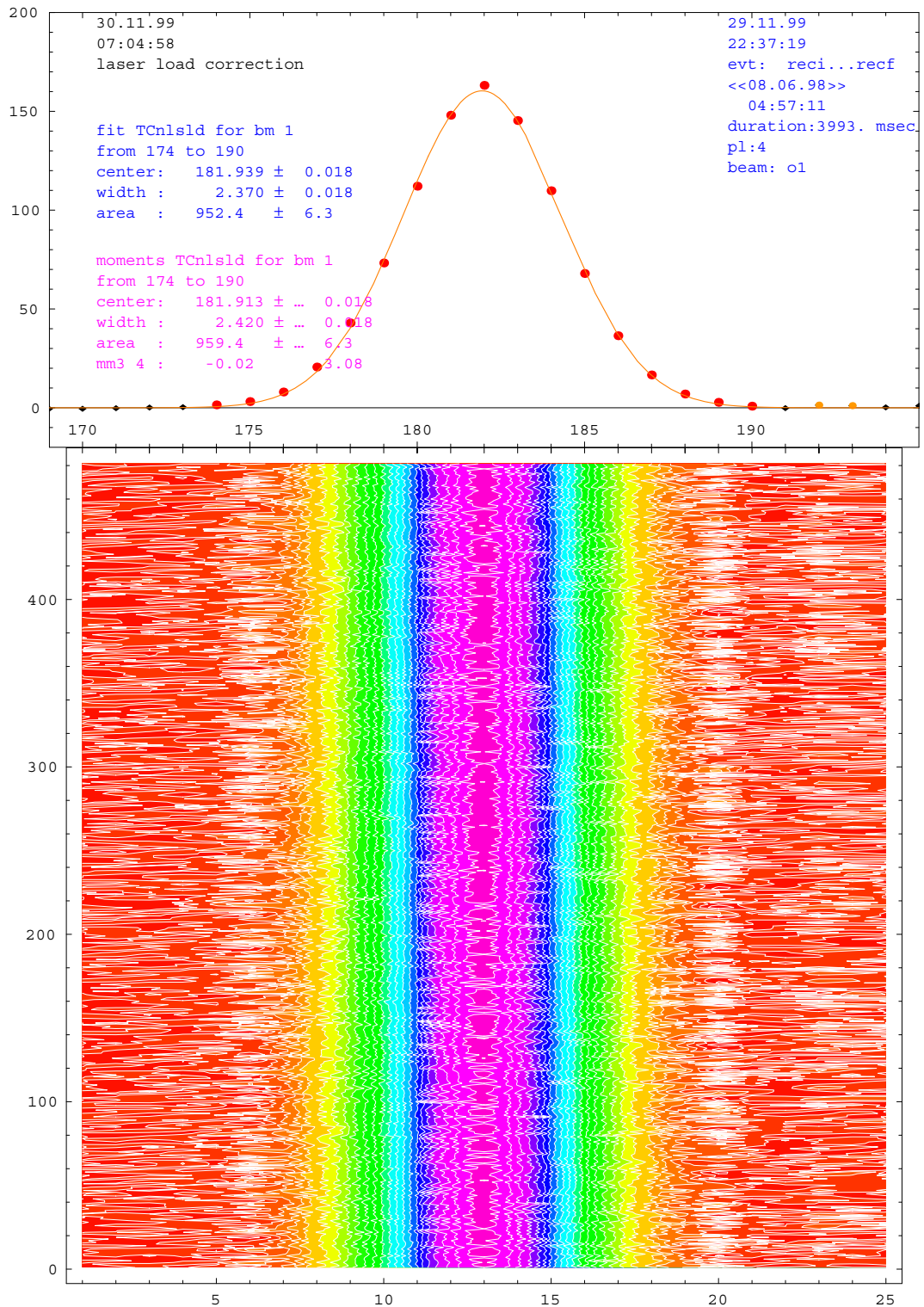


Abbildung 4.9: Die Höhenlinien von 480 aufeinander folgenden Laserpulsen und das daraus gewonnene mittlere Profil

4.3 Erste Tests im Labor

Bei der Entwicklung des in Kapitel 4.2 beschriebenen **Tracker Alignment Systems TAS** wurden die einzelnen Komponenten des Systems zahlreichen, ausführlichen Labortests unterzogen, die das System auf seine Eignung bezüglich der in Kapitel 4.1 erwähnten Anforderungen untersuchen sollen. Die Ergebnisse dieser Tests werden in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

4.3.1 Optische Eigenschaften der SI Sensoren (Aachen 6/97)

Damit das **Tracker Alignment System TAS** einwandfrei funktionieren kann, müssen die optischen Eigenschaften der Alignmentssensoren, durch die die Laserstrahlen hindurch gehen, überprüft werden. Aus ersichtlichen Gründen sind in diesem Zusammenhang die folgenden beiden optischen Eigenschaften von besonderem Interesse:

- Die Transmissionseigenschaften der Silizium Sensoren für infrarotes Laserlicht.
- Die Beugungs- und Brechungseigenschaften der Silizium Sensoren für infrarotes Laserlicht.

Diese optischen Eigenschaften werden in den folgenden zwei Unterkapiteln untersucht.

4.3.1.1 Die Transmissionseigenschaften der Silizium Sensoren für das IR Laserlicht

Wie in Abbildung 4.10 zu sehen, liegt die für das **Tracker Alignment System TAS** gewählte Wellenlänge von $\lambda = 1083$ nm gerade auf der Absorptionskante des Silizium Spektrums. Die Transmission für einen $300 \mu\text{m}$ dicken Silizium Wafer liegt bei dieser Wellenlänge bei ca. 80% und die Absorption bei ca. 20%. Bei höheren Wellenlängen hätte man zwar noch höhere Transmissionen, aber kaum noch Absorption (kein Signal), während man bei niedrigeren Wellenlängen zwar ein höheres Signal erzeugen würde, dafür allerdings nicht mehr genügend Licht durch das Silizium hindurchstrahlen könnte, um alle 6 Ebenen im Silizium Spur Detektor zu erreichen.

Zusätzlich zur Absorption trägt jedoch auch noch die Reflexion zur Verminderung der Signalstärke bei. Bei der gewählten Wellenlänge von $\lambda = 1083$ nm beträgt die Reflexion für Silizium ca. 25%. Rein theoretisch bekommt man also maximal 55% des Laserlichts durch eine Ebene Silizium hindurch, die restlichen 45% werden absorbiert (20%) oder reflektiert (25%). In der sechsten

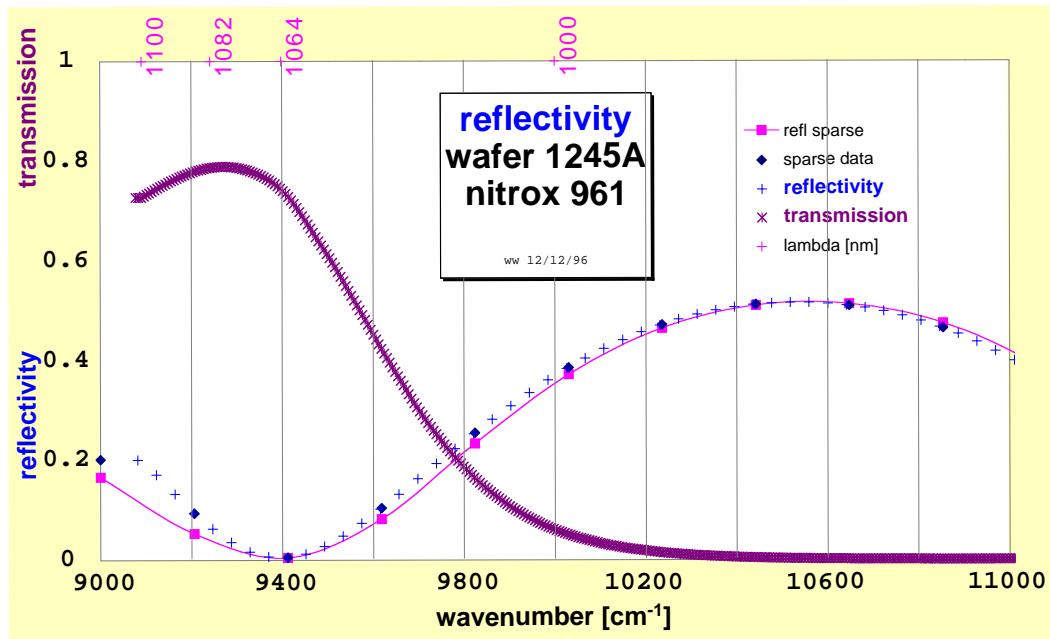


Abbildung 4.10: Das Transmissionsspektrum von Silizium

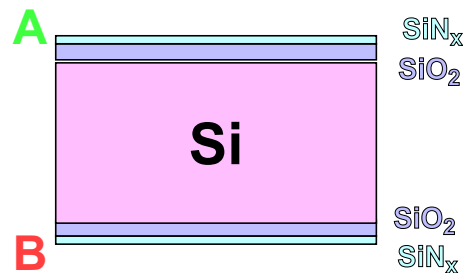


Abbildung 4.11: Die Antireflexschicht der Alignmentsensoren

Ebene hätte man folglich nur noch $0,55^5 = 0,05 = 5\%$ der ursprünglichen Leistung zur Verfügung.

Um die Reflektivität des Silizium zu erniedrigen und so eine höhere Transmission zu erreichen, wurden die Alignment Sensoren für das Strahlenpaar U1/O1 auf beiden Seiten noch mit einer speziellen Anti Reflex Schicht aus ca. 770 nm SiO_2 und ca. 600 nm SiN_x versehen (siehe Abbildung 4.11).

Die Abhängigkeit des Reflexionskoeffizienten der 300 μm dicken Silizium Wafer von der Dicke der SiN_x und der SiO_2 Antireflexschichten ist in Abbildung 4.12 aufgetragen. Wie man sieht, sollte sich die Reflexion bei den für die Alignmentsensoren gewählten Schichtdicken (ca. 600 nm SiN_x und ca. 770 nm SiO_2) von 25% auf ein Minimum von einigen wenigen Prozent verringern. Dies würde die praktisch nutzbare Transmission wieder auf ca. 80% erhöhen.

Tatsächlich liegt die Transmission der Silizium Wafer allerdings nur bei ca. 25% bis 30%, also noch deutlich niedriger als aus dem Absorptionsspek-

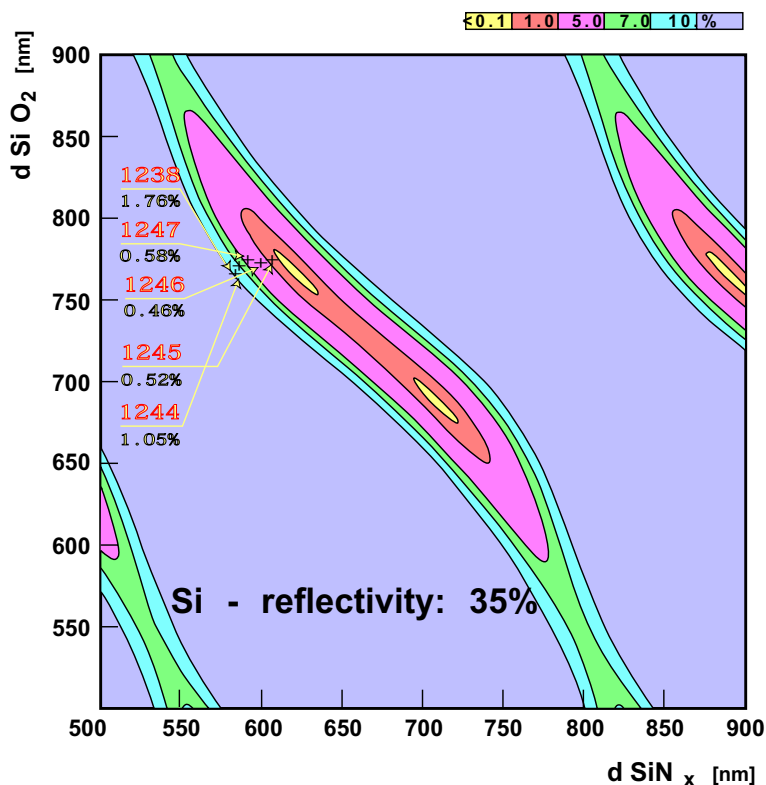


Abbildung 4.12: Die Reflektivität der TAS Silizium Sensoren in Abhängigkeit von der Dicke d der Antireflexschicht (SiN_x)

trum und der Antireflexschicht zu erwarten ist. Dies liegt vor allen Dingen an den Aluminisierungen der Silizium Sensoren, die zusätzlich zur Abschirmung des Laserlichts beitragen. Für die S-Seite hat man alle $55 \mu\text{m}$ $12 \mu\text{m}$ breite Aluminiumstreifen und für die K-Seite hat man alle $52 \mu\text{m}$ $12 \mu\text{m}$ breite Aluminiumstreifen (vgl. Kapitel 3.1.5). Eine maßstabgerechte Darstellung einer Elementarzelle des sich hieraus ergebenden Streifen-Musters zeigt Abbildung 4.13.

Wie man sieht, sind ca. 40% des Siliziums mit dem für das IR Licht undurchlässigem Aluminium belegt. Dies stimmt mit der beobachteten Transmission von 25% bis 30% überein: Aufgrund des Absorptionsspektrums und der Antireflexschicht erwartet man eine theoretische Transmission von ca. 80%. Davon werden ca. 40% von den Aluminium Streifen abgeschirmt. Es bleiben also genau die beobachteten 25% bis 30% Transmission übrig.

Bei einer maximalen Transmission von 25% bis 30% kommt in Ebene 1 (der laserfernsten Ebene) nur noch $0,25^5 = 0,00098$ also weniger als 1 Promille der ursprünglichen Intensität an. D. h. der dynamische Bereich der zu erwartenden Signalhöhen des TAS geht über mehr als drei Größenordnungen, je nachdem in welcher Ebene man misst.

Aus diesem Grund muss das Lasersignal einen ähnlichen Dynamikumfang

Attenuation of Lasersignals in Si-Sensors by:

1. Reflexion on Si surface -> Antireflex coating
2. Shadow from Al-strips (Defraction) -> Incoherent light
3. Absorption in Si

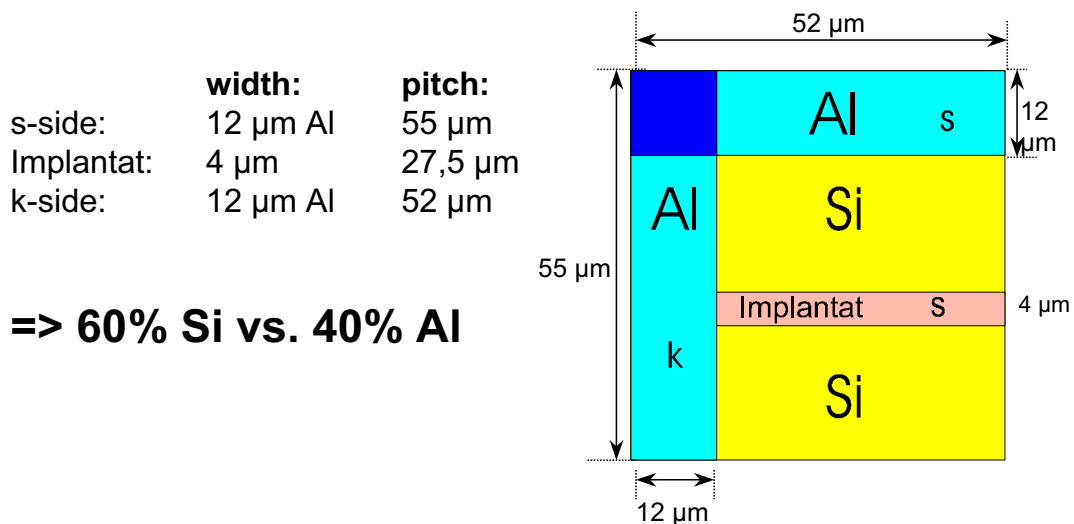


Abbildung 4.13: Elementarzelle des Streifenmusters bei AMS-01 Silizium-Detektoren

besitzen, um so alle Ebenen zu erreichen: Niedrige Intensitäten für die Messungen in den lasernahen Ebenen (6-4), bei denen in den laserfernen Ebenen (3-1) kaum noch ein Signal zur Verfügung steht und hohe Intensitäten für die Messungen in den laserfernen Ebenen (3-1), bei denen die Signale in den lasernahen Ebenen (6-4) übersteuert sind.

Der dynamische Bereich der Laser Intensität ist aber nur über die Pulsdauer zwischen 200 ns und 2000 ns regulierbar (vgl. Kapitel 4.2.3), was gerade mal einer einzigen Größenordnung im Dynamikumfang entspricht. Von daher ist es nicht verwunderlich, dass das Lasersignal in den laserfernen Ebenen 2 und 1 nicht mehr stark genug ist, um daraus eine hochgenaue ($\leq 10 \mu\text{m}$) Ortsinformation zu ermitteln.

Für das zukünftige **T**racker **A**lignment **S**ystem TAS bei AMS-02 ist also eine zusätzliche Regelung des Laserstroms auf bis zu 250 mA (maximaler Laserstrom der Laserdiode) erforderlich, damit weniger Probleme mit der Dynamik des Signals auftreten.

Außerdem ist zu überlegen, ob bei den zukünftigen Alignmentssensoren für den AMS-02 Detektor auf die Aluminisierung der nicht ausgelesenen Floatingstreifen verzichtet werden kann. Dies würde die Abschirmung des Laserlichts durch das Aluminium von ca. 40% auf dann nur noch ca. 16% verringern und somit die Transmission von ca. 20% auf dann ca. 50% verdoppeln.

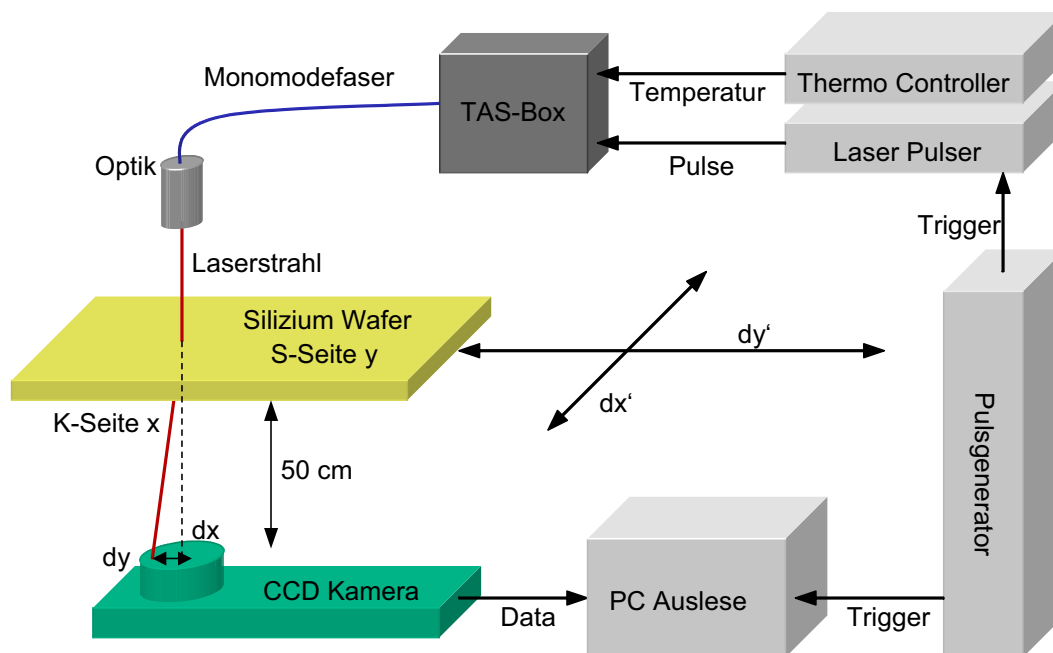


Abbildung 4.14: Der Messaufbau zur Bestimmung der optischen Eigenschaften der Alignment Sensoren

4.3.1.2 Die Beugungs- und Brechungseigenschaften der Silizium Sensoren für das IR Laserlicht

Neben der oben beschriebenen Transmissionseigenschaften der Silizium Sensoren für die Infrarot Laserstrahlen gibt es noch zwei andere optische Eigenschaften der Silizium Sensoren, die für ein einwandfreies Funktionieren des **T**racker **A**lignment **S**ystems TAS wichtig sind:

1. **Beugung**

Die Silizium Sensoren dürfen das Profil der Laserstrahlen nicht so stark deformieren, dass es für eine Positionsmessung unbrauchbar wird.

2. **Brechung**

Die Silizium Sensoren dürfen die Laserstrahlen nicht brechen, d. h. dass die Strahlen nicht von den Silizium Sensoren abgelenkt werden dürfen. In diesem Falle würden die Strahlen in einer Art Zickzack Kurs durch den Detektor gehen, was ein Alignment stark erschweren würde. Voraussetzung für ein optimales Alignment ist ein gerader Strahlengang.

Diese beiden optischen Eigenschaften werden mit dem folgenden Messaufbau (Abbildung 4.14) untersucht:

Die Laserdiode des TAS wird von einem externen ILX Pulser mit 60 mA Laserstrom und 200 ns Pulsbreite betrieben. Die CCD Kamera mit einer Auflösung von 640×480 Pixeln wird mit Hilfe eines Framegrabbers von einem

PC ausgelesen. Ein externer Pulsgenerator synchronisiert den Laserpuls und CCD Kamera Auslese Elektronik. Außerdem sorgt ein ILX Thermocontroller über das in der Laserdiode eingebaute Peltier Element und den in der Laserdiode eingebauten Temperatursensor dafür, dass sich die Diode während des Betriebs nicht aufheizt. Da die Laserleistung der Diode temperaturabhängig ist, muss dafür gesorgt werden, dass die Diode auf eine konstanten Temperatur von 17°C gehalten wird.

Das Laserlicht des TAS wird durch einen passiven AMS Silizium Alignment-sensor (d. h. mit Antireflexschicht aber ohne Kaptonkabel) hindurch gestrahlt. Die Ablenkung oder Verformung des Laserprofils in Abhängigkeit von der Position des Laserstrahl Durchgangs durch den Silizium Sensor wird mit Hilfe einer CCD Pixel Kamera mit einer Auflösung von 640×480 Pixeln vermessen. Der Alignmentsensor wird dabei mit Hilfe von zwei Schrittmotoren mit einer Genauigkeit von $dx' = dy' = 0,25 \mu\text{m}$ über einen Messbereich Bereich von 1 mm in x' - und y' -Richtung des Silizium Sensors und der CCD Kamera positioniert. Die CCD Kamera misst den Unterschied dx und dy des Schwerpunktes des Laserprofils (vgl. Kapitel 4.2.4) mit und ohne Sensor in einem Abstand von 50 cm zum Siliziumwafer in Abhängigkeit von dessen Position auf dem Wafer.

Das entsprechende Profil des Laserstrahls vor und nach dem Durchgang durch den Silizium Alignmentsensor zeigt Abbildung 4.15. Die Abschwächung des Signals beim Durchgang durch den Silizium Sensor ist deutlich zu erkennen. Ansonsten wird das Gaussprofil des Laserstrahls durch den Silizium Sensor jedoch kaum beeinträchtigt.

Abbildung 4.16 zeigt die Verteilung des Abstandes der Laserstrahl Schwerpunkte zwischen dem reinen Laserstrahl und dem durch den Silizium Wafer transmittierten Laserstrahl in 50 cm Entfernung zum Silizium Wafer. Wie man sieht, ist die durch den Silizium Wafer entstehende Verschiebung auf weniger ca. $0,5 \mu\text{m}$ Genauigkeit mit Null verträglich. Da der Fehler der Positionsbestimmung ebenfalls bei $1 \mu\text{m}$ liegt, kann man sagen, dass der Silizium Sensor den Strahlengang des Laser praktisch nicht beeinflusst.

Dass die Geradlinigkeit der Laserstrahlen beim Durchgang durch die Silizium Wafer erhalten bleibt, wird auch noch einmal in Kapitel 6.1 gezeigt.

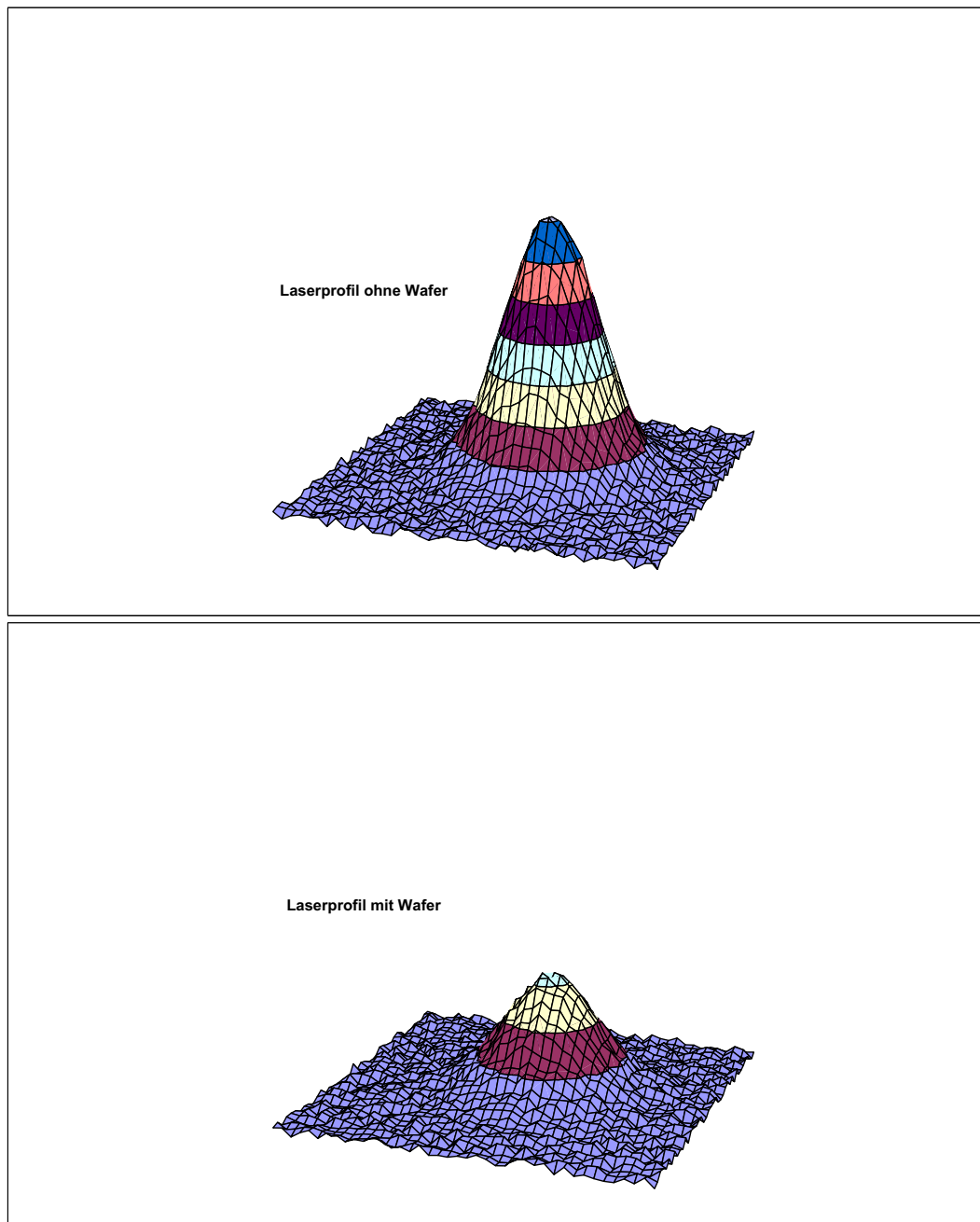


Abbildung 4.15: Das Profil des Laserstrahls vor und nach Durchgang durch einen Silizium Sensor

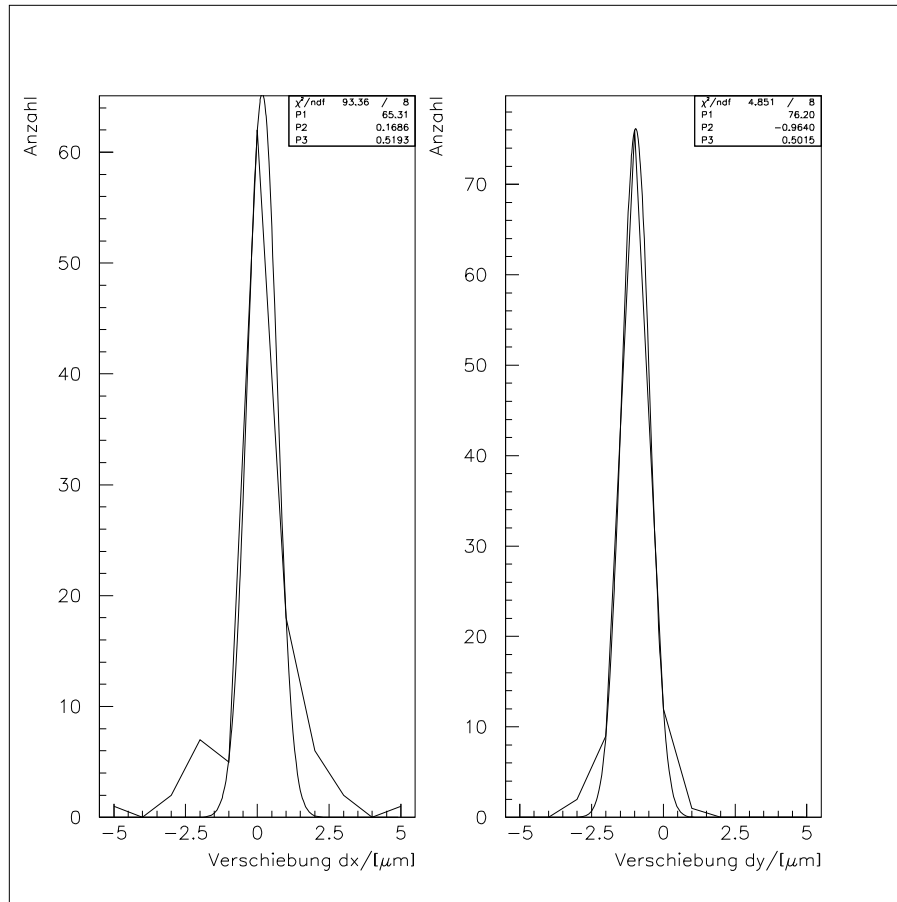


Abbildung 4.16: Verteilung der Abstände des Schwerpunktes beim Durchgang des Laserstrahls durch einen Silizium Sensor

4.3.2 Mechanische Stabilität des TAS (Garching 8/97)

Ein wichtiger Punkt für die Weltraumtauglichkeit des **T**racker **A**lignment **S**ystems TAS ist die Vibrationsstabilität, damit das System die enormen Beschleunigungen und Vibrationen, denen es während des Shuttle Starts ausgesetzt ist, heil übersteht. Zur Untersuchung der Vibrationsfestigkeit des TAS, werden TAS-Box und Beamportholder Am Max Planck Institut für Extraterrestrische Forschung MPE auf einem Vibrationstisch befestigt.

Mit Hilfe dieses Vibrationstisches werden zunächst die Eigenfrequenzen des Systems ermittelt, indem das Frequenzspektrum von 20 Hz bis 2000 Hz mit Sinusschwingungen von 0,5 g durchfahren wird. Auf dem TAS montierte g-Aufnehmer messen die Amplituden der entsprechenden TAS Schwingungen bei der jeweiligen Frequenz. Dabei zeigt sich, dass der Beamportholder eine starke Resonanz bei ca. 550 Hz besitzt (siehe Abbildung 4.17).

Nach dieser Messung der Eigenfrequenzen erfährt das auf dem Vibrationstisch montierte TAS für 1,5 Minuten ein Zufallsspektrum, dass ungefähr

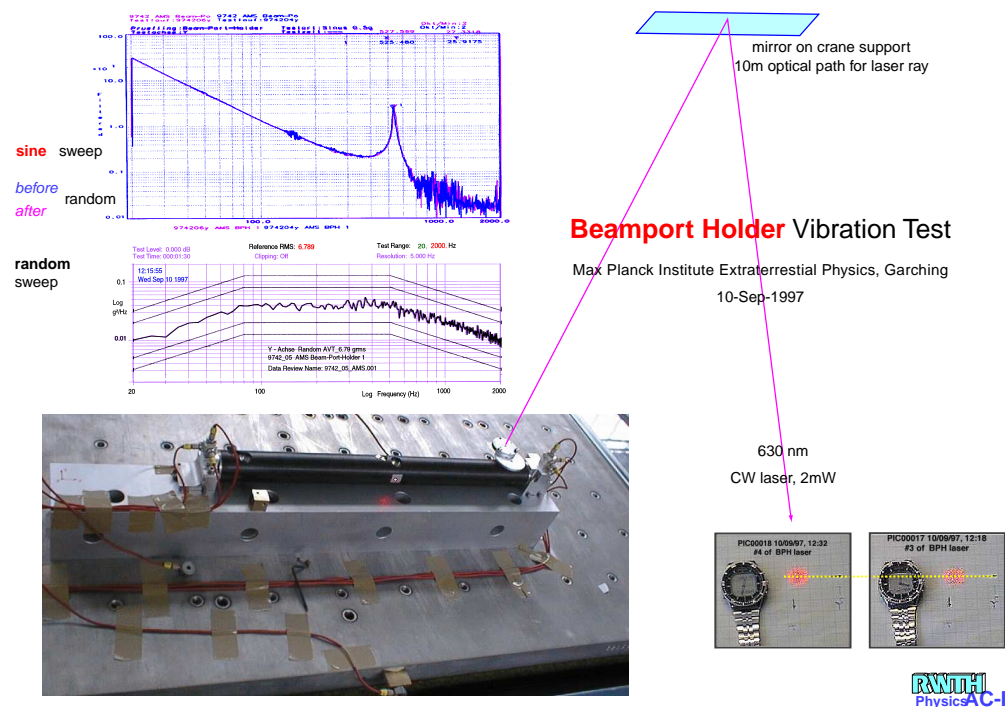


Abbildung 4.17: Der Vibrationstest des TAS am Max Planck Institut für extraterrestrische Forschung in Garching

den Vibrationen und Beschleunigungen entspricht, die bei einem Shuttle Start auftreten.

Danach wird die erste Messung der Eigenfrequenzen wiederholt. Sollte sich hier ein deutliches Absinken der Eigenfrequenzen zeigen, so kann davon ausgegangen werden, dass ein inelastischer Vorgang stattgefunden hat, also irgend etwas kaputt gegangen ist.

Dies war beim Vibrationstest des TAS nicht der Fall. Das Eigenfrequenzspektrum des TAS war vor und nach dem Zufallsspektrum identisch (siehe Abbildung 4.17). Insbesondere funktionierte das TAS auch nach dem Vibrationstest noch einwandfrei, und der eingekoppelte Laserstrahl mit sichtbarem Licht ($\lambda = 630 \text{ nm}$) zeigte über 10 m Weglänge (an der 5 m hohen Hallendecke reflektiert) keinerlei sichtbaren Versatz. Der gemessene Versatz war kleiner als 0,1 mm. Dies entspricht einem Winkel von weniger als $10 \mu\text{rad}$ (siehe Abbildung 4.17).

4.3.3 Thermo Vakuum Test des TAS (Garching 8/97)

Zum Überprüfen der Thermo Vakuum Tauglichkeit des TAS (hier insbesondere der Ausgasungs Eigenschaften des TAS im Vakuum), wurde das TAS ebenfalls am MPE in Garching in einer Thermo Vakuum Glocke installiert.

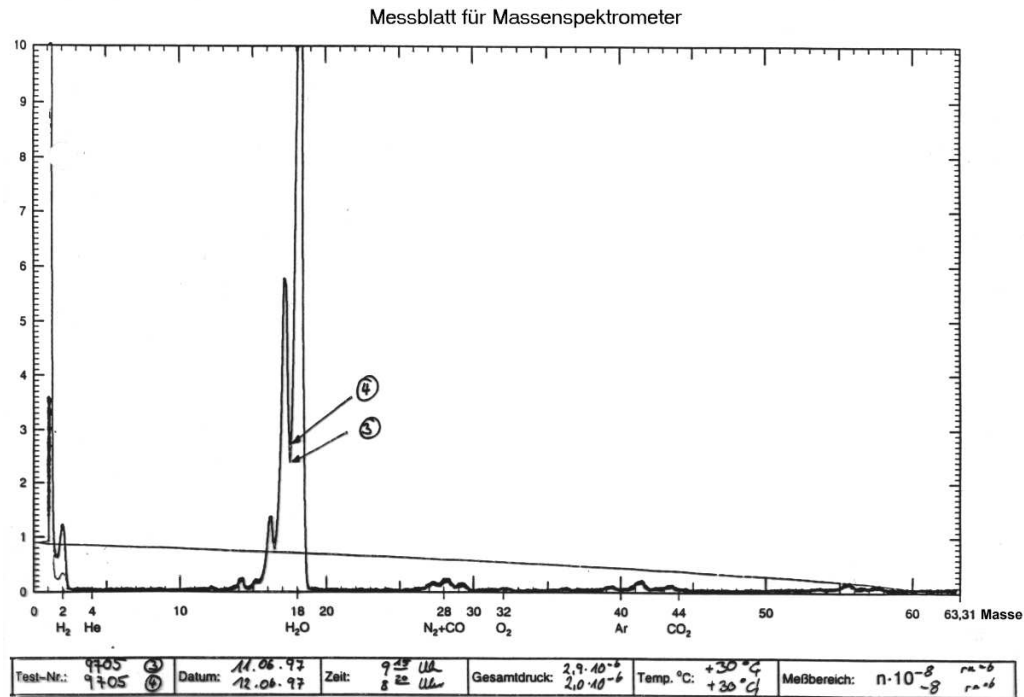


Abbildung 4.18: Das Massenspektrum des Thermo Vakuum Tests des TAS am Max Planck Institut für extraterrestrische Forschung in Garching

Die angeschlossene Turbo Molekular Pumpe erzeugt ein Vakuum von $2 \cdot 10^{-6}$ mbar. Innerhalb der 24 stündigen Testzeit wurden mehrere Temperaturzyklen von 0°C bis 30°C durchfahren. Das an der Pumpe angeschlossene Massenspektrometer überprüft dabei das Vorhandensein von Molekülen, die im Vakuum eventuell aus dem TAS Material entweichen könnten.

Das gemessene Massenspektrum (Abbildung 4.18) zeigt bis auf harmloses Wasser keinerlei Ausgasungen des TAS an. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da bei der Konzeption des TAS bewusst auf Materialien verzichtet wurde, die im Vakuum ausgasen können, wie z. B. Kunststoffe. Fast 90% des TAS besteht aus Vakuum unkritischen Materialien wie z. B. Aluminium oder anderen Metallen.

Nach der Thermo Vakuum Messung wurde das TAS in Betrieb genommen und zeigte keinerlei Funktions Beeinträchtigung durch den 24 stündigen Thermo Vakuum Test.

4.3.4 Ortsauflösung des TAS (Genf 9/97)

Die Ortsauflösung der mit dem Tracker Alignment System TAS gemessenen Positionen muss laut Anforderungsprofil besser als $30 \mu\text{m}$ sein (vgl. Kapitel 4.1). Zur Bestimmung der Ortsauflösung der Silizium Sensoren dient ein

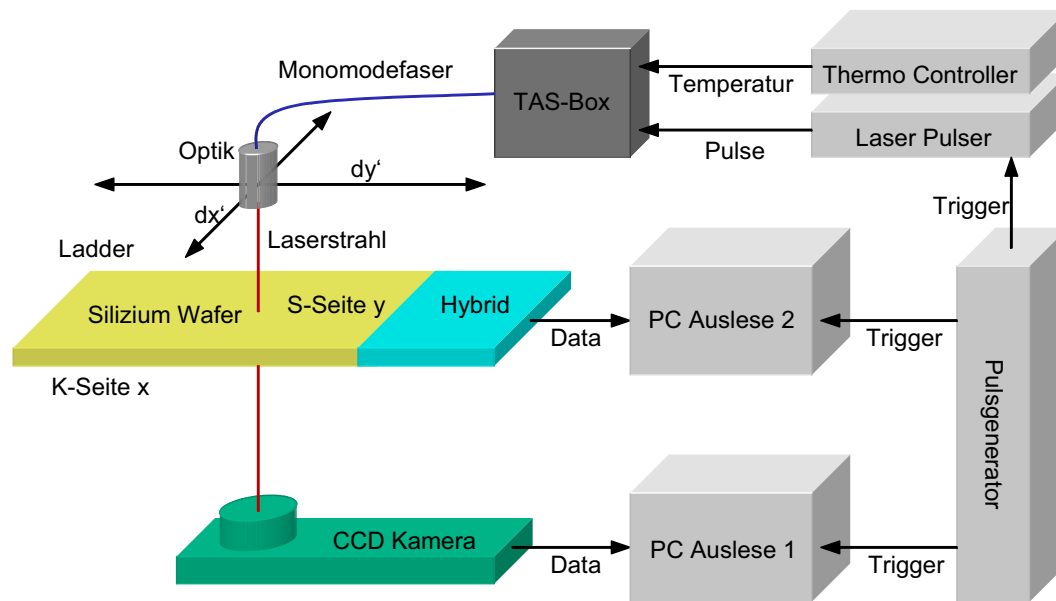


Abbildung 4.19: Der Messaufbau zur Bestimmung der Ortsauflösung des TAS

ähnlicher Messaufbau, wie der in Kapitel 4.3.1.2 vorgestellte Messaufbau zur Bestimmung der Beugungs- und Brechungseigenschaften der Silizium Sensoren (Abbildung 4.14). Der einzige Unterschied besteht darin, dass dieses Mal auch das Signal des Silizium Sensors ausgelesen wird und nicht der Silizium Sensor sondern die Laseroptik von den Schrittmotoren bewegt wird.

Die Laserdiode des TAS wird von einem externen ILX Pulser mit 80 mA Laserstrom und 200 ns Pulsbreite betrieben. Die CCD Kamera mit einer Auflösung von 640×480 Pixeln wird mit Hilfe eines Framegrabbers von einem PC ausgelesen. Die AMS-01 Silizium Leiter wird über ein an der Universität Genf entwickeltes, PC gestütztes Datennahme System ausgelesen.

Ein externer Pulsgenerator synchronisiert die Laserpulse mit der CCD Kamera und der Silizium Auslese Elektronik. Außerdem sorgt ein ILX Thermocontroller über das in der Laserdiode eingebaute Peltier Element und den in der Laserdiode eingebauten Temperatursensor dafür, dass sich die Diode während des Betriebs nicht aufheizt. Da die Laserleistung der Diode temperaturabhängig ist, muss dafür gesorgt werden, dass die Diode auf einer konstanten Temperatur von 17°C gehalten wird.

Die CCD Pixelkamera mit einer Auflösung von 640×480 Pixeln unter dem Silizium Wafer dient lediglich der Kontrolle der beiden Schrittmotoren, die die Laser Optik mit einer Genauigkeit von $dx' = dy' = 0,25 \mu\text{m}$ in x - und y -Richtung des Silizium Sensors und der CCD Kamera positionieren (siehe Abbildung 4.19).

Die Abweichung dx und dy des aus 300 Ereignissen ermittelten Laserstrahl Schwerpunktes (vgl. Kapitel 4.2.4) vom Sollwert (Einstellung der Schrittmotoren) ist für 112 Verschiebungen zwischen $2,5 \mu\text{m}$ und $200 \mu\text{m}$ in Abbildung

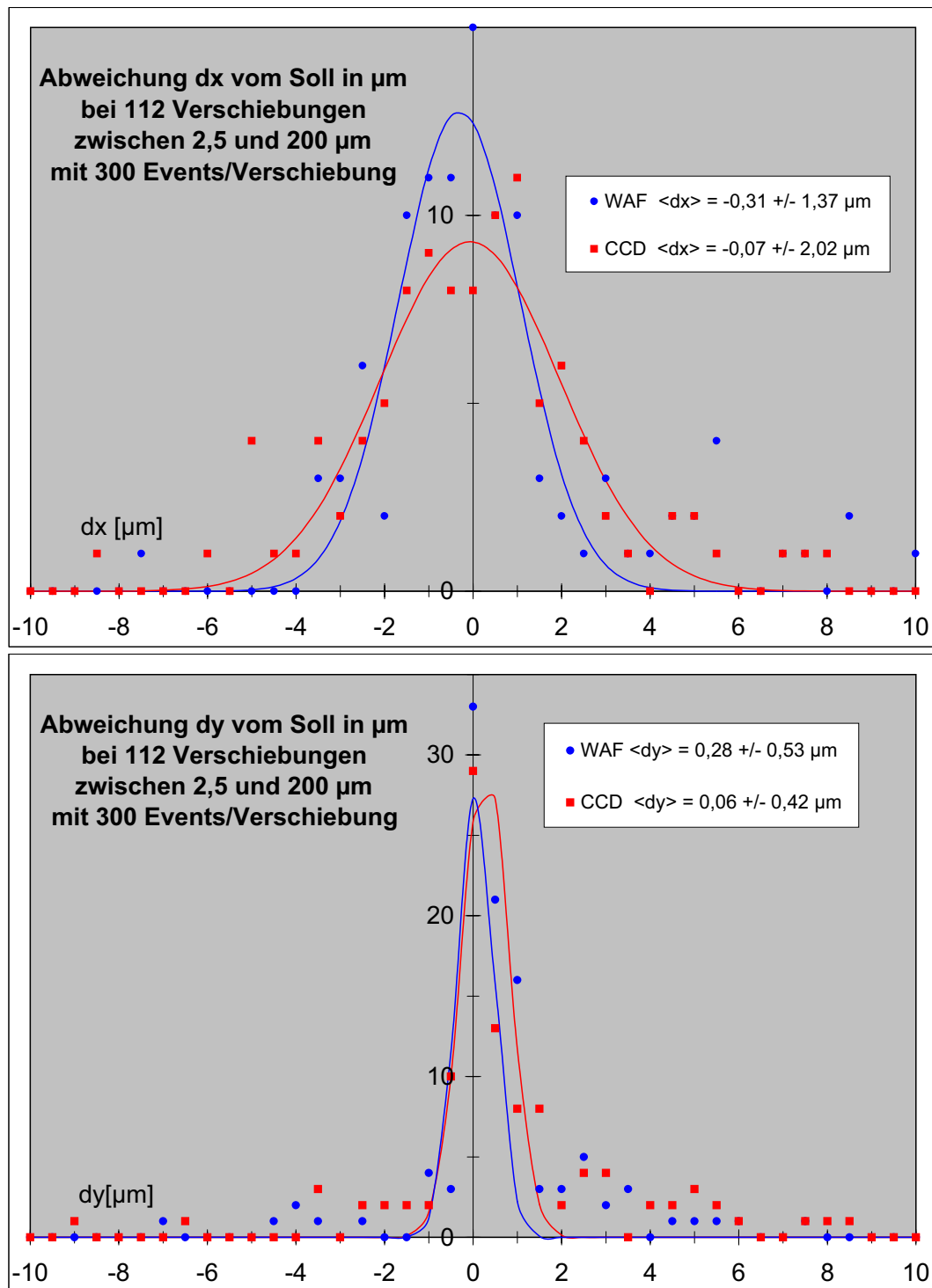


Abbildung 4.20: Die Abweichung dx (oben) und dy (unten) des aus 300 Ereignissen ermittelten Laserstrahl Schwerpunktes vom Sollwert für 112 Verschiebungen zwischen 2,5 μm und 200 μm

4.20 für Silizium Wafer und CCD Kamera aufgetragen. Die etwas schlechtere Genauigkeit in Messung der x -Koordinate bei beiden Systemen liegt an der geringeren Auflösung beider Systeme in dieser Koordinate.

Wie man sieht, sind die mittleren Abweichungen dx und dy vom Sollwert sowohl für den Silizium Wafer als auch für die CCD Kamera für beide Koordinaten x und y wesentlich kleiner als $1 \mu\text{m}$.

Die beiden unabhängigen Positions Mess Systeme (Silizium Wafer und CCD Kamera) liefern im Rahmen der systematischen Unsicherheiten die gleichen Genauigkeiten. D. h. die Positionierungs Genauigkeit der Schrittmotoren ist tatsächlich besser als $1 \mu\text{m}$. Außerdem werden die über den Schrittmotor kontrollierten Bewegungen des Laserstrahls mit Schrittweiten zwischen $2,5 \mu\text{m}$ und $200 \mu\text{m}$, sowohl von der CCD Kamera, als auch vom Silizium Wafer auf besser als $1 \mu\text{m}$ genau reproduziert.

Das Tracker Alignment Systems TAS ist in seiner hier beschriebenen Form also sehr wohl in der Lage kleinste Verschiebungen von bis zu $1 \mu\text{m}$ des Silizium Spurdetektors von AMS-01 zu erfassen.

4.4 Der Einbau des TAS in AMS-01 (Zürich 10/97)

Bevor das TAS, insbesondere der Beamportholder, in den AMS-01 Detektor (Abbildung 4.21) eingebaut werden konnte, mussten die 6 Optiken² im Beamportholder so justiert werden, dass die entsprechenden IR Laserstrahlen

1. parallel zueinander und
2. senkrecht zum Beamportholder

stehen, damit die Laserstrahlen an den dafür vorgesehenen Stellen durch den Detektor gehen. Da die IR-Laserstrahlen des TAS für das menschliche Auge unsichtbar sind, ist diese Justierung nicht trivial. Nur mit Hilfe eines speziellen Indikator-Kärtchens, welches die Wellenlänge des IR-Lasers ($\lambda = 1083 \text{ nm}$) in den sichtbaren Bereich verschiebt, kann der IR-Laserstrahl in Form eines schwach leuchtenden, roten Punktes auf dem Indikator-Kärtchen sichtbar gemacht werden. Bedingt durch den engen Konstruktions Zeitplan von AMS-01 standen außerdem nur 1,5 Tage zur Lösung dieses Problems zur Verfügung.

Hierzu wurde der Beamportholder auf eine Tischplatte montiert. Mit einem rechten Winkel wurden dann zwei Schienen senkrecht zum Beamport-

²Nur 4 der 6 Optiken werden von der TAS-Box mit Laserlicht versorgt (vgl. Kapitel 4.2.1).

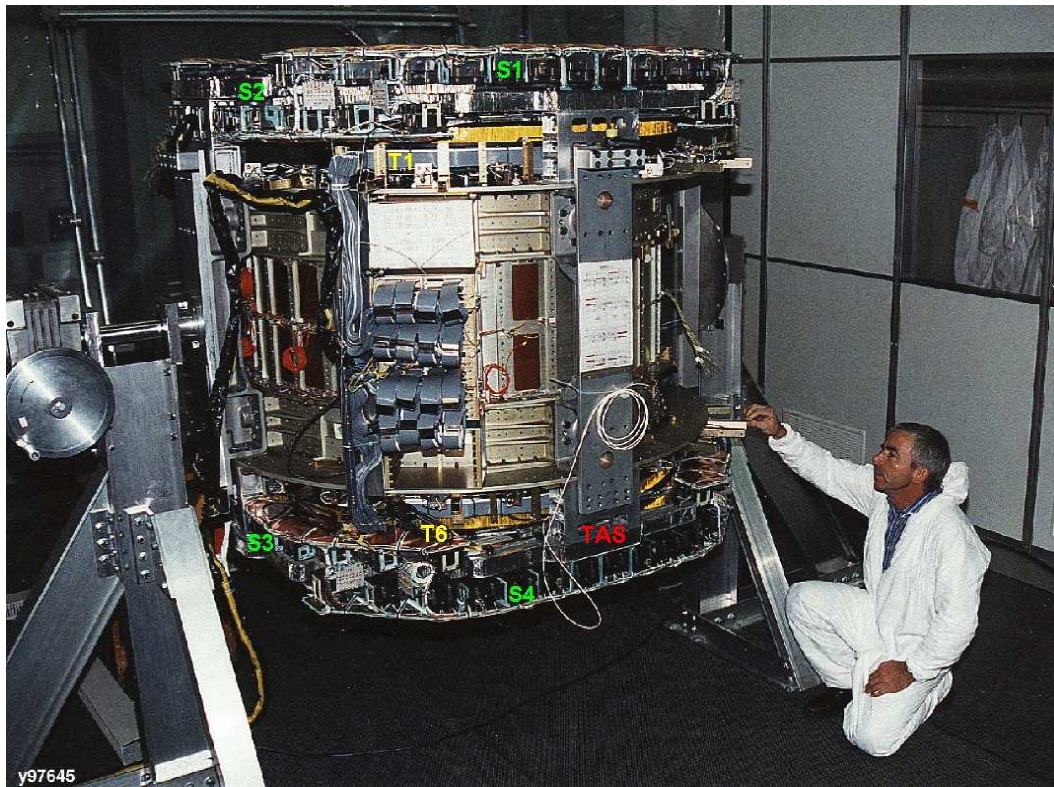


Abbildung 4.21: Der AMS-01 Detektor beim Zusammenbau in der ETH Zürich

holder angebracht. An diesen ca. 1,5 m langen Schienen wurde das Indikatorkärtchen mit Hilfe eines Schlittens entlang bewegt. Dabei wurden die 6 Schrauben einer jeden Optik solange justiert, bis der rote Laserpunkt auf dem Indikatorkärtchen entlang der ganzen Schiene an der gleichen Stelle blieb. Auf diese Weise wurde sicher gestellt, dass die vier Laserstrahlen sowohl senkrecht zum Beamportholder als auch ausreichend parallel zueinander verlaufen. Die begrenzenden Öffnungen, durch die die Laserstrahlen bei genauer Justierung hindurch müssen, sind die Löcher in den Kaptonkabeln, der Supportstruktur und der Abschirmung mit einem Durchmesser von ca. 6 mm auf ca. 1 m Abstand der Ebene 1 zum Beamportholder.

Durch diese Einstellung der Strahlen war nach dem Einbau des Beamportholders in der Ebene 6 kaum noch eine weitere Justierung an den beiden Kugelenken des Beamportholders notwendig. Die Neigung des Beamportholders in φ und θ war schon bei der oben beschriebenen Einstellung so eingerichtet, dass die Laserstrahlen den Beamportholder senkrecht zu seiner Befestigungsebene verlassen.

Nach dem Einbau des Beamportholders in den AMS-01 Detektor im Oktober 1999 an der ETH³ Zürich, war es sehr wichtig zu wissen, ob die 4 Laserstrahlen auch tatsächlich durch den ganzen Detektor hindurch gehen. Diese

³Eidgenössische Technische Hochschule

Untersuchungen werden im folgenden Kapitel 4.5 beschrieben.

4.5 TAS Messungen in AMS-01 an der ETHZ (Zürich 12/97)

Da die beiden TASE Pulser Boards (vgl. Kapitel 4.2.3) zu diesem Zeitpunkt noch nicht eingebaut waren, musste das Lasersystem von dem externen Laserpulsener der Firma ILX mit Pulsen versorgt werden. Der Vorteil des ILX Laserpulsers gegenüber den TASE Boards liegt vor allen Dingen darin, dass der ILX Pulsener auch höhere Laserströme als nur 130 mA liefern kann, und damit eine wesentlich höhere Dynamik des Lasersignals zulässt, als die TASE Boards.

Auch die Auslese Elektronik des Silizium Spurdetektors war zu diesem Zeitpunkt noch nicht installiert, so dass stattdessen ein an der Universität Genf entwickeltes, PC gestütztes „stand alone“ Auslese System zum Einsatz kam, welches immer nur eine Leiter des AMS-01 Silizium Spur Detektors gleichzeitig auslesen kann.

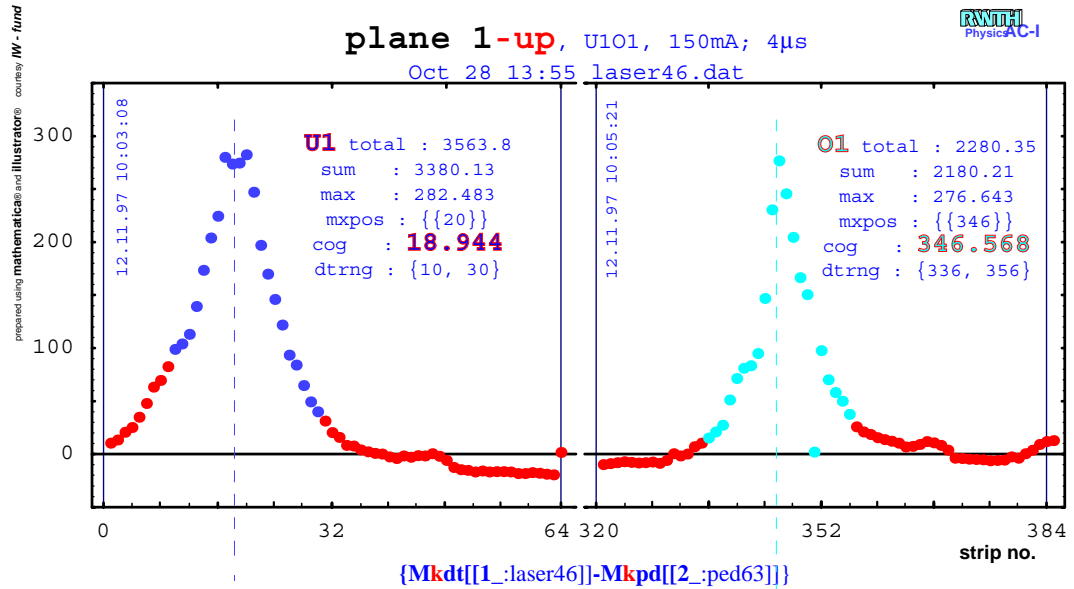
Der AMS-01 Detektor war zu diesem Zeitpunkt in einer Halterung eingebaut, die es erlaubte, den kompletten Detektor um 360° zu drehen, damit zur Vereinfachung der Montage alle Stellen schnell erreicht werden konnten (siehe Abbildung 4.21).

In dieser Konfiguration wurden bei 150 mA Laserstrom und $4 \mu\text{s}$ Pulsdauer zwei Messungen gemacht und dabei der AMS-01 Detektor jeweils um 180° gedreht, um so festzustellen, ob

1. die Laserstrahlen tatsächlich alle 6 Ebenen des Silizium Spurdetektors durchdringen
2. die Laserstrahlen durch die Silizium Sensoren nicht zu stark deformiert werden
3. beim Drehen des Detektors um 180° eine Verschiebung des Lasersignals beobachtet werden kann.

Da die Alignmentsensoren für das Strahlenpaar U2/O2 für die Ebene 2 nicht mehr mit dem modifizierten Kaptonkabel ausgestattet werden konnten (vgl. Kapitel 4.2.2) wurde bei diesen Messungen lediglich das Strahlenpaar U1/O1 betrachtet. Das Ergebnis dieser Messung auf Ebene 1 zeigt Abbildung 4.22.

Wie man sieht, hat man bei der verwendeten Laserintensität von 150 mA mit $4 \mu\text{s}$ Pulsbreite in der laserfernen Ebene 1 noch genügend hohe Signale (> 200 ADC-Kanäle) für die Ortsmessung zur Verfügung. Die Profile sind



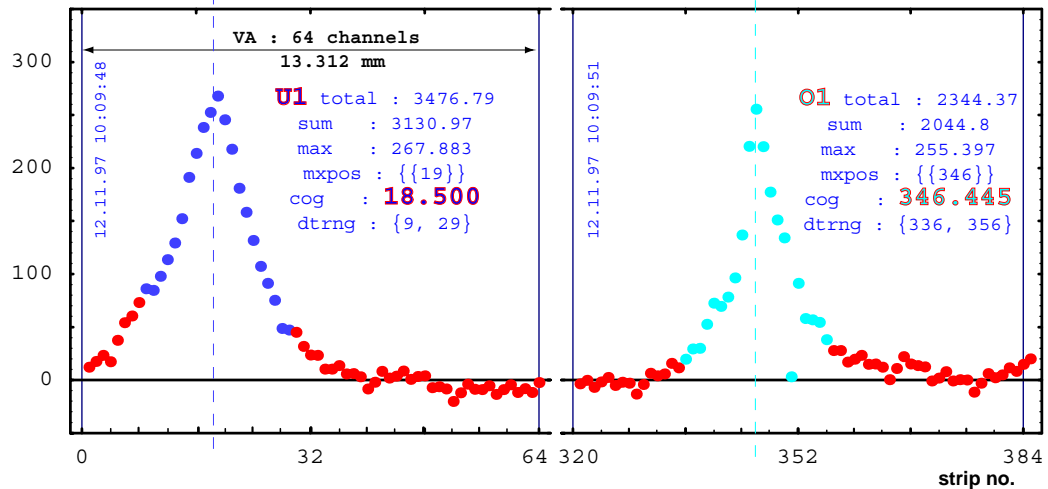
TAS laser beams recorded with AMS-Si detectors on plane1

AMS x coordinate (k - side readout, x strip pitch : 208 μ)

(behind 5 layers of Si and 1 layer of kapton!)

plane 1-down, U1O1, 150mA; 4 μ s

Oct 28 19:18 laser50.dat



Q3M1:10ams97@Q3M1:
ETHZ_laser:results:
p11-up&down_k_illus
by ww

Abbildung 4.22: 150 mA, 4 μ s Lasersignale U1O1 auf Ebene 1

beim Durchgang durch die 5 Silizium Ebenen zwar leicht deformiert worden, aber immer noch „gaussisch“ genug, um einen Gaussfit (vgl. Kapitel 4.2.4) durchzuführen. Leider sind die TASE Boards mit maximal 130 mA Laserstrom nicht in der Lage, derartige, ausreichend große Signale auf der Ebene 1 zu erzeugen (vgl. Kapitel 4.3.1.1).

Außerdem erkennt man, dass die Drehung des Detektors um 180° kaum Einfluss auf die Position der Signale hat. Dies ist einleuchtend, da die Erdanziehungskraft in beiden Stellungen zwar entgegengesetzt aber dennoch parallel auf die Detektor Struktur wirkt. Insbesondere wirkt die Erdanziehungskraft in beiden Stellungen auch parallel zu den Laserstrahlen des TAS, so dass keine unterschiedliche Verschiebung zu erwarten ist.

Kapitel 5

Der STS-91 Weltraumflug von AMS-01 (NASA 6/98)

Am Donnerstag, den 29. Januar wurde der AMS-01 Detektor an Bord einer Boeing 747 Cargo Maschine der Lufthansa von Zürich zum *Kennedy Space Center* (KSC) in Florida/USA transportiert. Dort wurden die letzten Komponenten des AMS-01 Detektors montiert. Außerdem wurde der Detektor in die sogenannte **Unique Support Structure** USS eingebaut, mit der der Detektor in der Payload Bay des Space Shuttles befestigt wird (siehe Abbildung 5.1).

Am Dienstag, den 2. Juni 1998 um 17:10:00 Uhr CDT startete der AMS-01 Detektor an Bord des Space Shuttles *Discovery* vom Launch Pad 39-A des amerikanischen Weltraumbahnhofs *Kennedy Space Center* KSC in Florida zu seinem ersten, neuntägigen Weltraumflug mit dem Missionsnamen *STS-91* (siehe Abbildung 5.2).

Die Mitarbeiter der AMS-Kollaboration befanden sich während der gesamten Flugzeit im Mission Control Center des *Johnson Space Center* JSC in Houston (Texas).

Wegen eines technischen Defektes in der Datenkommunikation, des sogenannten KU-Bands, war die online Kommunikation zwischen der Bodenstation und dem AMS-01 Detektors während des gesamten Flugs gestört. Eine Verbindung zu AMS-01 war immer nur dann möglich, wenn sich das Space Shuttle gerade über den USA befand. Daher konnten stichprobenartig immer nur wenige Daten online analysiert werden. Alle Daten wurden jedoch an Bord der *Discovery* auf Festplatten gespeichert, so dass durch den Ausfall des KU Bands kein Datenverlust entstand.

Die niedrige Datenkommunikationsrate zwischen AMS und Mission Control Center machte sich jedoch vor allen Dingen beim Einschaltvorgang von AMS bemerkbar, da dieser -ferngesteuert aus dem Mission Control Center in Houston- eines gewissen Feedbacks bedarf, um so anhand der ankommenden

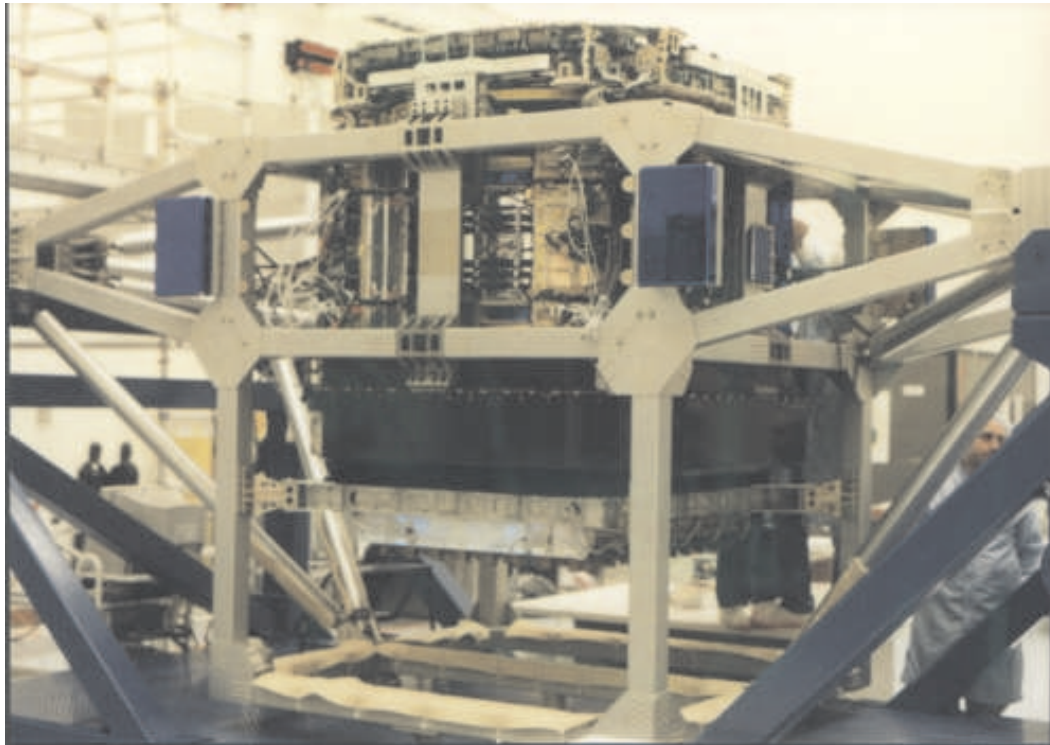


Abbildung 5.1: Der AMS-01 Detektor in der USS am *Kennedy Space Center* KSC in Florida/USA

Daten den nächsten Schritt des Einschaltprozesses zu entscheiden.

Aus diesem Grunde liegen zu Beginn des neuntägigen Weltraumflugs nur sehr wenig Daten des TAS vor, da die Prioritäten an anderen Stellen gesetzt wurden.

Am dritten Tag der Mission dockte die *Discovery* an der russischen Weltraumstation MIR an, um den amerikanischen Astronauten Dr. Andrew S. W. Thomas an Bord zu nehmen. Abbildung 5.3 zeigt die *Discovery* mit geöffneter Payload Bay bei der Annäherung an die russische Weltraumstation MIR, von der MIR aus fotografiert. Im Heckteil der *Discovery* ist der AMS-01 Detektor deutlich zu erkennen.

Die *Discovery* blieb vier Tage mit der MIR verbunden, bevor sie am siebten Tag der Mission wieder abdockte, um noch weitere 2 Tage alleine im Orbit zu verbleiben. AMS-01 nahm fast während der gesamten Zeit Daten (ca. 100 Millionen Ereignisse).

Am Freitag, den 12. Juni 1998 kehrte die *Discovery* nach einer erfolgreichen Mission wieder auf die Erde zurück und landete um 13:03:00 Uhr im *Kennedy Space Center* KSC. Nachdem der AMS-01 Detektor entladen war, wurden die Festplatten mit den Daten ausgewertet und analysiert. (vgl. Kapitel 7).



Abbildung 5.2: Start der Raumfähre *Discovery* zur Mission STS-91 mit AMS-01 an Bord am 2. Juni 1998 vom Launch Pad 39-A des *Kennedy Space Centers* KSC [123]

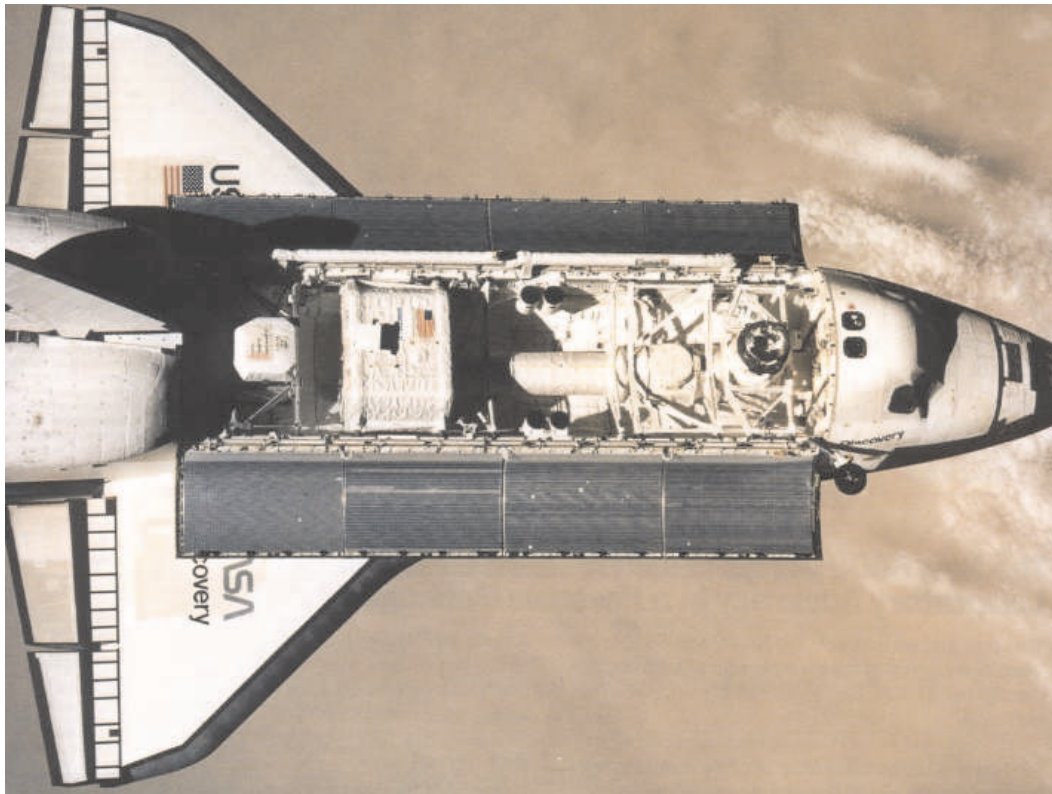


Abbildung 5.3: AMS-01 an Bord der Raumfähre *Discovery* von der Raumstation MIR aus fotografiert [123]

5.1 Die STS-91 Laserdaten

Die TAS Ergebnisse für die Messungen der 2 Laserstrahlen des Strahlenpaar U1/O1 für die x und y Koordinaten auf den (lasernahen) Ebenen 6, 5 und 4 sind in den folgenden 4 Abbildungen 5.4, 5.5, 5.6 und 5.7 zu sehen. Auf den Ebenen 3, 2 und 1 war das Lasersignal durch die Abschwächung der Silizium Sensoren zu klein, um eine Positionsbestimmung nach dem in Kapitel 4.2.4 beschriebenen Fitverfahren durchzuführen.

Das Strahlenpaar U2/O2 wurde nicht analysiert, da für dieses Strahlenpaar ab Ebene 3 keine Löcher mehr im Kaptonkabel waren, so dass das Signal stark deformiert ist. Die fehlenden Messpunkte auf der (lasernächsten) Ebene 6 zu Beginn der Mission liegen daran, dass sich die Signale dieser Ebene zu dieser Zeit in Sättigung befanden, und von daher auch ungeeignet für eine Positionsbestimmung nach dem in Kapitel 4.2.4 beschriebenen Fitverfahren sind.

Wie man sieht, sind besonders auf der S-Seite (y -Koordinate) des U1 Strahls starke Bewegungen des Signals mit Amplituden von bis zu $60 \mu\text{m}$ (Ebene 4) zu verzeichnen. Die S-Seite (y -Koordinate) des O1 Strahls zeigt ein ähnliches Verhalten, wenn auch mit einer geringeren Amplitude von ca. $30 \mu\text{m}$

u1 beam x (k-strips) TAS & tracker stability (at ~ 5 hour spacing) during STS 91flight

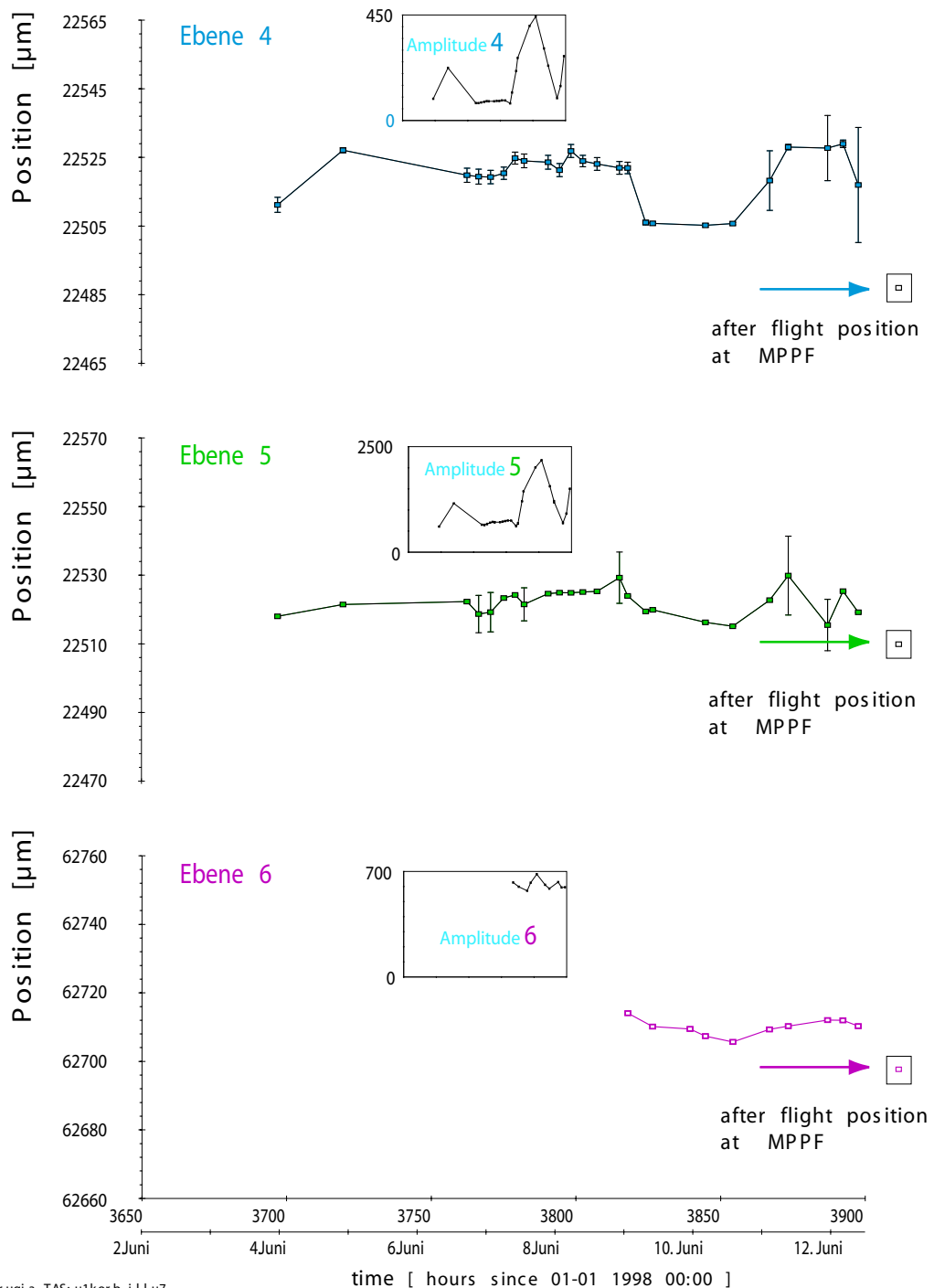
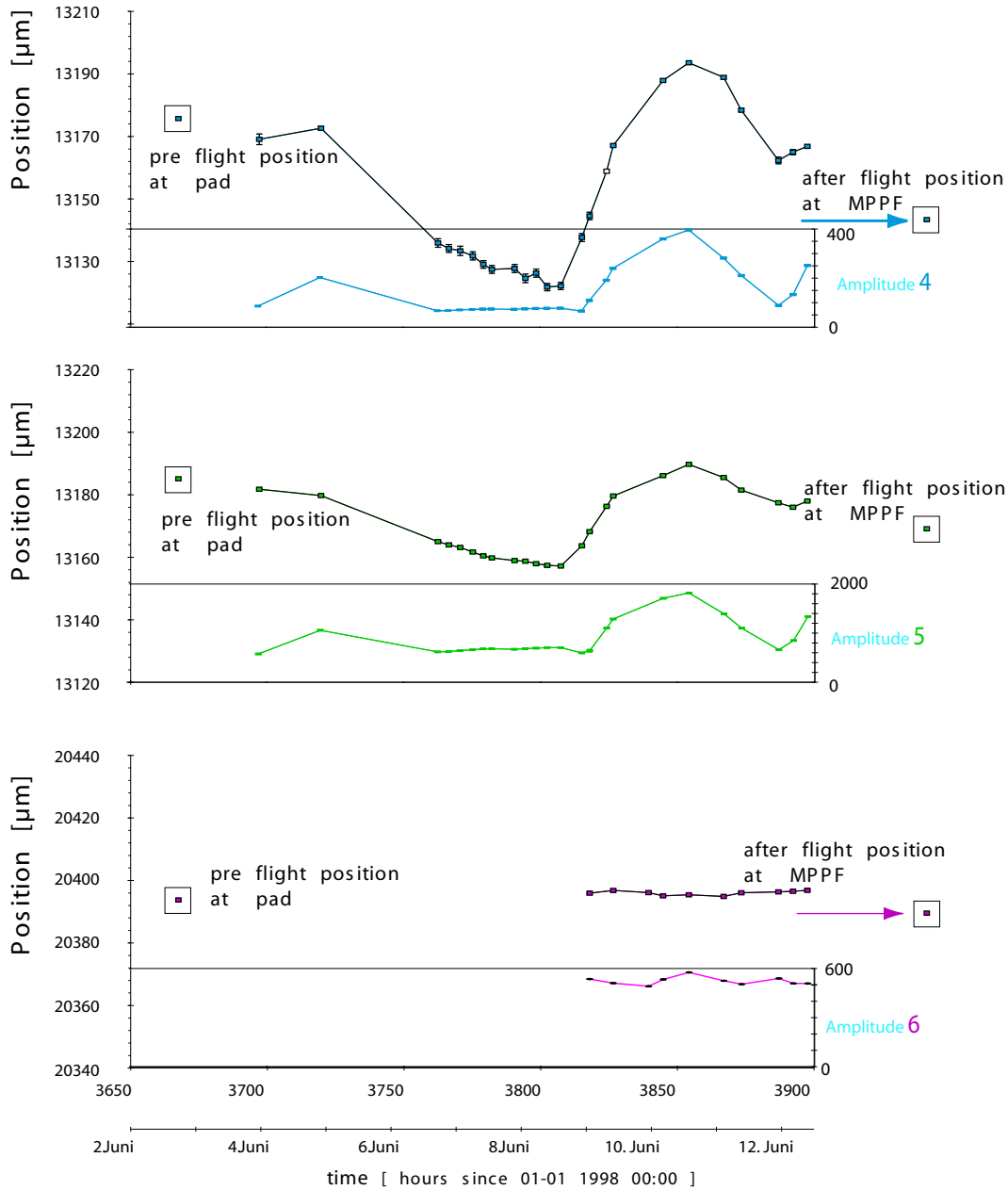


Abbildung 5.4: Position des Laserstrahls U1 in x -Richtung in den Ebenen 4, 5 und 6 während des 9 tägigen Weltraumflugs STS-91

u1 beam y (s-strips) (at ~ 5 hour spacing)
TAS & tracker stability during **STS 91** flight



Perugi a_TAS: u1sorb.i11u7
 mw & ww 03-apr-99

Abbildung 5.5: Position des Laserstrahls U1 in y -Richtung in den Ebenen 4, 5 und 6 während des 9 tägigen Weltraumflugs STS-91

01 beam x (k-strips) TAS & tracker stability during STS 91flight
 (at ~ 5 hour spacing)

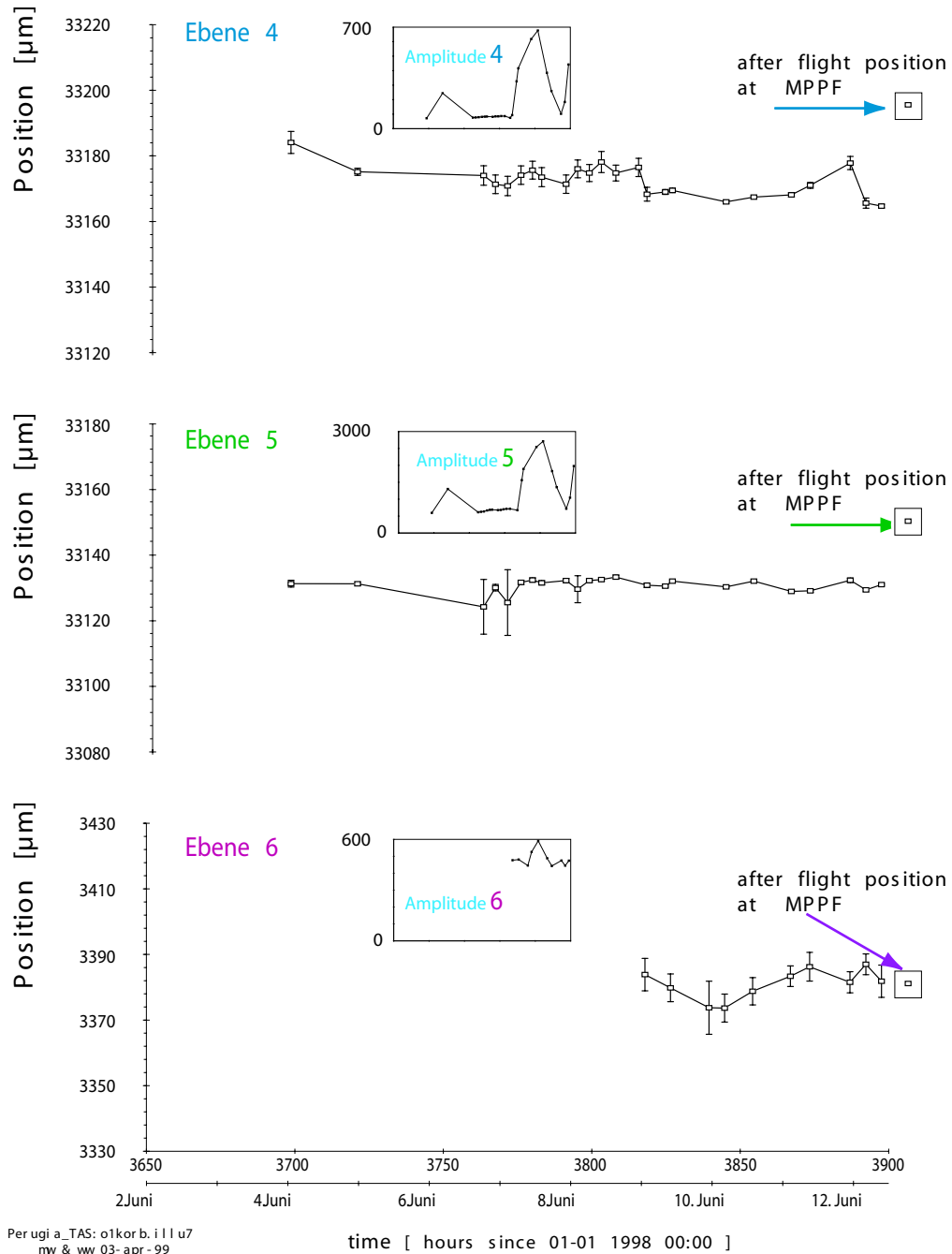


Abbildung 5.6: Position des Laserstrahls O1 in x-Richtung in den Ebenen 4, 5 und 6 während des 9 tågigen Weltraumflugs STS-91

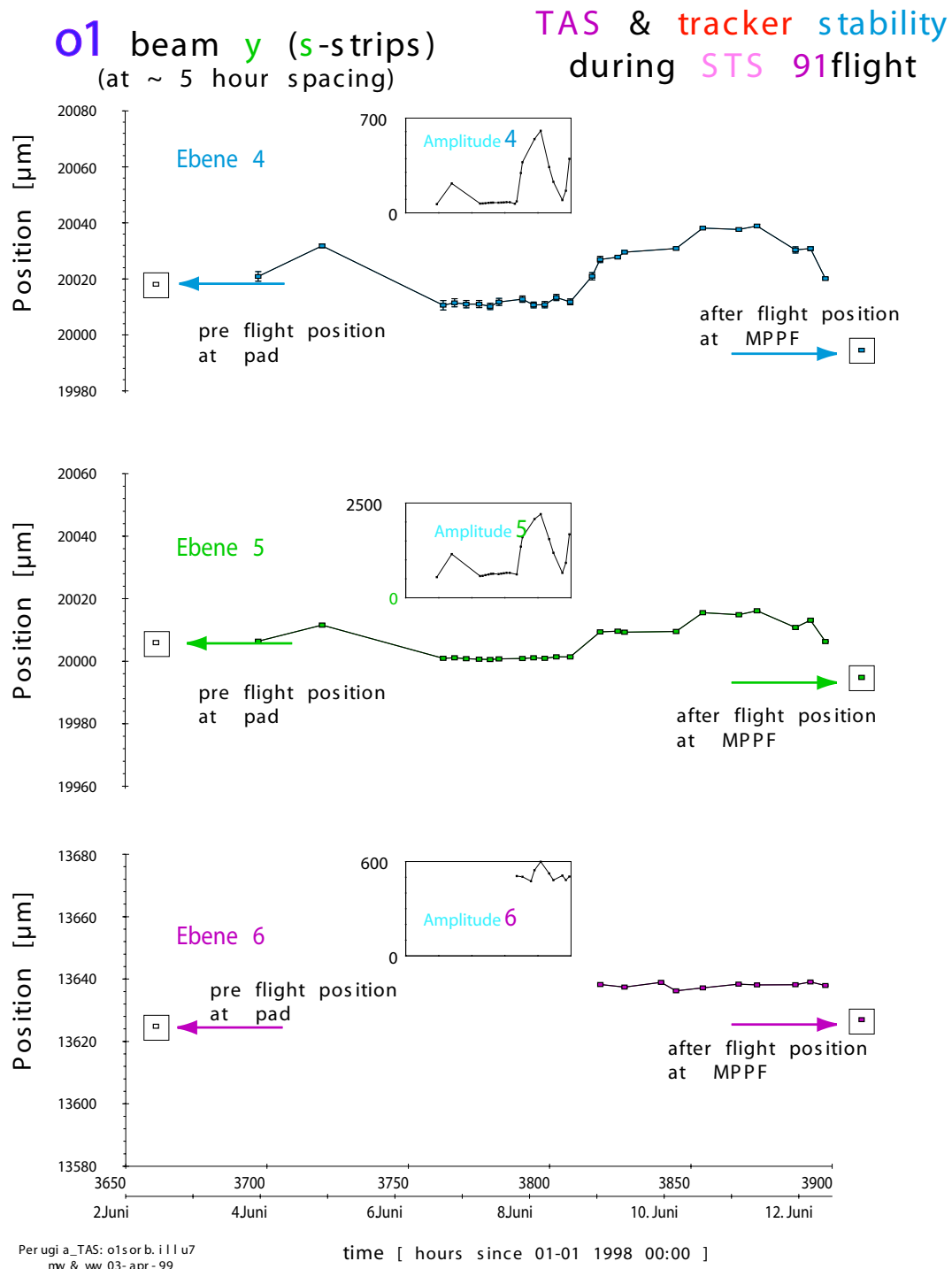


Abbildung 5.7: Position des Laserstrahls O1 in y -Richtung in den Ebenen 4, 5 und 6 während des 9 tägigen Weltraumflugs STS-91

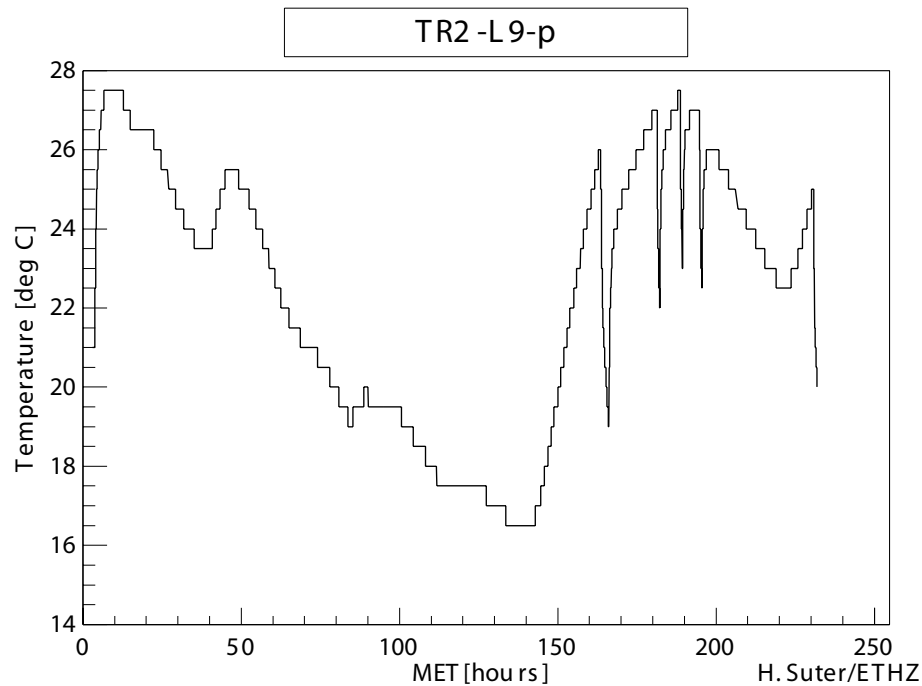


Abbildung 5.8: Mittlerer Temperaturverlauf des Silizium Spurdetektors während des 9 tägigen Weltraumflugs STS-91

auf Ebene 4. Auffallend ist außerdem, dass sich die Signalbewegungen des TAS zeitlich mit den starken Amplitudenschwankungen der Lasersignale decken, die ebenfalls in den Abbildungen 5.5, 5.7, 5.4 und 5.6 eingetragen sind.

Derartig starke Schwankungen in der Amplitude des TAS um Faktoren ≥ 2 konnten auf der Erde im Labor nicht reproduziert werden. Von daher ist die Ursache dieser Schwankungen bisher ungeklärt. Eine mögliche Ursache könnte mit der Temperatur von AMS-01 im Orbit zusammenhängen, die ebenfalls einen ähnlichen Verlauf zeigt, wie die TAS Positions- und Amplitudenkurven (siehe Abbildung 5.8).

Die K-Seite (x -Koordinate) des U1/O1 Strahlenpaares zeigt einen etwas ruhigeren Verlauf als die oben beschriebene S-Seite (y -Koordinate), obwohl die Struktur der Kurven auch hier wieder grob dem Temperatur- und Amplitudenverlauf folgt.

Temperaturabhängige Verschiebungen der Nachweisstruktur sollten sich in der Längsrichtung (S-Seite) der Silizium Leitern wesentlich stärker bemerkbar machen als in der 15 mal kürzeren Querrichtung der Silizium Leitern. Von daher spricht die Tatsache, dass die K-Seite während des STS-91 einen wesentlich ruhigeren Positionsverlauf zeigt als die S-Seite gegen eine temperaturbedingte Verschiebung der Leitern, obwohl der generelle Temperaturverlauf von AMS-01 während des STS-91 Weltraumflugs eine äußerst ähnliche Struktur zeigt, wie der Positionsverlauf der S-Seiten des Silizium Trackers.

Auffallend bei allen vier Positionsverläufen des TAS ist die Tatsache, dass die maximale Amplitude der gemessenen Bewegungen mit dem Abstand zum Laser immer größer wird. Dieser Umstand legt die Vermutung auf ein Kippen des Lasersystems bezüglich der Trackerstruktur nahe.

Aufgrund der geringen Anzahl von Messpunkten kann eine eventuelle Bewegung des TAS nicht genau von den eventuellen Bewegungen des Silizium Spurdetektors getrennt werden. Genauere Untersuchungen hierzu finden sich in der Diplomarbeit von Herrn Dipl. Phys. Martin Weisgerber [113], der im Rahmen dieser Diplomarbeit die Analysen der STS-91 Laserdaten durchführte.

Gleichzeitig zu diesen Untersuchungen der Laserdaten wurde vom Verfasser der vorliegenden Arbeit das Prinzip des „Cosmic Alignment“ entwickelt. Dieses Verfahren versucht, die Messungen des TAS zu ergänzen, indem es zusätzliche Positionsinformationen der Tracker Struktur aus den während des STS-91 Weltraumflugs kontinuierlich und mit wesentlich höherer Statistik gemessenen kosmischen Teilchen Daten extrahiert (vgl. Kapitel 7.2).

5.2 Zusammenfassung des AMS-01 STS-91 Laser Alignment

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich die STS-91 Laser Messungen generell in drei verschiedene Phasen einteilen lassen: Eine „ruhige Phase“ zwischen dem dritten und siebten Tag der zehntägigen STS-91 Mission (während die *Discovery* an MIR angedockt war) und den beiden „unruhigen Phasen“ davor und danach.

Während der ruhigen Phase ist der Silizium Tracker im Rahmen von $\leq 10 \mu\text{m}$ stabil. Während der unruhigen Phase gibt es dagegen Bewegungen von bis zu $40 \mu\text{m}$, die sich mit einer Genauigkeit von $10 \mu\text{m}$ auch in den Cosmic Alignmentdaten widerspiegeln (vgl. Kapitel 7.2 Abbildung 7.17). Es existiert eine starke Korrelation zwischen der Temperatur von AMS-01 und den entsprechend gemessenen Bewegungen.

Kapitel 6

TAS Messungen nach dem STS-91 Weltraumflug von AMS-01

Am Freitag, den 12. Juni 1998 kehrte das Space Shuttle *Discovery* mit dem AMS-01 Detektor an Bord nach von seinem erfolgreichen Weltraumflug STS-91 wieder auf die Erde zurück und landete um 13:03 Uhr im *Kennedy Space Center* KSC.

Der AMS-01 Detektor wurde ausgeladen und stand noch ca. 3 Wochen im *Kennedy Space Center* KSC für Messungen zur Verfügung, bevor er im Juli 1998 zum CERN nach Genf transportiert wurde.

Von dort aus wurde der AMS-01 Detektor im September 1998 für 2 Wochen nach Darmstadt zum GSI¹ transportiert, um zu Kalibrationszwecken Teststrahlendaten mit schweren Ionen (Helium und Kohlenstoff) zu nehmen.

Im Dezember 1998 wurden anlässlich einer weiteren Teststrahlungsmessung von AMS-01 am CERN schließlich noch einmal TAS Messungen im AMS-01 Detektor durchgeführt, bei denen der Detektor online um 180° gedreht wurde. Der Detektor befand sich zu diesem Zeitpunkt in einer Positionier Vorrichtung, die den Detektor um die x -Achse drehen konnte.

Bei allen drei genannten Stationen lieferte das Laser System immer ein hervorragendes Referenzsignal zur Überprüfung der Funktionstüchtigkeit des Silizium Spurdetektors. Dies war vor allen Dingen bei der schnellen Suche nach Ursachen für Fehlfunktionen des Detektors im Teststrahl äußerst hilfreich.

Die Messungen an diesen drei Stationen werden in den folgenden drei Unterkapiteln beschrieben.

¹Gesellschaft für Schwer Ionen Forschung

6.1 TAS Messungen am KSC (Florida 7/98)

Nach dem Ausbau des AMS Detektors aus dem Space Shuttle *Discovery* wurden am **Kennedy Space Center** KSC in Florida einige TAS-Messungen durchgeführt, bei denen zwei verschieden schwere Gewichte auf zwei verschiedenen Positionen auf der Ebene 6 aufgebracht wurden (siehe Abbildung 6.1). Dadurch wurde die Ebene 6 asymmetrisch belastet und der in der Ebene 6 befindliche Beamportholder leicht zur Seite gekippt. Dieses Kippen der Laserstrahlen um die x -Achse sollte sich in den entsprechenden y -Positionsmessungen auf den anderen Ebenen widerspiegeln.

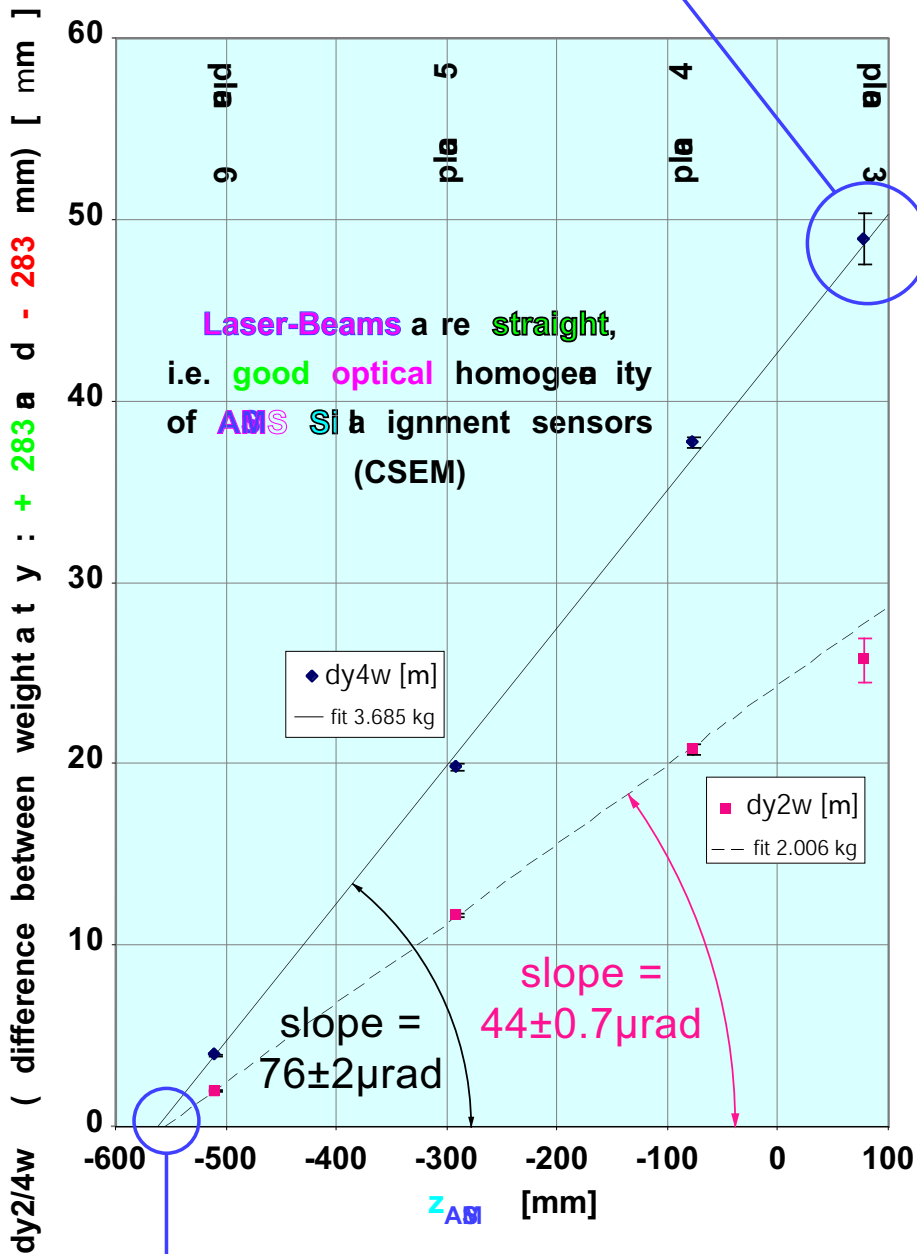
Abbildung 6.1 zeigt das Ergebnis dieser Messungen mit den Gewichten am KSC für die y -Koordinaten (S-Seite) des U1 Strahls auf den Ebenen 3 bis 6 für die zwei verschiedenen Gewichte. Aufgetragen ist die Differenz zwischen den beiden gemessenen y -Positionen der Laserstrahlen auf den Ebenen 3 bis 6 für die beiden verschiedenen Positionen ($y = \pm 283$ mm) der beiden Gewichte auf Ebene 6. Bemerkenswert sind vor allen Dingen die folgenden drei Ergebnisse dieser Messungen.

- Die einzelnen Messpunkte liegen auf allen 4 Ebenen mit einer Genauigkeit von $\leq 3 \mu\text{m}$ auf den gefitteten Geraden. D. h., dass die Laserstrahlen tatsächlich geradlinig durch den Detektor hindurch gehen, und nicht von den Silizium Sensoren abgelenkt werden (vgl. Kapitel 4.3.1.2).
- Das Verhältnis der beiden Steigungen der beiden gefitteten Geraden entspricht -wie erwartet- dem Verhältnis der beiden Gewichte.
- Die beiden Fitgeraden schneiden sich mit einer Genauigkeit von $< 2 \mu\text{m}$ exakt an der Stelle, an der der Beamportholder sitzt.

Diese Messung zeigt sehr deutlich, dass mit dem TAS prinzipiell Positionsmessungen mit einer Genauigkeit von besser als $3 \mu\text{m}$ möglich sind, vorausgesetzt man hat genügend Ereignisse und vor allen Dingen genügend Laserintensität in allen Ebenen zur Verfügung.

TAS U1 inclination through weights on plane6

resolution is proportional to σ / n , strips not used in readout should not be aluminized, the proven antireflective coating is a definite advantage



more current from the TASE module is needed for reasonable measurements on planes 2 and 1

systematic errors of 1 - 2 μm are possible with sufficiently frequent (1/1000s) laser runs



Abbildung 6.1: Auslenkung der TAS Laserstrahlen bei mechanischer Belastung der Ebene 6

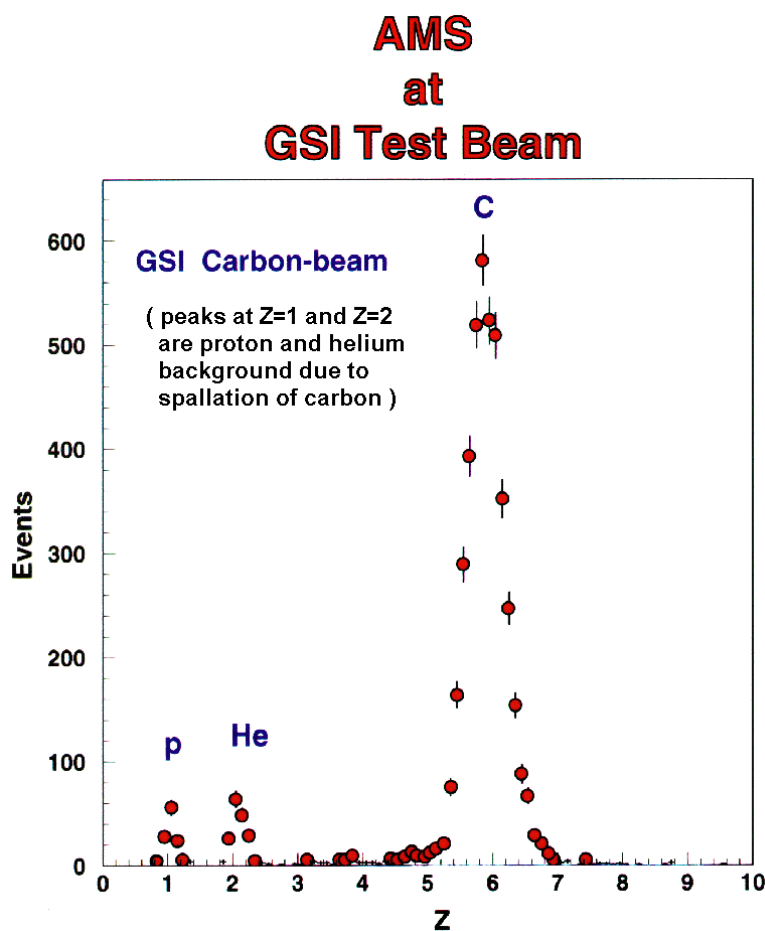


Abbildung 6.2: Teststrahl Spektrum am GSI in Darmstadt

6.2 TAS Messungen am GSI (Darmstadt 9/98)

Im September 1998 wurde der AMS-01 Detektor zum GSI nach Darmstadt transportiert, um dort im Teststrahl mit schweren Ionen kalibriert zu werden. Dabei war es möglich, auch Laserdaten zu nehmen. Abbildung 6.2 zeigt das mit AMS-01 gemessene Ladungs Spektrum beim Teststrahl am GSI in Darmstadt.

Die TAS Messungen wurden zu Beginn der Strahlzeit nur stündlich genommen, später (nach 5 Stunden) dann ca. alle 10 Minuten. Analysiert wurde nur der O2 Strahl auf den Ebenen 4, 5 und 6, da der U2 Strahl starke Deformationen zeigte und das U1/O1 Strahlenpaar wegen eines Defektes im Steuerprogramm nicht zu Verfügung stand. Die Intensitäten auf den laserfernen Ebenen 1, 2 und 3 waren aufgrund der Abschwächung bei Durchgang durch die Silizium Wafer wiederum zu schwach für eine zufriedenstellende Analyse.

Die Ergebnisse dieser Messungen für die y - und die x -Koordinate des O1-Strahls in den Ebenen 4, 5 und 6 zeigen Abbildungen 6.4 und 6.3. Auch hier

zeigt sich, dass die y -Seite genau wie beim Weltraumflug STS-91 (vgl. Kapitel 5) die wesentlich unruhigere Koordinate ist, während sich die x -Koordinate wiederum durch einen äußerst stabilen Positionsverlauf auszeichnet. Anders als beim Weltraumflug STS-91 zeigen allerdings bei den am GSI erhobenen Daten beide Laseramplituden x und y auf allen Ebenen einen sehr konstanten Verlauf.

Gerade zu Beginn der Messungen, also kurz nach Einschalten des Detektors, zeigt die y -Koordinate starke Bewegungen, deren Struktur sich auf den einzelnen Ebenen wiederholt, mit Amplituden, die wiederum umso größer werden, je weiter die entsprechende Ebene vom Laser entfernt ist. Woher die zyklischen Strukturen mit einer Frequenz von ca. einer Stunde stammen, konnte nicht abschließend geklärt werden. Fest steht nur, dass der Betrieb in der Messhalle ab ca. 22:00 Uhr (Stunde 6474) deutlich nachgelassen hatte, was sich ebenfalls in den Positionsmessungen der y -Koordinate widerspiegelt.

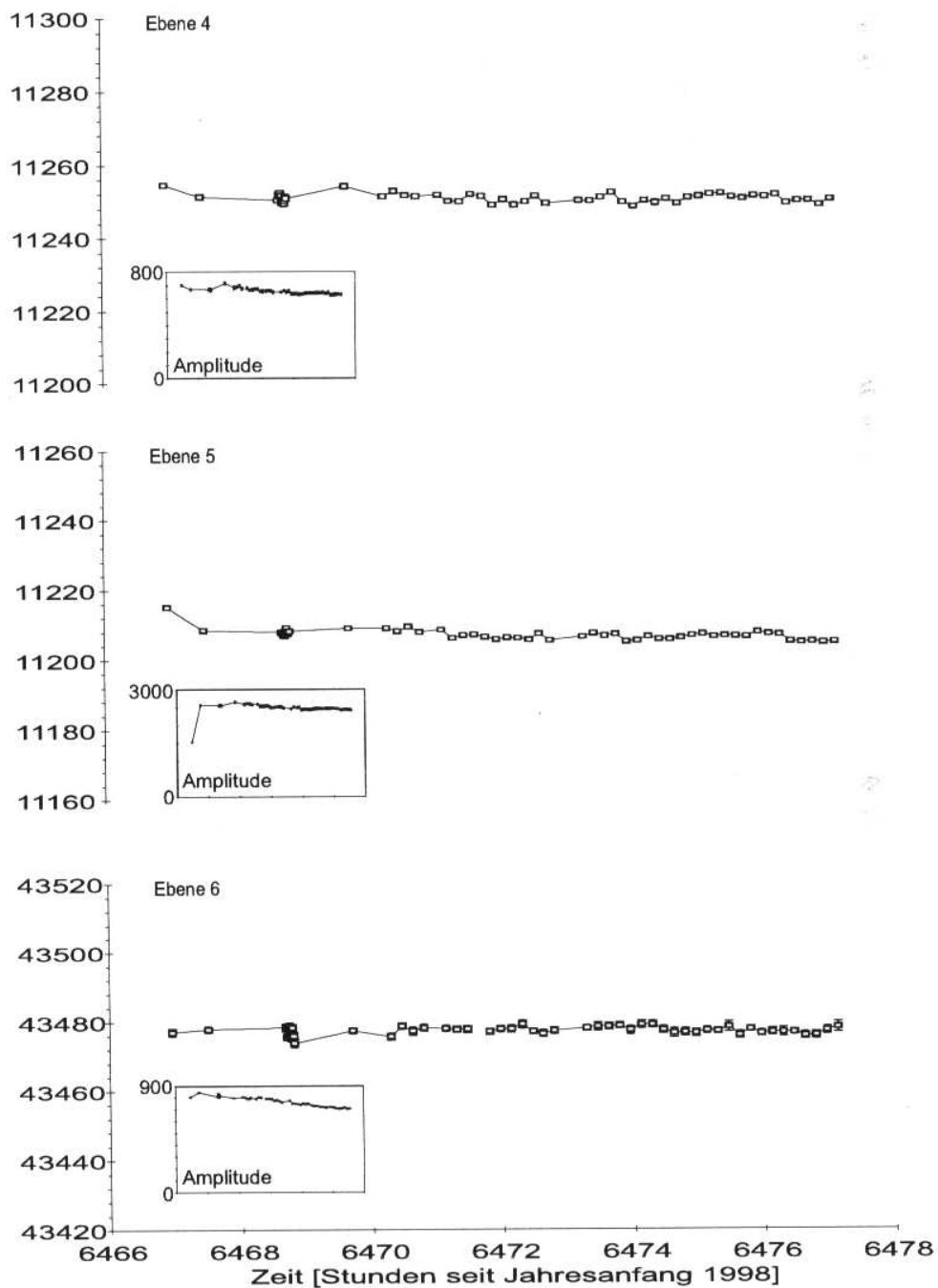


Abbildung 6.3: Position des Laserstrahls O₂ in x -Richtung in den Ebenen 4, 5 und 6 am GSI

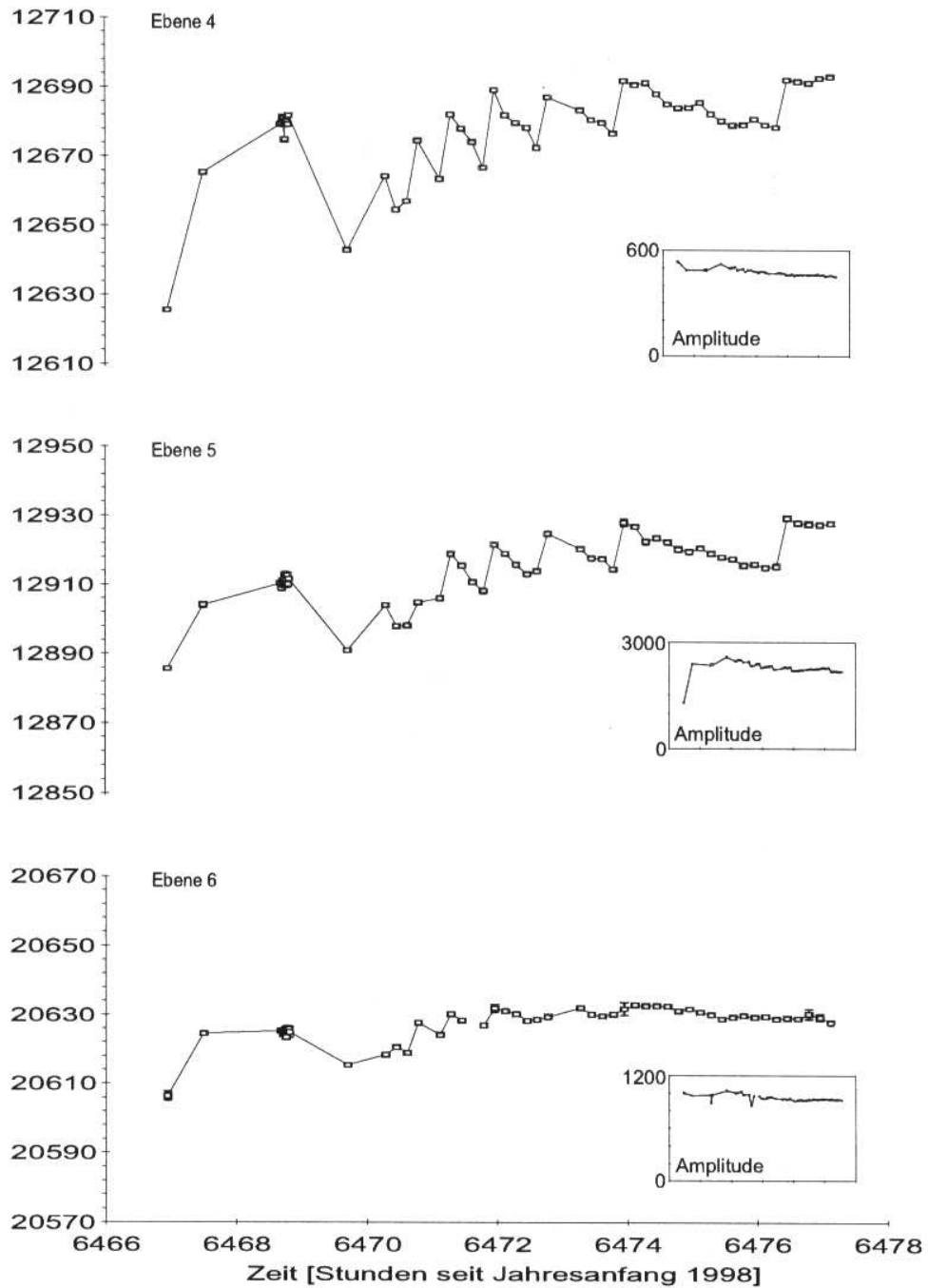


Abbildung 6.4: Position des Laserstrahls O₂ in y -Richtung in den Ebenen 4, 5 und 6 am GSI

AMS at CERN - Test Beam

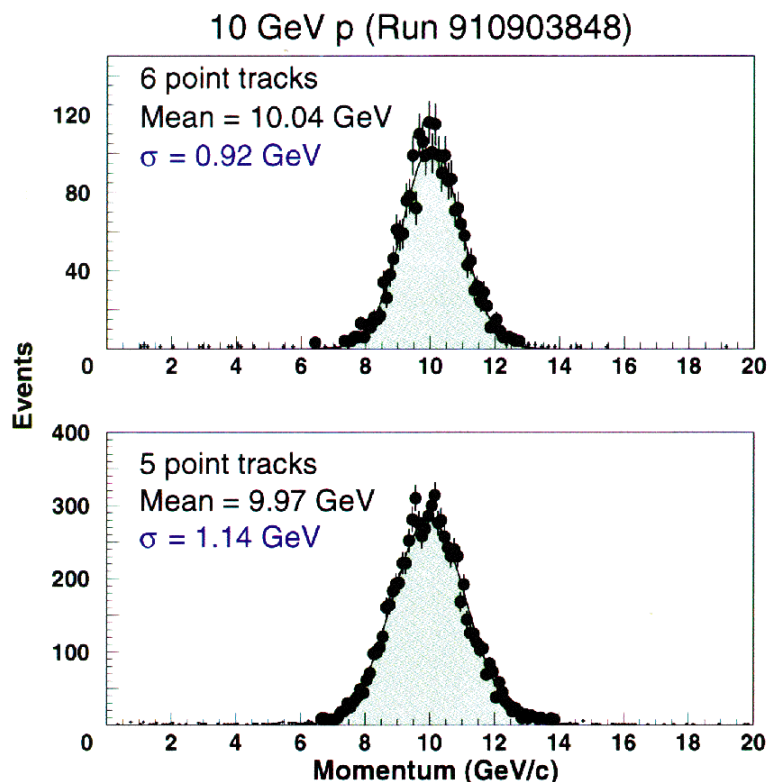


Abbildung 6.5: Teststrahl Spektrum am CERN in Genf/CH

6.3 TAS Messungen am CERN (Genf 12/98)

Im Dezember 1998 befand sich der AMS-01 Detektor wieder in Genf am CERN, um dort im Teststrahl mit 10 GeV Protonen kalibriert zu werden. Dabei war es möglich, auch Laser Daten zu nehmen. Abbildung 6.5 zeigt das mit AMS-01 gemessene Impuls Spektrum beim Teststrahl am CERN in Genf.

Bei diesen Messungen befand sich der Detektor in einem Gestell, in dem er um 360° um die x -Achse gedreht werden konnte. Die TAS-Messungen wurden kontinuierlich durchgeführt mit einer Triggerrate von ca. 100 Hz. Währenddessen wurde der Detektor um 180° um seine x -Achse gedreht, die gleichzeitig die Längsachse des Beamportholders ist. Die komplette Drehung um 180° dauerte ca. 2,5 Minuten. Die nach dem in Kapitel 4.2.4 beschriebenen Gaussfit Verfahren ermittelten Positionen der 15.000 Laser Ereignisse, die während dieser Drehzeit aufgenommen wurden ist in Abbildung 6.6 für den U1 Strahl auf Ebene 5 in x und y dargestellt.

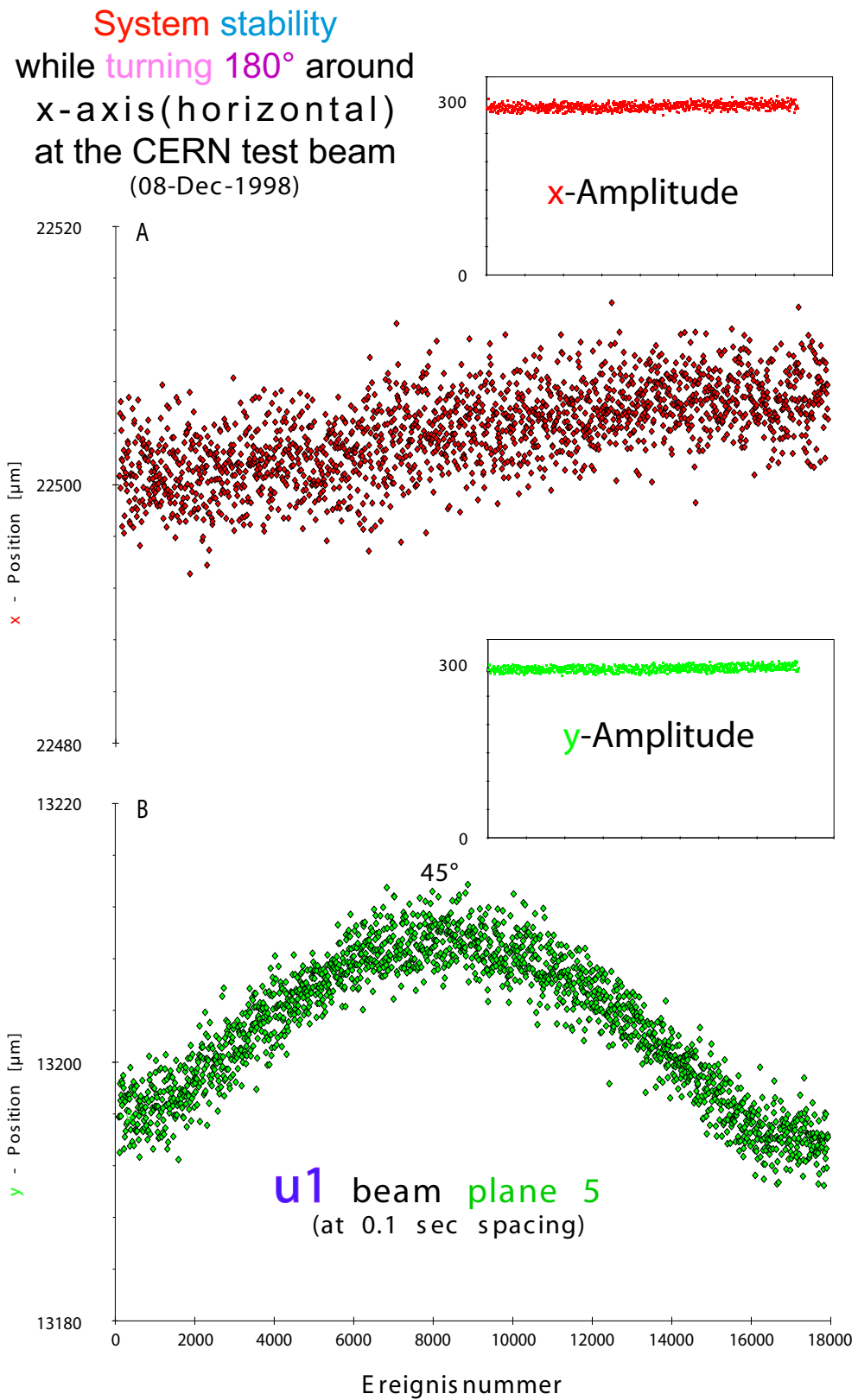


Abbildung 6.6: Auslenkung der TAS Laserstrahlen bei Drehung des AMS-01 Detektors um 180° um die x -Achse

Wie man sieht, beträgt die Streuung der Einzelnen Ereignisse auf der S-Seite (y -Koordinate) wieder weniger als $2 \mu\text{m}$ und auf der K-Seite (x -Koordinate) weniger als $4 \mu\text{m}$. Außerdem erkennt man, dass diese mechanische Beanspruchung des kompletten Detektors von 1 g bis auf -1 g in der y -Richtung gerade mal eine maximale Verschiebung von höchstens $20 \mu\text{m}$ in Ebene 5 ausmacht und in der x -Richtung nicht einmal $10 \mu\text{m}$.

Weiterhin sieht man, dass die durch die Drehung erzeugte mechanische Beanspruchung des Detektors keinerlei Einfluss auf die Amplitude des Laser Systems hat. Diese bleibt nämlich während der ganzen Zeit über konstant. Die anderen Ebenen zeigen ein ähnliches Verhalten.

Diese Messung zeigt sehr deutlich, dass die starken Bewegungen, die mit dem TAS während des STS-91 Weltraumflugs sowohl in den Positionen (bis zu $30 \mu\text{m}$) als auch in den Amplituden (bis zu 100%) gemessen wurden, nicht durch rein mechanische Krafteinwirkungen verursacht worden sein können (vgl. Abbildung 5.5).

6.4 Zusammenfassung der TAS Messungen nach dem STS-91 Weltraumflug

Betrachtet man die TAS Messungen nach dem STS-91 Weltraumflug von AMS-01, so muss man zu dem Schluss kommen, dass das **Tracker Alignment System** bei allen Messungen auf der Erde genau die Ergebnisse liefert, die man von ihm erwartet. Insbesondere die Messungen am KSC (vgl. Kapitel 6.1) und am CERN (vgl. Kapitel 6.3) bestätigen, dass das **Tracker Alignment System**

1. Strahlen liefert, die geradlinig durch die einzelnen Lagen des Silizium Trackers hindurchgehen
2. im normalen Betrieb stabile Signale liefert
3. mechanische Belastungen mit einer Genauigkeit von $\leq 3 \mu\text{m}$ reproduziert
4. selbst bei starken mechanischen Belastungen der Tracker Supportstruktur durch Gewichte oder Drehung des kompletten Detektors im Gravitationsfeld der Erde, geringere Verschiebungen liefert als während des STS-91 Weltraumflugs

Diese Ergebnisse sprechen gegen die Vermutung, dass die starken Bewegungen (bis zu $30 \mu\text{m}$), die mit dem TAS während des STS-91 Weltraumflugs gemessen wurden (vgl. Abbildung 5.5) auf eine Fehlfunktion des TAS (z. B. ein Kippen der Laserstrahlen) zurückzuführen sind, da ein solches Verhalten auf der Erde, selbst mit starken mechanischen Belastungen des Trackers nicht reproduziert werden konnte. Vielmehr zeigen diese Ergebnisse, dass die STS-91 Messungen des TAS ernst zu nehmende Verschiebungen der Trackerstruktur anzeigen, deren Ursache noch nicht richtig verstanden ist.

Daher wird im folgenden Kapitel 7 versucht, die TAS Messungen des STS-91 Weltraumflugs durch das sogenannte Cosmic Alignment zu überprüfen und ggf. zu ergänzen, um so die während des STS-91 Weltraumflugs aufgetretenen Diskrepanzen in den TAS Messungen besser verstehen zu können.

Kapitel 7

Positionsmessungen mit STS-91 Teilchendaten (CERN 11/99)

Aus den Laserdaten, die während des 9 tägigen STS-91 Shuttle Flugs gemessen wurden, geht hervor, dass die x -Koordinate (K-Seite) des AMS-01 Silizium Spurdetektors über die gesamte Flugdauer relativ ruhig war (siehe Abbildung 5.4 und 5.6). Dem gegenüber zeigt die y -Koordinate (S-Seite) vor allem auf den Ebenen 4 und 5 in der mittleren Phase des Flugs (2. - 6. Tag) deutliche Bewegungen mit Amplituden von bis zu $40 \mu\text{m}$.

Betrachtet man ausschließlich die Laserdaten der Ebenen 4, 5 und 6 so könnte man vermuten, dass der Signalverlauf durch ein Kippen des Laserstrahls in y -Richtung verursacht wird, da die Amplituden der Bewegungen in y -Richtung umso größer werden, je weiter man sich von der Laserquelle entfernt. Bei genauerer Betrachtung [113] stellt man jedoch fest, dass ein Kippen der Laserstrahlen nicht die alleinige Ursache für derartige Messwerte sein kann. Vielmehr muss zusätzlich noch eine Bewegung der Trackerstruktur vorhanden sein, um derartige Messwerte zu erhalten.

Über die noch weiter vom Laser entfernten Ebenen 1, 2 und 3 liegen aufgrund der starken Abschwächung des Lasersignals um einen Faktor 0,2 - 0,4 pro Durchgang durch das Silizium keine detaillierten Laserdaten vor. Dies verhindert eine Aufspaltung der TAS Messungen in eine Kippbewegung des Lasersystems und in eine zusätzlich Bewegung des Silizium Spurdetektors unter den bei AMS-01 gegebenen Bedingungen. [113] Für AMS-02 ist aus diesem Grund eine doppelte Laser Anordnung mit Strahlen von beiden Enden des Aufbaus vorgesehen (vgl. Kapitel 3.2)

Um die während des STS-91 Weltraumflugs gemessenen Laserdaten zu verifizieren, wird das Verfahren des sogenannten „Cosmic Alignment“ eingeführt. Bei dieser Methode werden „gerade“ Spuren kosmischer Teilchen zur Positionsbestimmung herangezogen. Die Beschreibung dieses Verfahrens sowie seine Ergebnisse sind Gegenstand dieses Kapitels.

7.1 Impulsbestimmung

Der Impuls \vec{p} eines Teilchens wird bei Teilchendetektoren u. a. über die Krümmung der Teilchen-Trajektorie in einem (meist homogenen) Magnetfeld \vec{B} gemessen. Beim Durchgang eines geladenen Teilchens der Ladung q und der Geschwindigkeit \vec{v} durch ein Magnetfeld \vec{B} wirkt auf das Teilchen die Lorentzkraft \vec{F}_L

$$\vec{F}_L = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (7.1)$$

\vec{F}_L Lorentzkraft
 q Ladung
 \vec{v} Geschwindigkeit
 \vec{B} magnetische Feldstärke

Für Teilchen die sich mit Geschwindigkeiten \vec{v} bewegen, die nahe an der Lichtgeschwindigkeit c liegen, müssen die relativistischen Effekte berücksichtigt werden. Die Lorentzkraft \vec{F}_L ist jedoch invariant unter den relativistischen Transformationen.

Die Lorentzkraft \vec{F}_L steht immer senkrecht zu der von \vec{v} und \vec{B} aufgespannten Ebene, insbesondere ist ihre Wirkung immer senkrecht zur Geschwindigkeit \vec{v} des Teilchens. D. h. die Lorentzkraft \vec{F}_L wirkt als Radialkraft und krümmt somit die Bahn des Teilchens.

In einem homogenen Magnetfeld bleibt der Betrag der Lorentzkraft konstant, so dass die Lorentzkraft hier als Zentripetalkraft \vec{F}_Z wirkt und das Teilchen auf einer Kreisbahn hält. (Abbildung 7.1)

Die Zentripetalkraft F_Z , die notwendig ist, um ein Teilchen der Masse m und der Geschwindigkeit v auf einer Kreisbahn mit dem Radius r zu halten ist gegeben durch die Gleichung 7.2.

$$F_Z = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad (7.2)$$

F_Z Zentripetalkraft
 m Masse
 v Geschwindigkeit der Masse m
 r Radius der Kreisbahn der Masse m

Bei der Kreisbewegung sind \vec{F}_L und \vec{F}_Z antiparallel, d. h. dass für die weiteren Betrachtungen die Beträge F_L und F_Z ausreichen. Im Kräftegleichgewicht $F_L = F_Z$ ergibt sich dann der folgende Zusammenhang zwischen dem Impuls $p = m \cdot v$ und dem Radius r der Kreisbahn eines Teilchens der Ladung q im Magnetfeld B :

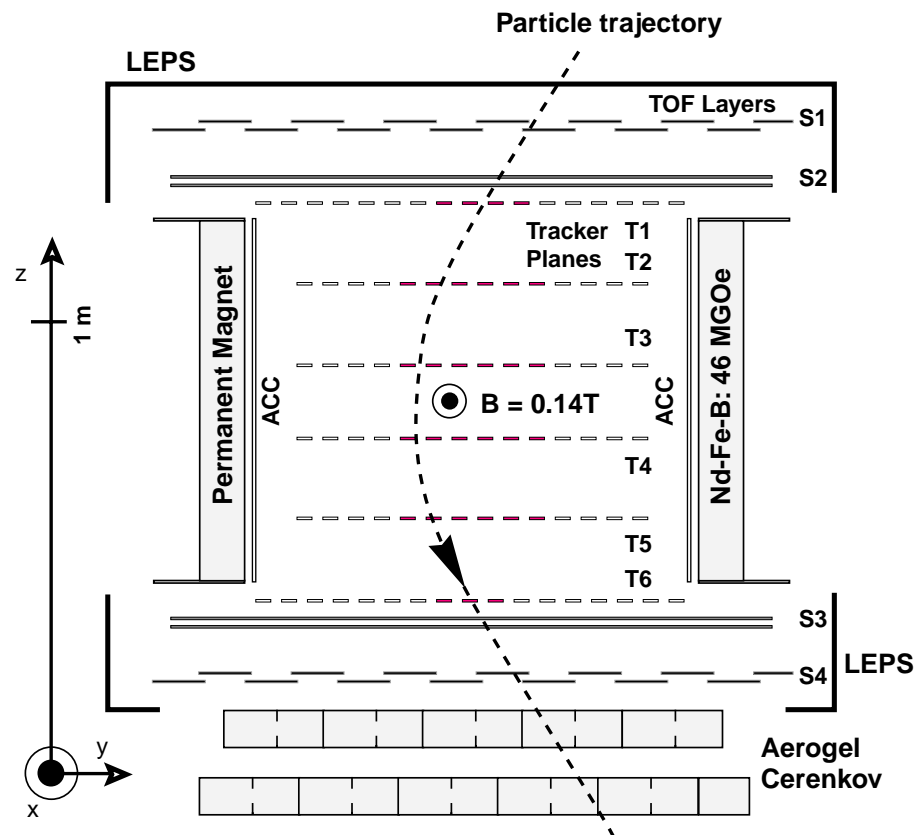
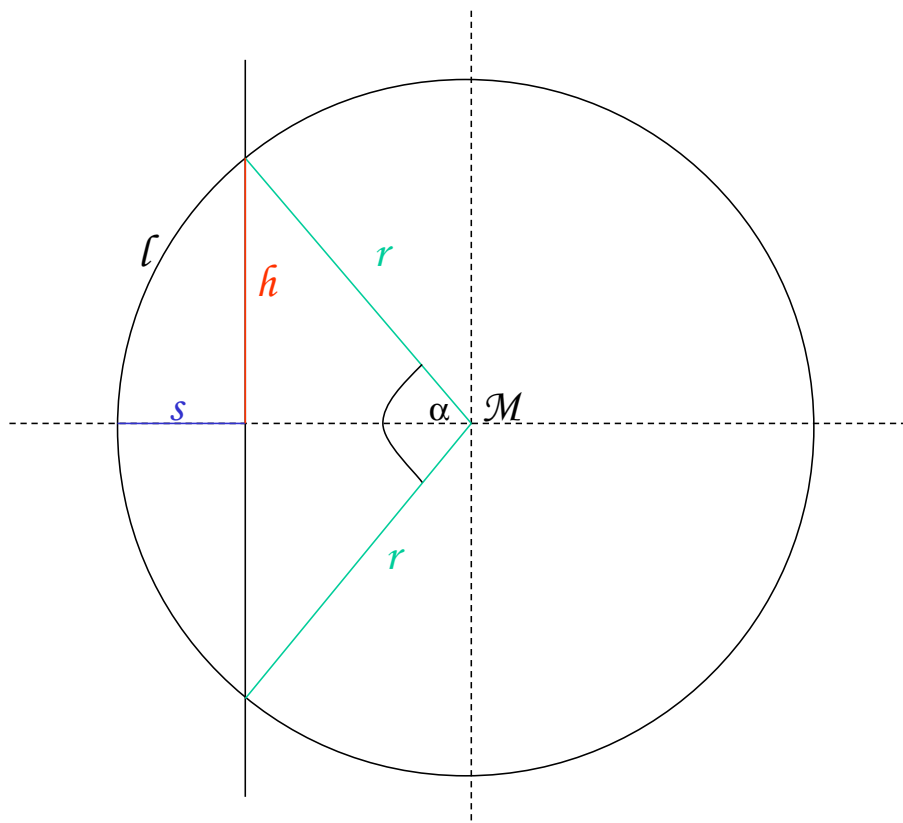


Abbildung 7.1: Durchgang eines geladenen Teilchens durch das homogene Magnetfeld im Silizium Spurdetektor von AMS-01

$$p = q \cdot B \cdot r \quad (7.3)$$

- p Impuls des Teilchens
- q Ladung des Teilchens
- B magnetische Feldstärke
- r Radius der Kreisbahn des Teilchens

Für typische Teilchenimpulse von $p \approx 5 \text{ GeV}$ ergeben sich für Teilchen mit einer Elementarladungseinheit $q = e = 0,2998 \frac{\text{GeV}}{c \cdot \text{Tm}}$ im AMS-01 Magnetfeld $B \approx 1,5 \text{ kG}$ Kreisbahnradien von $r \approx 120 \text{ m}$. Der AMS-01 Magnet hat aber nur eine Ausdehnung von ca. 2 m^3 . Innerhalb des Detektors ist also nur ein kleiner Abschnitt des Kreises zu sehen. Zur Bestimmung von r wird daher die sogenannte Sagitta gemessen, die dem maximalen Abstands der Kreisbahn zur Sehne durch die beiden Endpunkte des Kreisabschnitts entspricht (siehe Abbildung 7.2).

Abbildung 7.2: Die Sagitta s eines Kreisbahnabschnitts

Der Zusammenhang zwischen Sagitta s und Radius r lässt sich aus der Geometrie herleiten. Für kleine Ablenkwinkel α gilt:

$$s = \frac{l^2}{8 \cdot r} \quad (7.4)$$

- s Sagitta der Kreisbahn
- l Länge des Kreisabschnitts
- r Radius der Kreisbahn

Mit Gleichung 7.3 und Gleichung 7.4 ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen gemessener Sagitta s und Impuls p des Teilchens:

$$s = \frac{B \cdot l^2 \cdot q}{8 \cdot p} \quad (7.5)$$

- s Sagitta der Kreisbahn
- B magnetische Feldstärke
- l Länge des Kreisabschnitts
- q Ladung des Teilchens
- p Impuls des Teilchens

p/[GeV]	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	10	20	50	100	200
s/[mm]	26,2	10,5	5,25	2,62	1,05	0,525	0,262	0,105	0,052	0,026

Tabelle 7.1: Sagittae s für einige typische Teilchenimpulse p bei AMS-01

Für das AMS-01 Magnetfeld $B \cdot l^2 = 0,14 \text{ Tm}^2$ ergibt dies für Teilchen der Ladung $q = e = 0,2998 \frac{\text{GeV}}{c\text{Tm}}$ (z. B. Protonen) und Impuls $p \approx 5 \text{ GeV}$ eine Sagitta von $s \approx 1 \text{ mm}$. In Tabelle 7.1 sind die bei AMS-01 zu erwartenden Sagittae s für einige Teilchenimpulse p notiert.

Da das Magnetfeld im AMS-01 Detektor nicht vollkommen homogen ist, sind die Teilchenspuren auch keine exakten Kreisbahnen. Außerdem werden die Teilchen mit kleineren Impuls zusätzlich durch die Vielfachstreuung an dem Detektormaterial abgelenkt. Diese Abweichungen von der Kreisbahn müssen bei den entsprechenden Spurfit-Verfahren berücksichtigt werden, um möglichst genaue Informationen über den Teilchenimpuls zu erhalten. [107]

Zur Bestimmung des Impulses eines Teilchens wird bei AMS-01 daher kein Kreisfit an die Trefferkoordinaten des entsprechenden Teilchen in den 6 Siliziumebenen gemacht, sondern es wird ein Pfadintegral durch das vorher vermessene 3-dimensionale Vektorfeld des Magneten bestimmt.

Hierzu wird das komplette Volumen des Magnetfelds (ca. 2 m^3) in $x \times y \times z = 41 \times 41 \times 130 = 218.530$ gleich große ($\approx 10 \text{ cm}^3$) Zellen aufgeteilt, in denen sowohl der Betrag, als auch die Richtung des magnetischen Felds durch Messung mit drei orthogonalen Hall-Sonden bekannt ist.

Die 5 Fitparameter:

1. x -Koordinate der Teilchenspur in Ebene 1
2. y -Koordinate der Teilchenspur in Ebene 1
3. Betrag des Teilchenimpuls $|\vec{p}|$
4. p_x x -Komponente des Teilchenimpuls \vec{p} in Ebene 1
5. p_y y -Komponente des Teilchenimpuls \vec{p} in Ebene 1

bestimmen nun eineindeutig eine Teilchenbahn durch das bekannte Vektorfeld \vec{B} des Magneten. Diese 5 Fitparameter werden bei dem verwendeten Fitverfahren so lange iterativ variiert, bis die Quadratsumme χ^2 der Abstände der n Trefferkoordinaten x_n^{hit} und y_n^{hit} zu den entsprechenden Koordinaten der Fitspur x_n^{fit} und y_n^{fit} minimal wird (Gleichung 7.6).

$$\chi^2 = \frac{1}{anz} \cdot \sum_{n=1}^{anz} (x_n^{fit} - x_n^{hit})^2 + (y_n^{fit} - y_n^{hit})^2 \quad (7.6)$$

χ^2	mittlerer quadratischer Abstand der Fitspur zu den n Trefferkoordinaten
anz	Anzahl der getroffenen Ebenen ($5 \leq anz \leq 6$)
n	Nummer des Treffers
x_n^{fit}	x Koordinate der Fitspur beim Treffer n
y_n^{fit}	y Koordinate der Fitspur beim Treffer n
x_n^{hit}	x Koordinate des n -ten Treffers
y_n^{hit}	y Koordinate des n -ten Treffers

Auf diese Weise erhält man eine Bahn, die die Teilchenspur durch das tatsächliche Magnetfeld des Detektors sehr gut beschreibt und kann so den Impuls des Teilchens genauer bestimmen als mit einem normalen Kreisfit. Wäre das Magnetfeld des AMS-01 Detektors tatsächlich vollkommen homogen, so würde diese Methode in den normalen Kreisfit übergehen.

Da die Lorentzkraft immer senkrecht zu der von Magnetfeldrichtung und Bewegungsrichtung des Teilchens aufgespannten Ebene wirkt, erfolgt die Ablenkung der Teilchen im Zentralbereich des Magneten des AMS-01 Detektors fast ausschließlich in der y -Richtung des Detektors. Daher muss die y -Koordinate bei AMS-01 besonders genau vermessen werden, um so eine möglichst gute Impulsauflösung zu erzielen. Aus diesem Grund ist der Abstand der Auslestreifen auf der S-Seite der Silizium Sensoren (zur Messung der y -Koordinate) auch doppelt so hoch wie auf der K-Seite (zur Messung der x -Koordinate).

Teilt man den Impuls eines Teilchens durch seine Ladung, so erhält man die sogenannte „Rigidität“ des Teilchens. Wenn man dabei noch die Vorzeichen der Spurkrümmung und Ladung beachtet, so haben Kerne durchweg eine positive Rigidität, während Antikerne durch eine negative Rigidität auffallen müssen. Abbildung 7.3 zeigt das Eventdisplay eines solchen Antiprotons mit einer Energie von 800 MeV, welches während des STS-91 Weltraumflugs von AMS-01 gemessen wurde. Die in Flugrichtung linksgekrümmte Spur in der y -Koordinate von AMS (senkrecht zum Magnetfeld), die anzeigt, dass es sich hierbei um ein Antiteilchen handeln muss, ist deutlich zu erkennen.

Abbildung 7.4 zeigt das Rigiditätsspektrum für ein sub sample der bei STS-91 von AMS-01 gemessenen Ereignisse für $Z > 1$ und Abbildung 7.5 zeigt die gleiche Verteilung für $Z = 2$, also Helium. Wie man sieht, befindet sich unter den 100 Millionen Ereignissen, die AMS-01 während der STS-91 Mission gesammelt hat, kein einziges Antihelium. [116]

Unter der durchaus plausiblen Annahme, dass Helium und Antihelium das gleiche Rigiditätsspektrum bis 140 GV haben, begrenzen die AMS-01 STS-91 Daten das Verhältnis von Antihelium zu Helium in erdnahen Weltraum auf weniger als $1,1 \times 10^{-6}$. Damit verbessert AMS den Grenzwert bezüglich $\bar{\text{He}}/\text{He}$ gegenüber bisherigen Experimenten um fast das doppelte (siehe Abbildung 7.6).

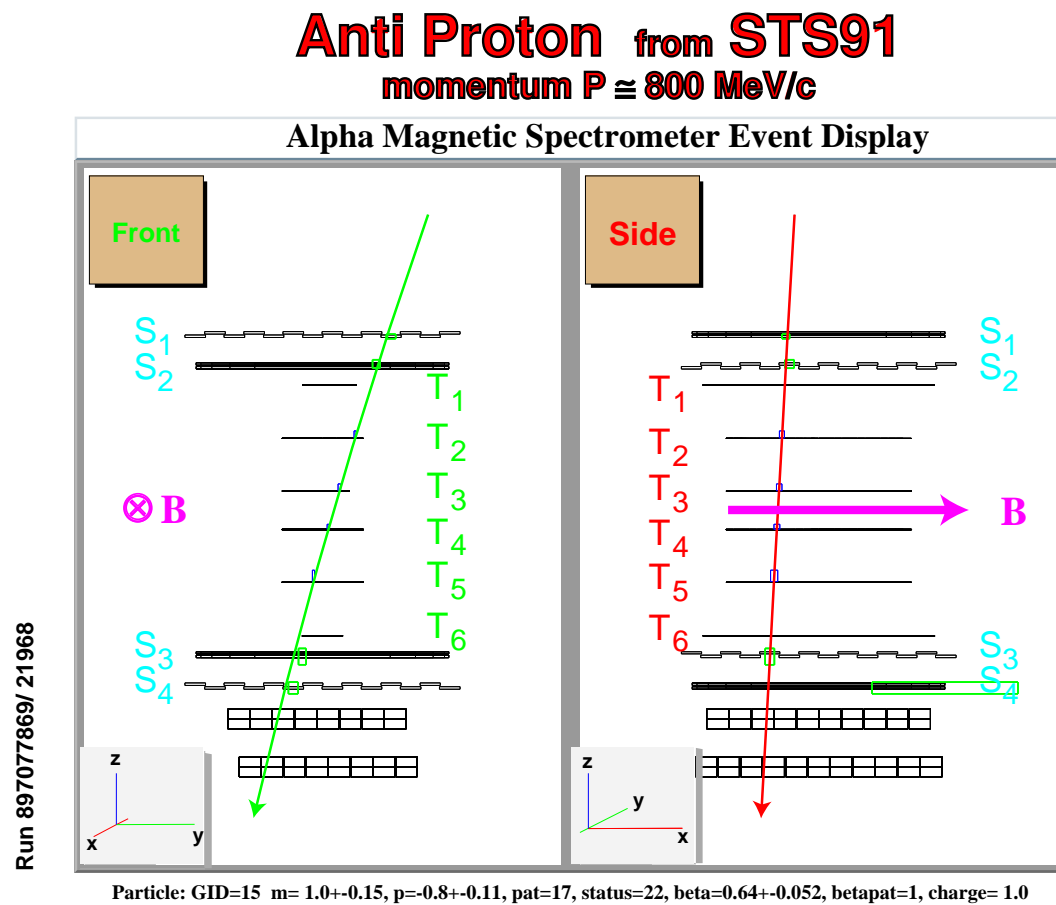


Abbildung 7.3: Das Eventdisplay eines Antiprotons mit 800 MeV

Ist der Impuls oder die Rigidität eines Teilchens bestimmt, kann über die mit dem TOF gemessene Flugzeit des Teilchens seine Masse bestimmt werden. Abbildung 7.7 zeigt die mit AMS-01 während des 10-tägigen Weltraumflugs STS-91 gemessene Massenverteilung. Deutlich zu erkennen sind die Spitzen bei den Massen von Pionen und Myonen sowie bei den einzelnen Elementen Protonen (Wasserstoff), Helium, Kohlenstoff etc. Die Pionen entstehen durch Wechselwirkung der Protonen mit der Umgebung von AMS (z. B. Space Shuttle, MIR-Station etc.).

7.2 Cosmic Alignment

Zur Positionsmessung mit Hilfe der kosmischen Teilchendaten des STS-91 Weltraumflugs von AMS-01 wird das Verfahren des sogenannten „Cosmic Alignment“ angewendet.

Bei diesem Verfahren werden aus den während der STS-91 Mission ca. 100 Millionen gemessenen Ereignissen alle diejenigen Ereignisse selektiert, die den

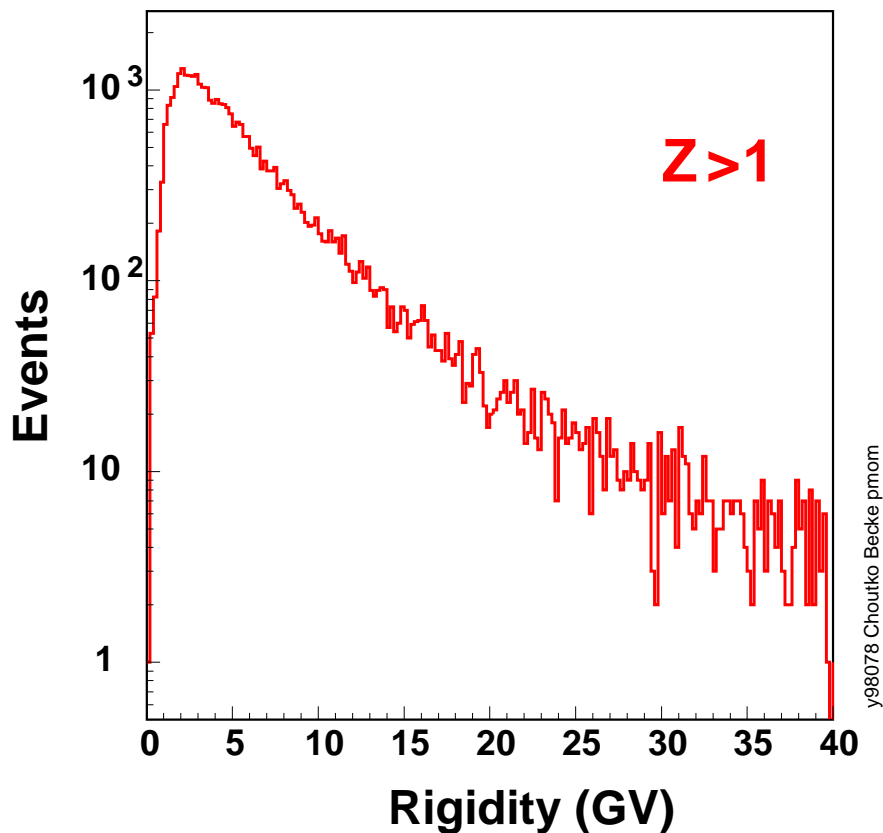


Abbildung 7.4: Die Rigiditätsverteilung der bei STS-91 gesammelten Ereignisse für $Z > 1$ (sub sample)

folgenden 5 Bedingungen genügen:

- Das Ereignis darf nur eine rekonstruierte Spur im Silizium Spur Detektor mit genau einer Ladungseinheit (1 Elementarladung, z. B. Proton) haben
- Das Ereignis muss auf mindestens 5 Ebenen des Silizium Spur Detektors je einen Treffer haben, damit genügend Daten für den Fit zur Verfügung stehen, um eine möglichst gute Ortsauflösung zu erhalten.
- Das Ereignis muss je einen Treffer auf den Alignment Leitern in Ebene 4 und Ebene 5 haben, da die Position dieser Leitern mit Lasersystem gemessen wurde und das Ergebnis der kosmischen Positionsmessung hiermit verglichen werden soll
- Das Ereignis darf keinen Treffer in den Antizählern haben, da solche Ereignisse zu falschen Impulsbestimmungen führen können.
- Das Ereignis muss einen Impuls $|\vec{p}| \geq 4$ GeV haben, um möglichst „gerade“ (Laserstrahl ähnliche) Spuren für die Positionsmessung zur

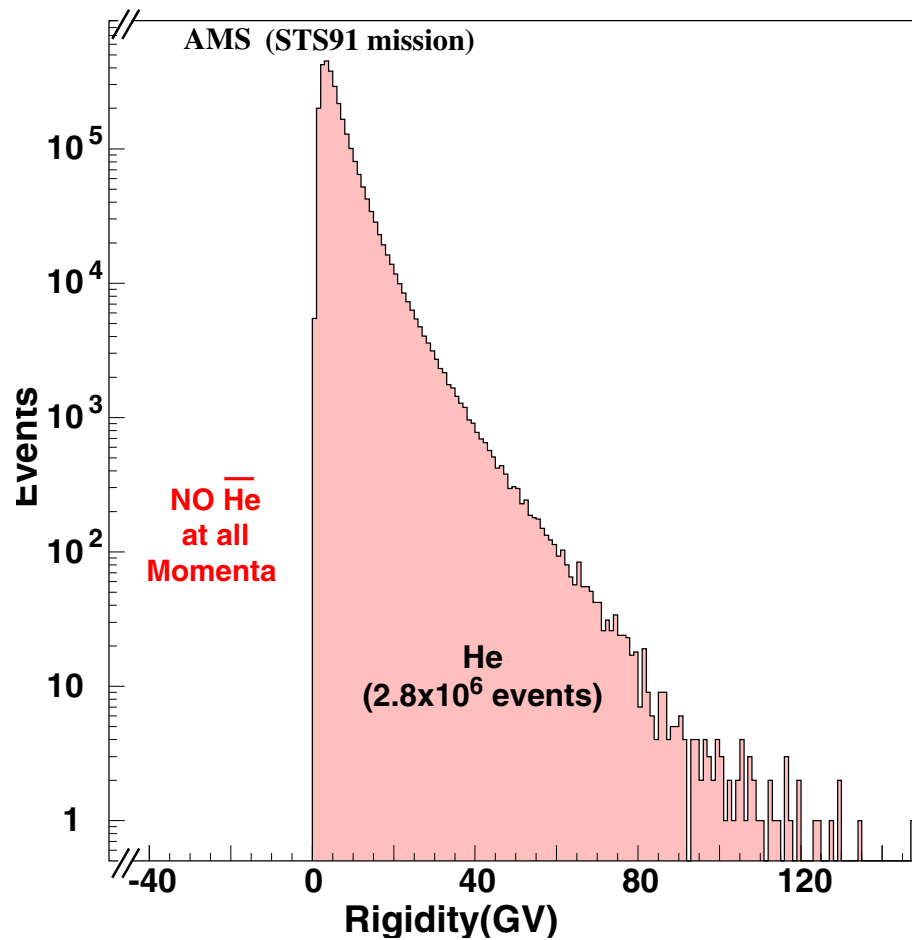


Abbildung 7.5: Die Rigiditätsverteilung der bei STS-91 gesammelten Ereignisse für $Z = 2$ (AMS-01 volles Datensample mit Spur-Qualitäts-Schnitten)

Verfügung zu haben. Bei genau einer zugelassenen Elementarladung entspricht dies auch einem Rigiditätsschnitt von $|R| \geq 4$ GV.

Mit diesen Schnitten bleiben von den ca. 100 Millionen Ereignissen noch ca. 90.000 „gute“ Ereignisse für das Cosmic Alignment übrig, die sich relativ homogen auf den 9-tägigen Weltraumflug verteilen (siehe Abbildung 7.8). Dies entspricht also einer Rate von ca. 9.000 „Cosmic Alignment Ereignissen“ pro Tag oder ca. 375 Cosmic Alignment Ereignisse pro Stunde bzw. ungefähr 1 Cosmic Alignment Ereignis alle 10 Sekunden.

An den leicht unterschiedlichen Steigungen zu Beginn des Flugs (Abbildung 7.8) erkennt man das Umschalten auf eine höhere Trigger-Rate am Ende des ersten Tages, bedingt durch ein Umschalten auf eine höhere Geschwindigkeit in der elektronischen Datennahme von AMS-01.

Abbildung 7.9 zeigt die Rigiditätsverteilung der 90.000 selektierten Ereignisse. Der $|R| \geq 4$ GV Schnitt ist deutlich zu erkennen. Die Spuren mit negativer Rigidität (links) entsprechen hauptsächlich Elektronen e^- und Pionen π^-

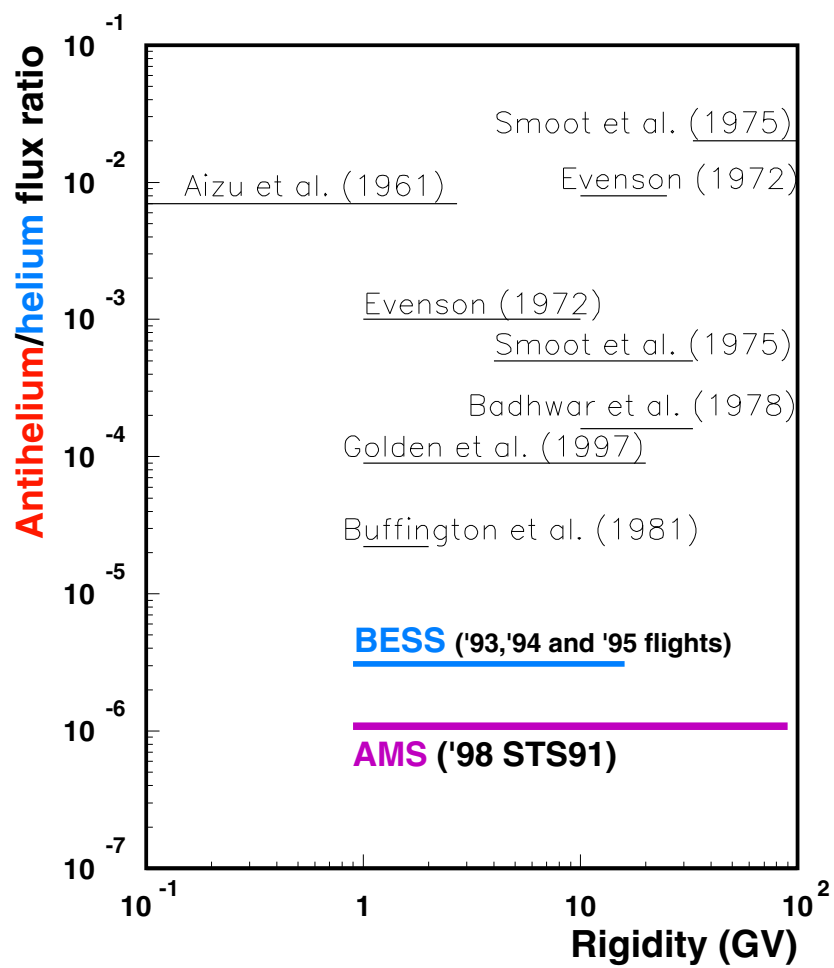


Abbildung 7.6: Die obere Grenze für das Verhältnis $\bar{\text{He}}/\text{He}$ von AMS verglichen mit bisherigen Experimenten

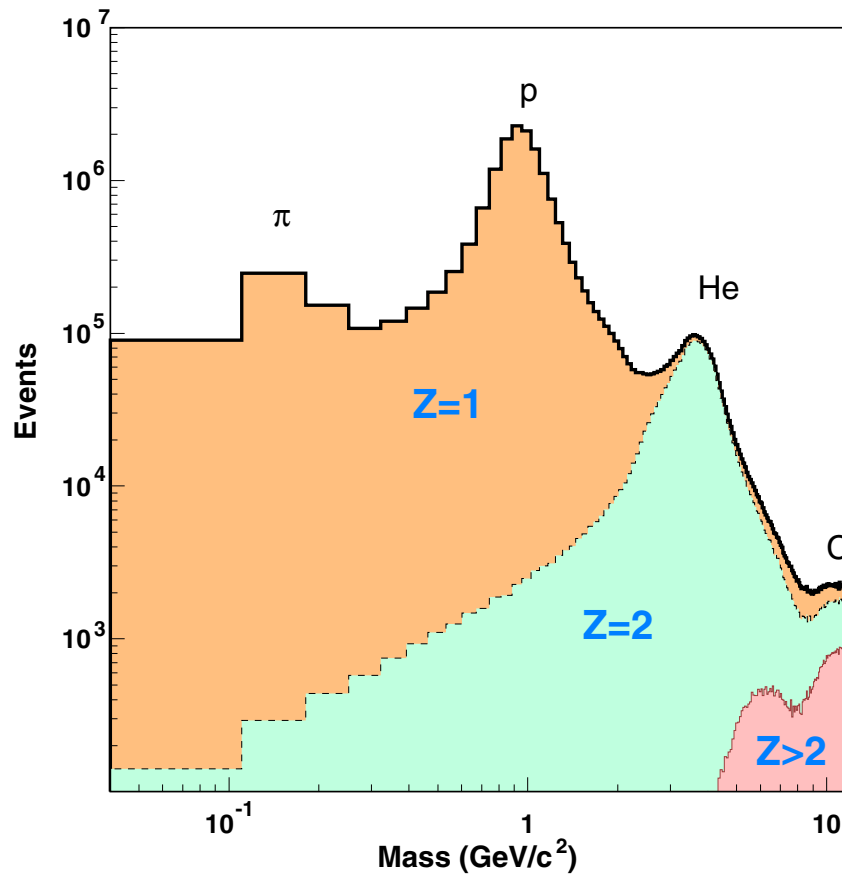


Abbildung 7.7: Die Massenverteilung der bei STS-91 gesammelten Ereignisse [107]

die bei Streuprozessen von kosmischen Teilchen mit der umliegenden Materie (Space Shuttle, MIR etc.) entstehen.

Abbildung 7.10 zeigt die Trefferkoordinaten der ca. 90.000 Cosmic-Alignment-Ereignisse in den 6 Ebenen des AMS-01 Silizium-Spurdetektors. Deutlich zu erkennen ist die Beschränkung auf Ereignisse mit Treffern auf den Alignment Leitern in Ebene 4 und 5. Die streifenförmigen Strukturen, die vor allem in den beiden äußeren Ebenen 1 und 6 zu sehen sind, spiegeln die balkenartige Anordnung der Szintillatoren des TOF Triggers wieder, der für die Positionen, die von den Szintillatoren abgedeckt werden, mehr Ereignisse triggert, als für die Positionen, die nicht von den Szintillatoren abgedeckt werden. In der Ebene 3 erkennt man, dass eine Leiter des Silizium Trackers (oben rechts) defekt ist.

An diese 90.000 selektierten Ereignisse, wird mit Hilfe des in Kapitel 7.1 beschriebenen Pfadintegralfit durch das gemessene Vektorfeld des AMS-01 Magneten eine Fitspur angepasst, so dass die Quadratsumme χ^2 der Abstände der n Trefferkoordinaten x_n^{hit} und y_n^{hit} zu den entsprechenden Koordinaten der Fit-

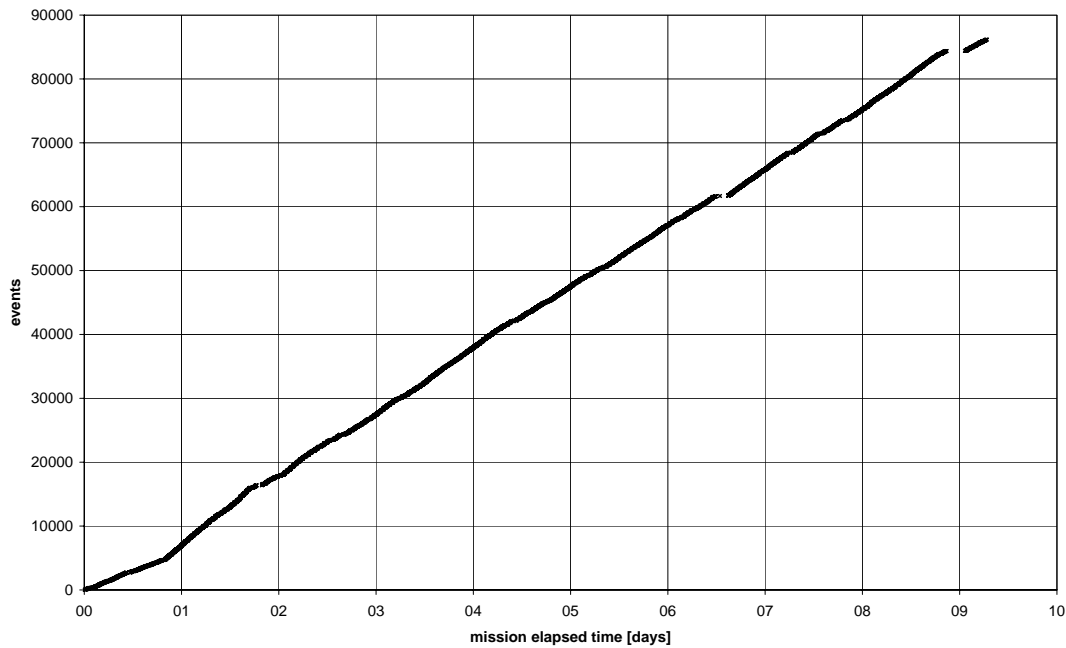


Abbildung 7.8: Zeitverteilung der ca. 90.000 Cosmic-Alignment-Ereignisse über den gesamten Zeitraum der STS-91 Mission

spur x_n^{fit} und y_n^{fit} minimal wird (Gleichung 7.6). Dieser Fit wird sechs mal durchgeführt und bei jedem Durchgang der Treffer von einer der sechs Ebenen nicht mit in den Fit einbezogen. Dann wird der Abstand dx und dy des Durchstoßpunkts der Fitspur zu dem mit dem Silizium Detektor beobachteten, „wahren“ Treffer in der jeweiligen Ebene gebildet (siehe Abbildung 7.11).

Auf diese Art und Weise erhält man eine fast gerade ($p \geq 4$ GeV) Spur, die durch die Treffer in fünf von sechs Ebenen bestimmt wird. Sollte sich also eine der sechs Ebenen gegenüber den anderen fünf Ebenen bewegen, so müsste dies sich in einer zeitlichen Veränderung der entsprechend gemessenen Abstände dx und dy der Fitspur zum wahren Treffer widerspiegeln. Um die statistischen Schwankungen zu reduzieren, werden die gemessenen Abstände dx und dy der Fitspur zum wahren Treffer über 20 zeitlich aufeinander folgende Ereignisse gemittelt.

Man erhält so eine kontinuierliche relative Positions Information dx und dy von jeder der sechs Ebenen, relativ zu den anderen fünf Ebenen, über den gesamten Zeitraum des 10 tägigen Flugs mit einem zeitlichen Raster von ca. 1 Messung alle 3,5 Minuten bzw. ungefähr 27 Messpunkten pro Orbit (ca. 91 Minuten).

In Abbildung 7.12 ist der zeitliche Verlauf dieser Positionsmessungen in dx (K-Seite) für alle sechs Ebenen des Silizium Spurdetektors über den gesamten Zeitraum des 10 tägigen Weltraumflugs von AMS-01 abgebildet. Man erkennt eine statistische Streuung der Werte um die Null Linie mit einer Breite von ca. 5 bis 10 μm , je nach Ebene. Die entsprechenden Verteilungen sind in Abbildung

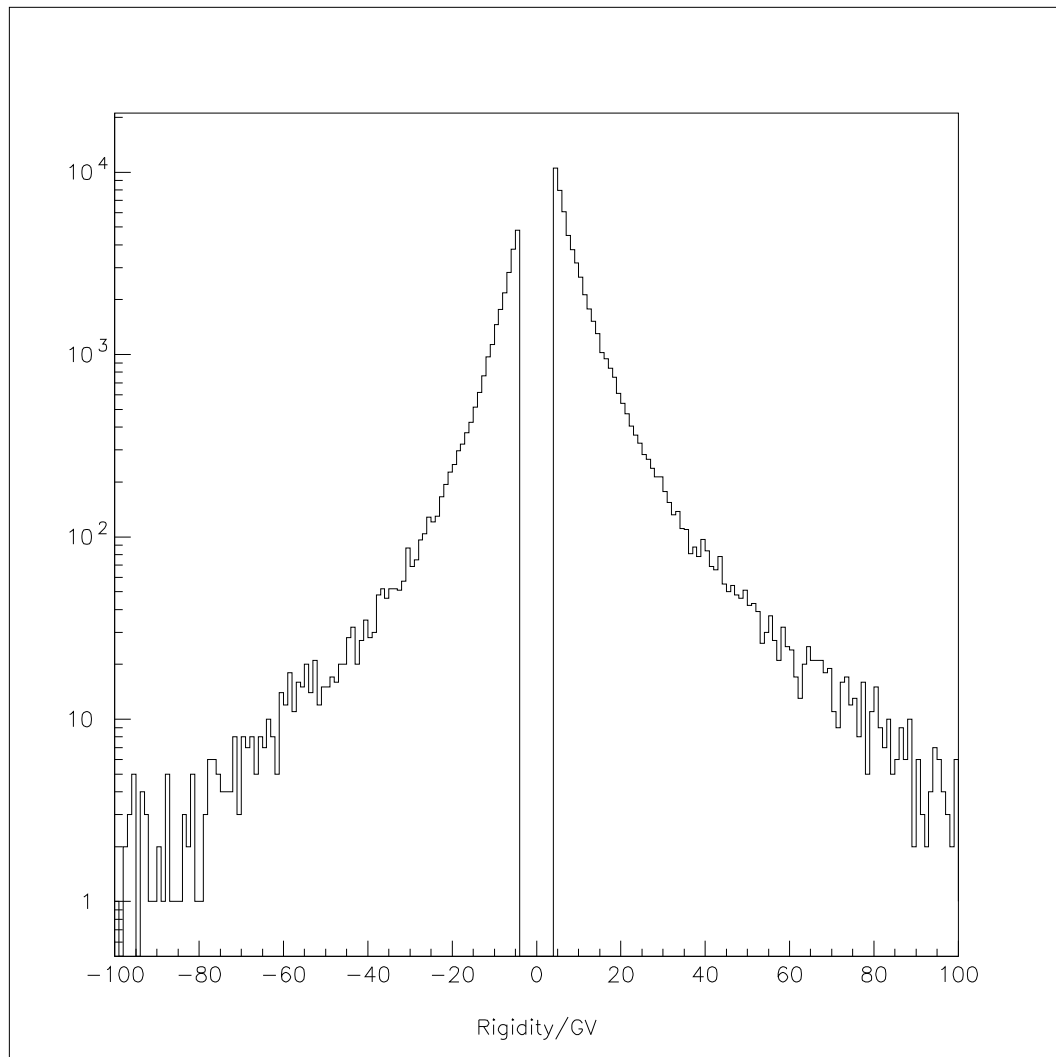


Abbildung 7.9: Ridityverteilung der ca. 90.000 Cosmic-Alignment-Ereignisse

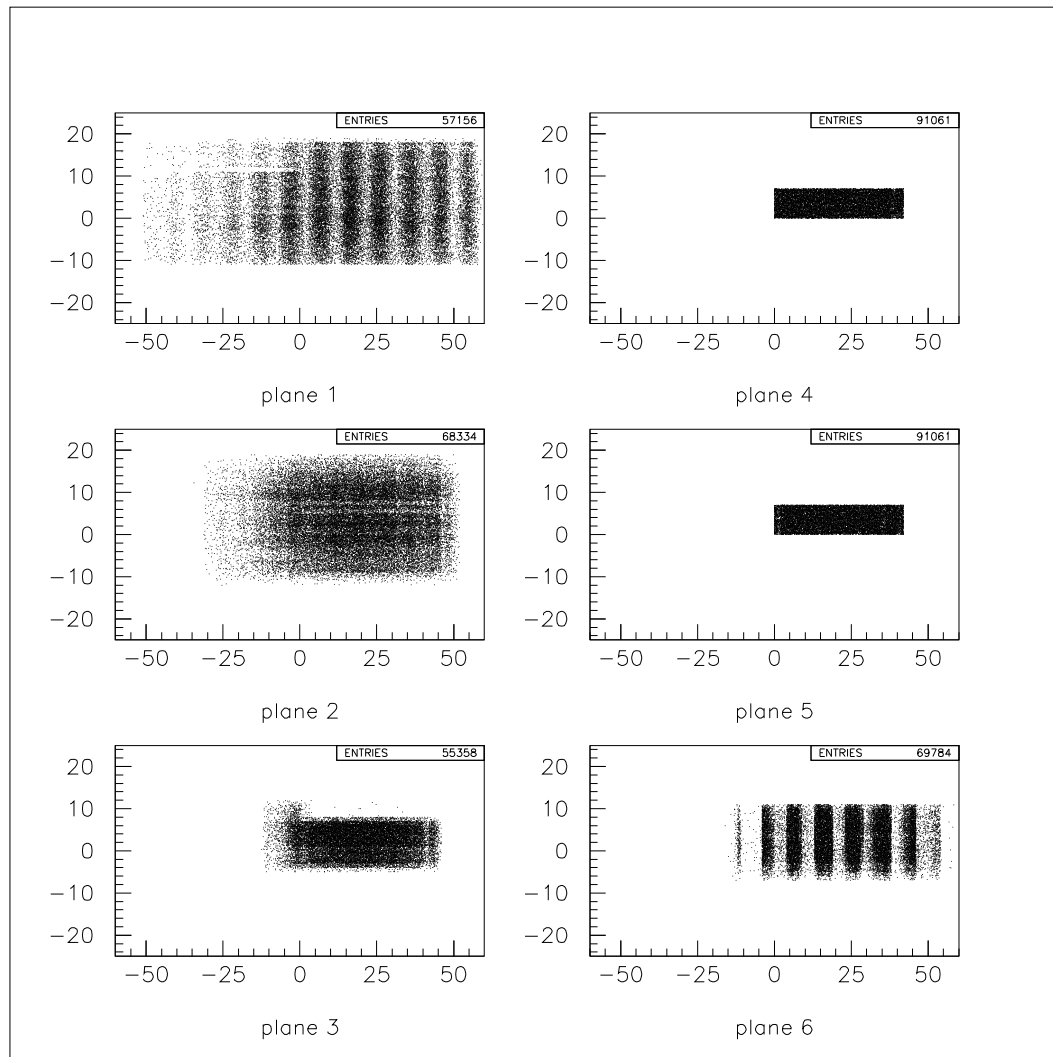


Abbildung 7.10: Trefferkoordinaten der ca. 90.000 Cosmic-Alignment-Ereignisse in den 6 Ebenen des AMS-01 Silizium-Spurdetektors (x - und y -Koordinaten in cm)

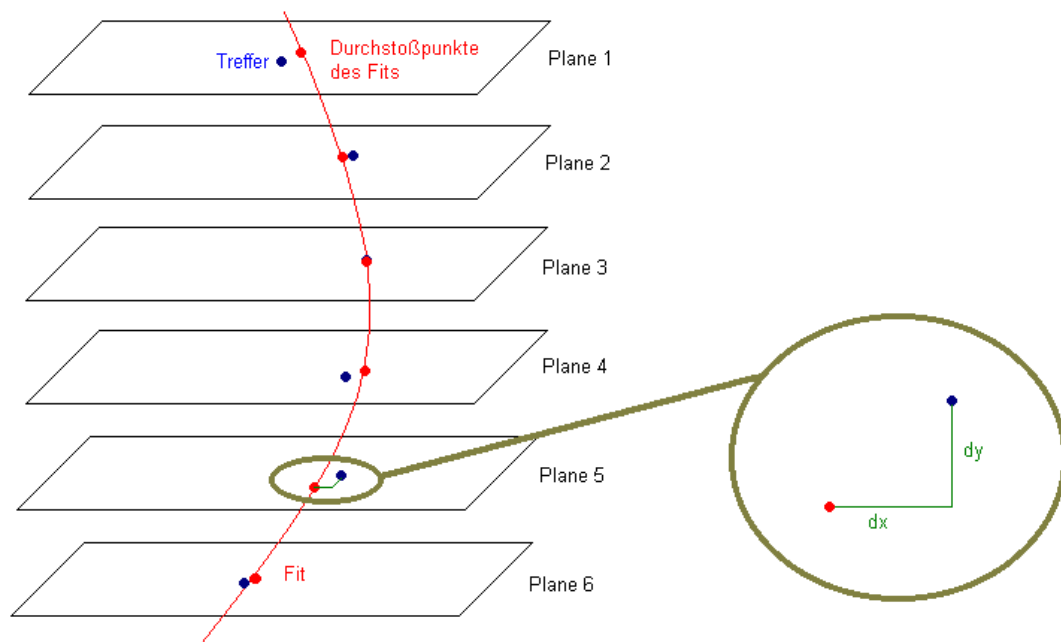


Abbildung 7.11: Bestimmung der Abstände dx und dy der Fitspur vom „wahren“ Treffer in einer der sechs Tracker Ebenen, wobei der Treffer in der jeweiligen Ebene beim Fit nicht mit berücksichtigt wird

7.13 und Tabelle 7.3 aufgetragen.

Es sind keinerlei Strukturen in den Bewegungen zu erkennen. Dies bestätigt den ebenso glatten Verlauf der Laser Alignment Daten des STS-91 Weltraumflugs für die K-Seiten der Ebenen 6, 5 und 4 mit ähnlichen maximalen Bewegungsamplituden um die $10 \mu\text{m}$ (vgl. Abbildung 5.4 und 5.6). Zu Ende des 8. Tages gibt es aus ungeklärten Gründen eine starke Fehlmessung.

In Abbildung 7.14 ist der zeitliche Verlauf der Positionsmessungen in dy (S-Seite) für alle sechs Ebenen des Silizium Spurdetektors über den gesamten Zeitraum des 10 tägigen Weltraumflugs von AMS-01 abgebildet. Auch hier gibt es am Ende des 8. Tages die ungeklärte Fehlmessung, genau, wie in der x Koordinate. Im Gegensatz zu den statistischen Streuungen in den Bewegungen in x -Richtung (vgl. Abbildung 7.12) sind für die y -Richtung allerdings zwei verschiedene systematische Bewegungen beobachtbar, die sich überlagern:

1. eine langsame Bewegung mit einer Zeitkonstanten von mehreren Tagen und Amplituden zwischen 10 und $20 \mu\text{m}$, sowie
2. eine schnelle, oszillierende Bewegung mit einer Zeitkonstanten von ca. 91 Minuten und Amplituden zwischen 20 und $40 \mu\text{m}$.

Um die langsame Bewegung von der oszillierenden Bewegung zu separieren wird eine erneute Glättung vorgenommen, bei der wiederum 20 zeitlich aufeinander folgende Ereignisse statistisch gemittelt werden. Ein Messpunkt

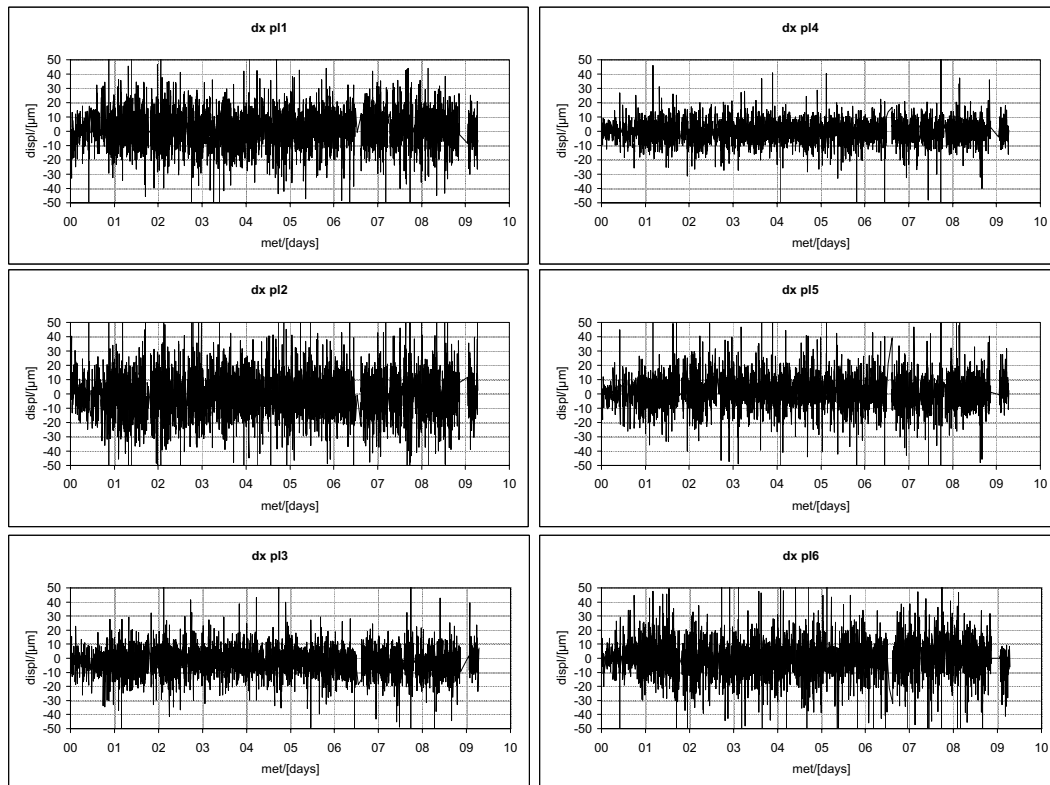


Abbildung 7.12: Der zeitliche Verlauf der Positionsmessungen des Cosmic Alignment für die x -Koordinate der sechs Tracker Ebenen aus den STS-91 Flugdaten

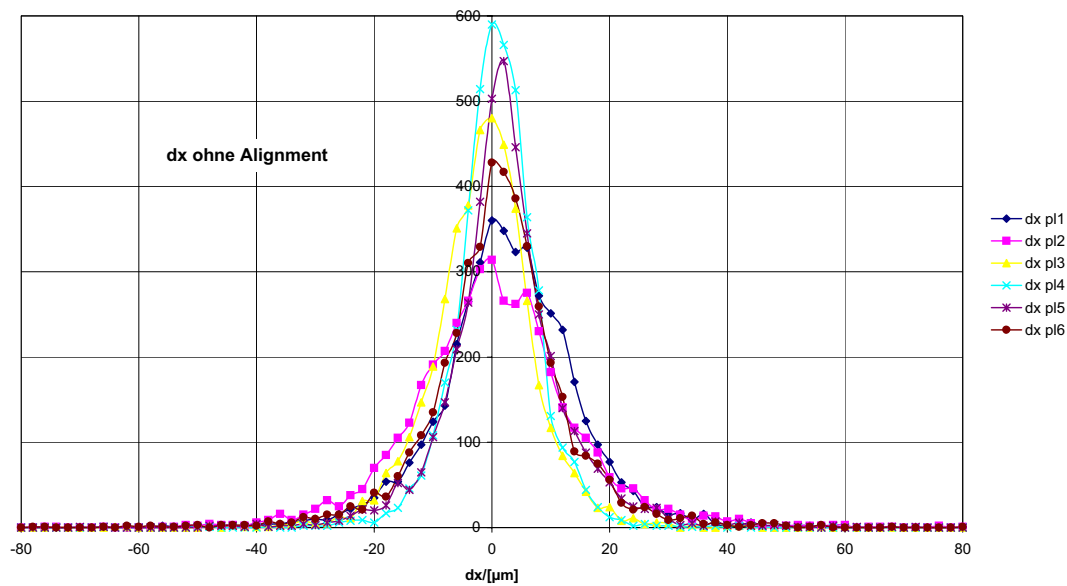


Abbildung 7.13: Die Ortsauflösung der x -Koordinate der 6 Ebenen des Silizium Spurdetektors von AMS-01 (siehe auch Tabelle 7.3)

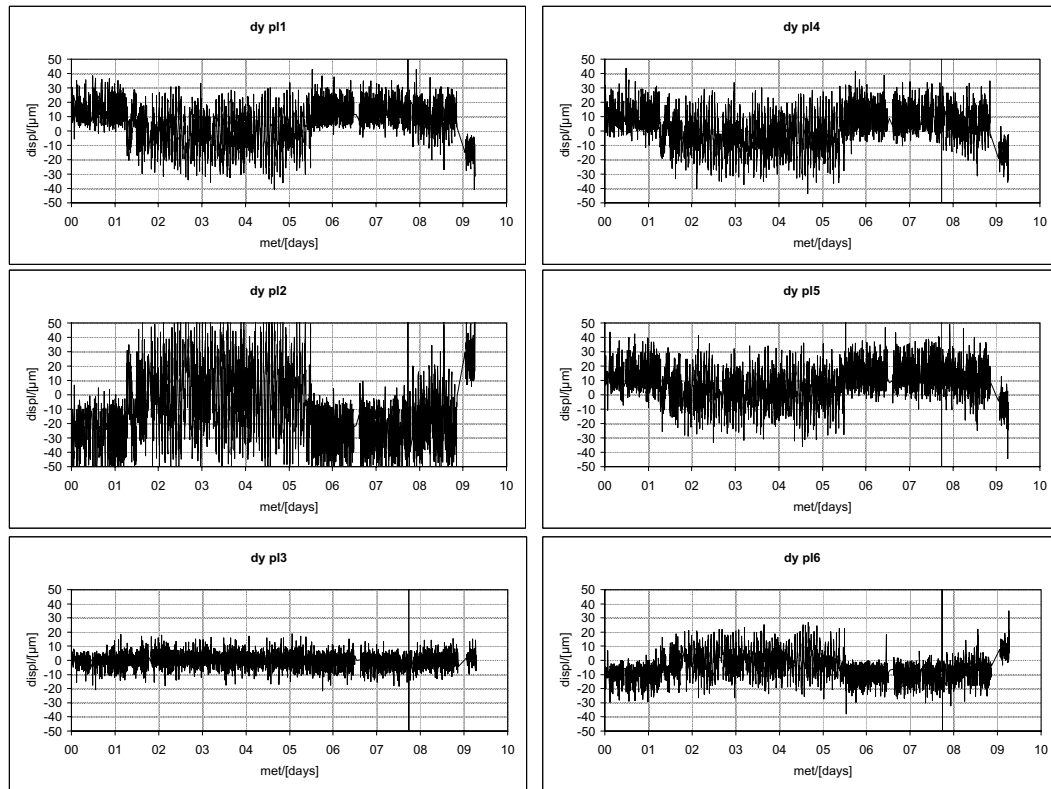


Abbildung 7.14: Der zeitliche Verlauf der Positionsmessungen des Cosmic Alignment für die y -Koordinate der sechs Tracker Ebenen aus den STS-91 Flugdaten

entspricht somit dem Mittelwert aus $20 \cdot 20 = 400$ Ereignissen. Dies entspricht im Mittel einem zeitlichen Abstand von ca. 140 Minuten oder ca. 1,5 Orbits pro Messwert. Das Ergebnis dieser Glättung zeigt Abbildung 7.15 für die x -Richtung und Abbildung 7.16 für die y -Richtung.

Wie man sieht, gibt es für die x -Richtung tatsächlich nahezu keinerlei Struktur in den Positionsdaten. Die Breite σ_g der durch die Glättung (statistisches Mittel 20 zeitlich aufeinander folgender Ereignisse) gewonnenen Verteilung ergibt sich aus der Breite σ der ursprünglichen Verteilung durch die Gleichung 7.7.

$$\sigma_g = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (7.7)$$

σ_g Breite der geglätteten Verteilung
 σ Breite der ursprünglichen Verteilung
 $n = 20$ Anzahl der Ereignisse über die gemittelt wird

Dies bestätigt die Positionsmessungen des TAS während des STS-91 Weltraumflugs, bei denen für die x -Koordinate auch nur maximale Bewegungsam-

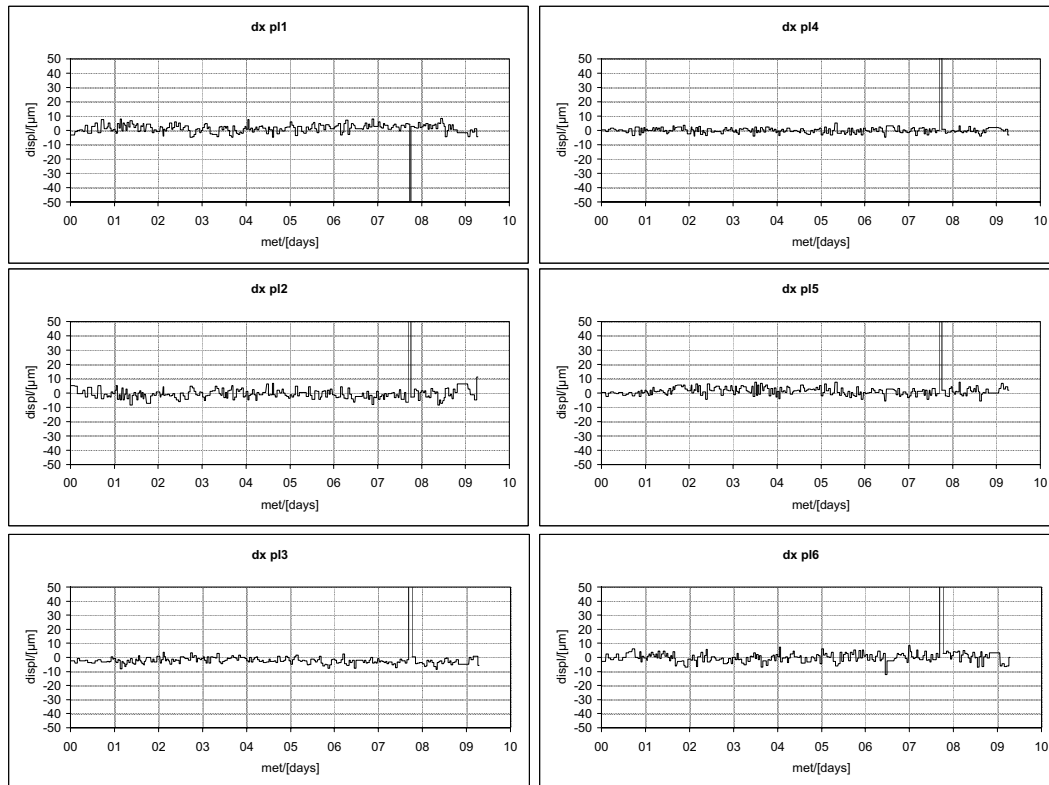


Abbildung 7.15: Der zeitliche Verlauf der langsamen Bewegung des Cosmic Alignment für die x -Koordinate der sechs Tracker Ebenen aus den STS-91 Flugdaten

plituden von ca. $10 \mu\text{m}$ gemessen wurden (vgl. Abbildung 5.4, 5.6 und 7.17). Eine Korrektur der Positionsdaten in der x -Koordinate ist daher nicht notwendig, zumal die x -Koordinate aufgrund der Anordnung des Magnetfelds kaum in die Impulsbestimmung eingeht (vgl. Kapitel 7.1).

Für die y -Richtung ist dagegen eine sehr deutliche Struktur in den Positionsdaten zu erkennen. Zu Beginn des zweiten Tages der STS-91 Mission gibt es einen Sprung in den Positionsmessungen von 10 bis $20 \mu\text{m}$ je nach Ebene, der zur Mitte des sechsten Tages der STS-91 Mission wieder auf seine ursprüngliche Position zurück fällt.

Auch diese Bewegungen bestätigen die mit dem Laser gemessenen Positionsdaten während des STS-91 Weltraumflugs, wobei in den ersten 5 Tagen zu Beginn des Flugs zu wenig Laserdaten vorliegen, um den Zeitpunkt des Sprunges am 2. Tag in den kosmischen Positionsdaten zu reproduzieren (vgl. Abbildung 5.5 und 5.7).

In Abbildung 7.17 sind die gemessenen Verschiebungen des Cosmic Alignment und des Laser Alignment für Ebene 5 in x und y gegenübergestellt. Wie man sieht, zeigen beide Alignmentverfahren einen äußerst ähnlichen zeitlichen Verlauf. Wenn man nun noch berücksichtigt, dass das Cosmic Alignment

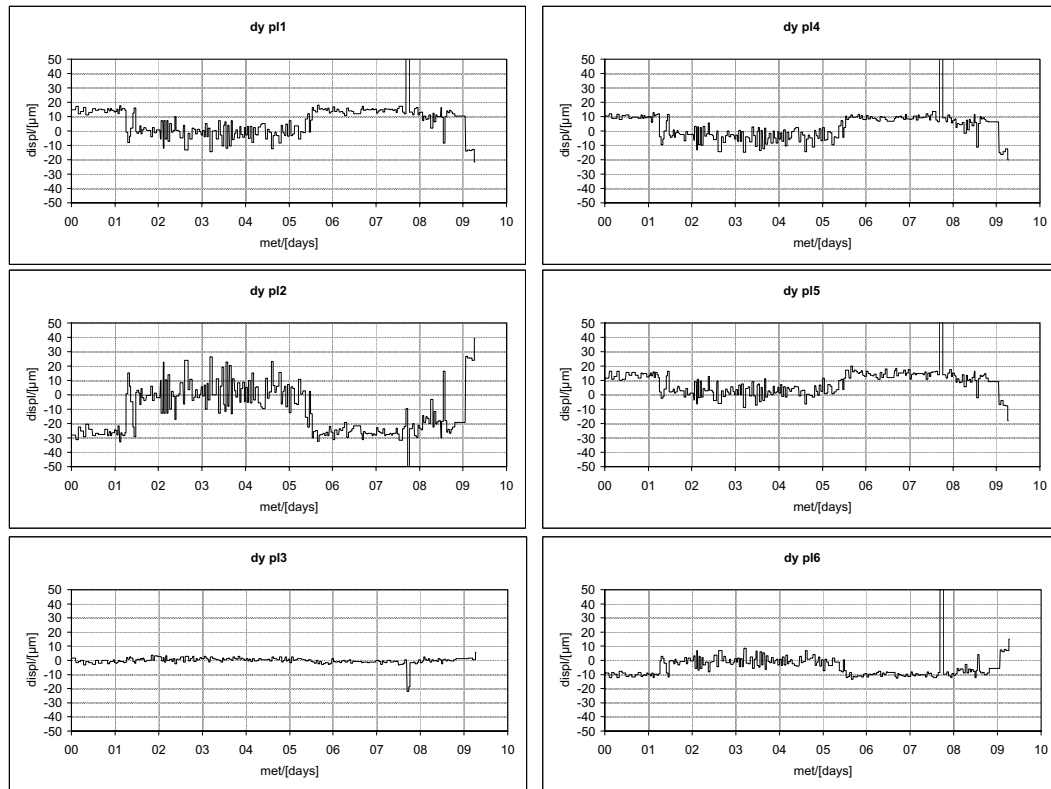


Abbildung 7.16: Der zeitliche Verlauf der langsamen Bewegung des Cosmic Alignment für die y -Koordinate der sechs Tracker Ebenen aus den STS-91 Flugdaten

aufgrund des fehlenden ruhenden Referenz Systems nicht die volle Amplitude einer mechanischen Verschiebung reproduziert, sondern nur ca. 60% bis 70% (vgl. Tabelle 7.2), dann stimmt nicht nur der zeitliche Verlauf, sondern auch die gemessenen Amplituden der beiden verschiedenen Alignmentverfahren mit einer Genauigkeit von $\leq 10 \mu\text{m}$ überein.

Die Ursache dieser langsamen Bewegungen, die sowohl mit dem Lasersystem als auch mit dem sogenannten Cosmic Alignment gemessen wurden, liegen möglicherweise an thermisch bedingten Verformungen der mechanischen Struktur des Detektors, da auch die generelle Temperatur von AMS-01 während des STS-91 Flugs ein ähnliches Verlaufprofil zeigt, wie die Positionsdaten (vgl. Abbildung 5.8).

Lediglich die Ebene 3 scheint aus bisher ungeklärten Gründen von diesem Effekt nichts zu spüren. Da aufgrund der starken Abschwächung des Laserlichts beim Durchgang durch die Silizium Ebenen keine Laserdaten über Ebene 3 vorliegen, lässt sich keine Aussage darüber machen, ob die TAS-Messungen diese außerordentliche Stabilität der Ebene 3 reproduzieren.

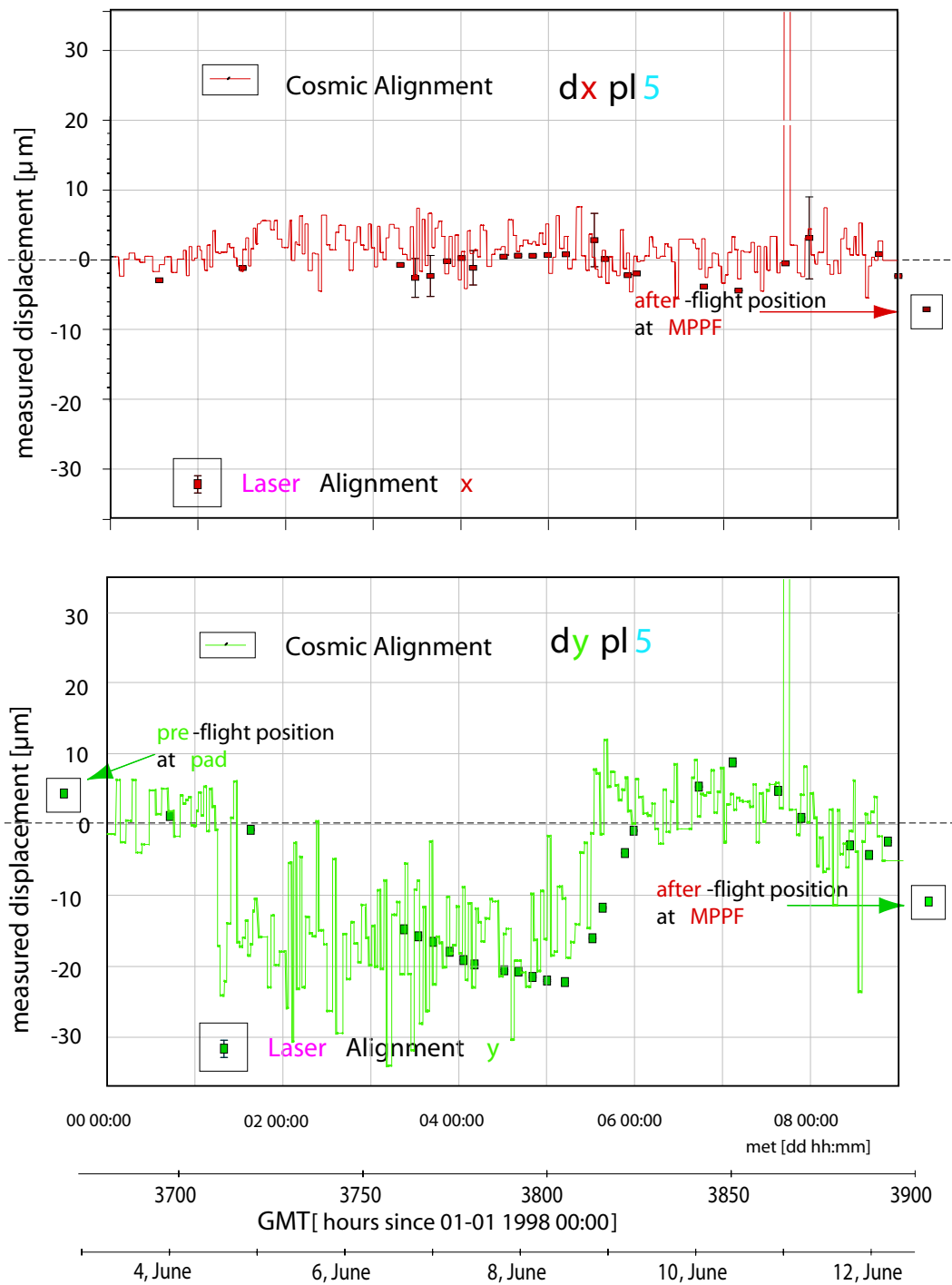


Abbildung 7.17: Die mit Cosmic Alignment und Laser Alignment gemessenen Positionsverläufe für x und y auf Ebene 5 während des STS-91 Weltraumflugs



Abbildung 7.18: Künstliche Verschiebung der Ebene 4 vom dritten bis zum fünften Tag der STS-91 Mission, zur Überprüfung des entsprechenden Signals im Cosmic Alignment (getrennt für x und y)

7.3 Simulation des Cosmic Alignment

Um den Effekt, den eine verschobene Ebene auf das Cosmic Alignment hat, zu überprüfen, wird bei den folgenden Untersuchungen die Ebene 4 während der ruhigen Phase der STS-91 Mission (zweiter bis sechster Tag) bei der Analyse der Daten künstlich in x und y verschoben. Und zwar wird die Ebene 4 den kompletten dritten Tag der STS-91 Mission um $-10 \mu\text{m}$ verschoben, den kompletten vierten Tag um $+20 \mu\text{m}$ und schließlich den kompletten fünften Tag um $-30 \mu\text{m}$ verschoben. Für die restliche Zeit (zweiter und sechster Tag) findet keine Verschiebung der Ebene 4 statt. Die Verschiebung ist in Abbildung 7.18 aufgetragen.

Die entsprechenden „Antworten“ des Cosmic Alignment auf diese künstlichen Verschiebungen der Ebene 4 sind in Abbildung 7.19 für die x -Koordinate und in Abbildung 7.20 für die y -Koordinate aufgetragen. In Tabelle 7.2 sind die mit dem Cosmic Alignment gemessenen mittleren Positionen der Ebene 4 in x und y den jeweiligen künstlichen Verschiebungen gegenübergestellt.

Wie man sieht, wird die künstlich erzeugte Verschiebung der Ebene 4 (Abbildung 7.18) durch das Verfahren des Cosmic Alignment für beide Koordinaten x und y sowohl im gemessenen Positionsverlauf der Ebene 4 selber, als auch in den gemessenen Positionsverläufen der anderen 5 Ebenen reproduziert.

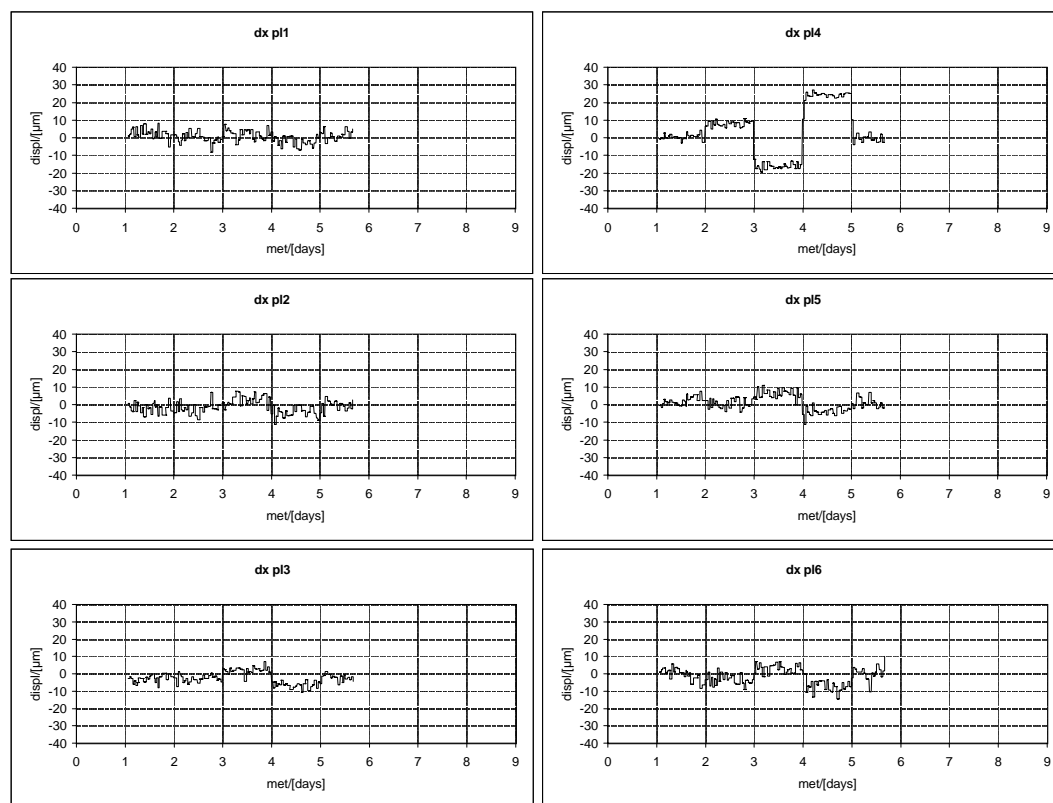


Abbildung 7.19: Der mit dem Cosmic Alignment gemessene Positionsverlauf in den sechs Tracker Ebenen bei einer künstlichen Verschiebung der Ebene 4 in x -Richtung

day	displ. pl. 4	dx pl. 4	dy pl. 4
2	$0 \mu\text{m}$	$0,5 \mu\text{m}$	$1,5 \mu\text{m}$
3	$-10 \mu\text{m}$	$7,9 \mu\text{m}$	$3,1 \mu\text{m}$
4	$20 \mu\text{m}$	$-15,9 \mu\text{m}$	$-17,4 \mu\text{m}$
5	$-30 \mu\text{m}$	$23,6 \mu\text{m}$	$14,9 \mu\text{m}$
6	$0 \mu\text{m}$	$-0,2 \mu\text{m}$	$1,2 \mu\text{m}$

Tabelle 7.2: Die mit der Methode des Cosmic Alignment mittleren gemessenen Positionen der Ebene 4 im Vergleich zu den entsprechenden künstlichen Verschiebungen der Ebene 4

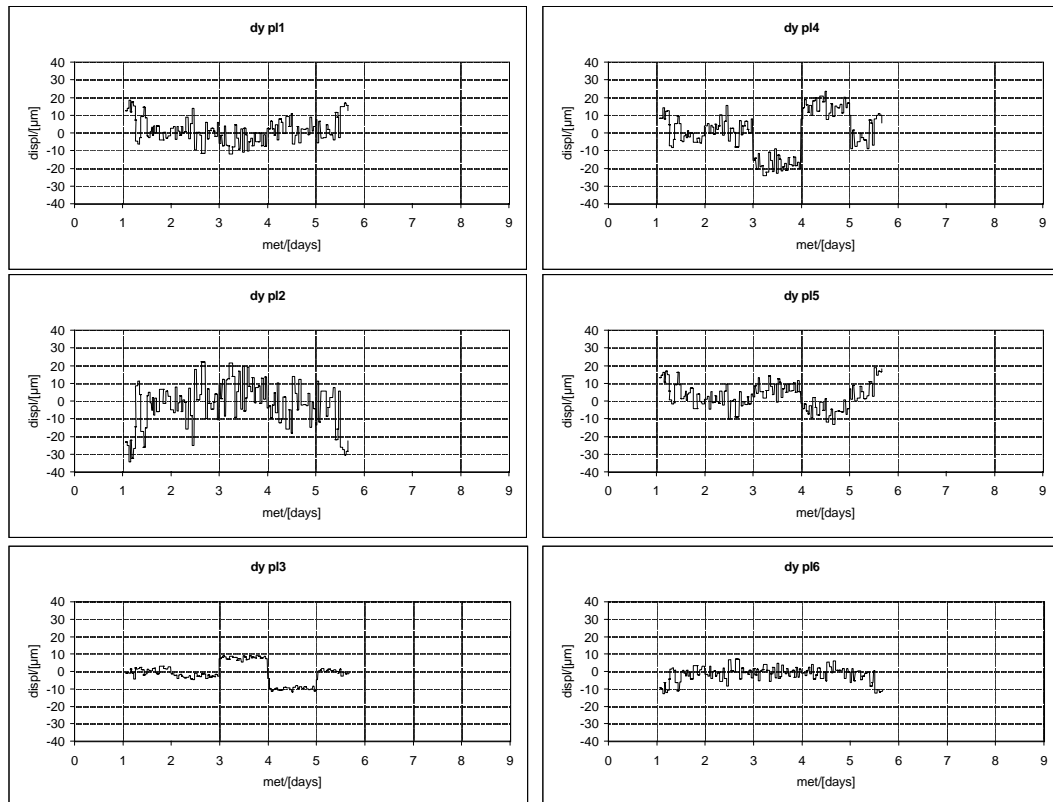


Abbildung 7.20: Der mit dem Cosmic Alignment gemessene Positionsverlauf in den sechs Tracker Ebenen bei einer künstlichen Verschiebung der Ebene 4 in y -Richtung

Die gemessenen Positionen in Ebene 4 verlaufen dabei genau gegenphasig zu dem Verlauf der künstlichen Verschiebung der Ebene 4 während die Positionsverläufe in den übrigen fünf Ebenen die gleiche Phase aufweisen, wie die Verschiebung der Ebene 4. Außerdem nimmt die Amplitude der gemessenen Bewegungen auf den übrigen fünf Ebenen mit zunehmender Entfernung zur Ebene 4 ab.

Dies entspricht genau dem Ergebnis, welches man mit dem Verfahren des Cosmic Alignment erwartet, wie folgende Überlegung zeigt:

Bei der Positionsmessung einer Ebene durch das in diesem Kapitel beschriebene Verfahren des Cosmic Alignment, wird der entsprechende Treffer in dieser Ebene nicht im Fit berücksichtigt. Die Fitspur wird also ausschließlich durch die Treffer auf den anderen fünf Ebenen bestimmt und von der Verschiebung nicht beeinflusst.

Es wird dann der Abstand der Fitspur zum wahren Treffer in dieser Ebene als Positionswert ermittelt. Verschiebt man nun genau diese Ebene in z. B. positive Richtung, dann entfernt sich der wahre Treffer immer weiter in negative Richtung, ohne dabei die Fitspur zu beeinflussen. Der gemessene Abstand zwischen Treffer und Fitspur in der verschobenen Ebene verhält sich also genau

gegenphasig zu der entsprechenden Verschiebung der jeweiligen Ebene. Dies entspricht genau dem Ergebnis des Cosmic Alignment für die Ebene 4.

Bei der Positionsbestimmung in den übrigen fünf Ebenen wird der Treffer in der künstlich verschobenen Ebene nicht aus dem Fit herausgenommen, d. h. die Verschiebung beeinflusst in diesem Fall sehr wohl die Fitspur. Eine Verschiebung einer Ebene z. B. in positiver Richtung entspricht einer Verschiebung des Treffers in dieser Ebene in positiver Richtung. Diese Verschiebung zieht aber auch die komplette Fitspur in die positive Richtung, da der Fit den Abstand zwischen den Treffern und der Fitspur minimiert.

Dadurch wird der Abstand der ermittelten Fitspur zu den Treffern in den übrigen fünf Ebenen ebenfalls positiv. Der gemessene Abstand in den übrigen fünf Ebenen verhält sich also genau gleichphasig zu der künstlichen Verschiebung einer einzelnen Ebene. Es ist offensichtlich, dass dieser Effekt aufgrund der Krümmung der Fitspur um so geringer wird, je weiter man sich von der künstlich verschobenen Ebene entfernt. Auch dies entspricht genau dem Ergebnis des Cosmic Alignment für die übrigen fünf Ebenen.

Diese Messung zeigt also, dass das in diesem Kapitel beschriebene Verfahren des Cosmic Alignment durchaus in der Lage ist Positionsänderungen einzelner Ebenen von $\leq 10 \mu\text{m}$ zu erfassen.

Man kann allerdings nicht davon ausgehen, dass sich in der Realität ausschließlich eine Ebene verschiebt, wie in dieser Simulation. Tatsächlich werden die Ebenen sich in verschiedenster Weise gegeneinander verschieben, und das Ergebnis der Positionsmessungen des Cosmic Alignment ist dann eine Überlagerung der verschiedenen Verschiebungen.

Aufgrund der Ambivalenzen dieses Systems (verschiedene Verschiebungsmuster können sich zu den gleichen Ergebnismustern überlagern) ist es nicht möglich, aus den Ergebnissen des Cosmic Alignment alleine, die exakte Position einer einzelnen Ebene zu ermitteln. Um so bemerkenswerter ist die Tatsache, dass die Ergebnisse des Cosmic Alignment die TAS Messungen bestätigen.

Dieser Umstand zeigt, dass ein Alignmentverfahren alleine für eine genaue Positionskorrektur des AMS Silizium Trackers nicht ausreicht. Für eine umfassende Beschreibung der Bewegungen der Tracker Struktur sind vielmehr beide Verfahren -sowohl das TAS als auch das Cosmic Alignment- notwendig. Erst die Kombination der Resultate beider Alignmentverfahren ermöglicht eine sinnvolle Korrektur der gemessenen Positionsdaten. Eine solche Korrektur und deren Auswirkungen auf die Genauigkeit der Impulsmessung wird im folgenden Unterkapitel 7.4 beschrieben.

Ebene	σ_x nicht korr.	σ_y nicht korr.	σ_y korrigiert	$\delta(\sigma_y)$ Verbesserung
plane 1	9,63 μm	11,8 μm	9,11 μm	2,72 μm
plane 2	11,4 μm	21,7 μm	16,6 μm	5,13 μm
plane 3	7,09 μm	4,54 μm	4,51 μm	0,03 μm
plane 4	5,65 μm	11,5 μm	9,11 μm	2,39 μm
plane 5	6,45 μm	11,1 μm	9,35 μm	1,72 μm
plane 6	8,05 μm	8,19 μm	6,53 μm	1,66 μm
insgesamt	8,05 μm	11,5 μm	9,20 μm	2,27 μm

Tabelle 7.3: Die Breiten σ_x und σ_y der Verteilungen in den sechs Ebenen des Silizium Spur Detektors. Für σ_y mit und ohne Cosmic Alignment Korrektur

7.4 Alignment Korrektur

Sowohl die TAS Messungen, als auch das Cosmic Alignment zeigen für die y -Koordinate wesentlich stärkere Bewegungen, als für x -Koordinate. Für die Impulsbestimmung ist die y -Koordinate des Silizium Spurdetektors aber gerade besonders wichtig, da die y -Koordinate diejenige ist, die senkrecht zum Magnetfeld von AMS-01 liegt. Mit dieser Koordinate wird also gerade die Krümmung der Teilchenspuren im Magnetfeld gemessen, über die der Impuls der Teilchen bestimmt wird (vgl. Kapitel 7.1). Aus diesem Grund ist der Abstand der Auslestreifen auf der S-Seite (y) auch doppelt so hoch, wie der Abstand der Auslestreifen auf der K-Seite (x), um so eine bessere Ortsauflösung für die Positionsbestimmung in y zu erhalten (vgl. Kapitel 3.1.5).

Die starken Schwankungen der Positionsmessungen in der y -Richtung machen sich bei der Impulsauflösung von AMS also besonders negativ bemerkbar. Da die entsprechenden Verschiebungen mit zwei voneinander unabhängigen Systemen (TAS und Cosmic Alignment) gemessen wurden, liegt es nahe, die mit dem Detektor gemessenen Teilchenpositionen um genau diese Verschiebungen zu korrigieren, um so eine bessere Ortsauflösung, und damit auch eine bessere Impulsauflösung zu erhalten.

In Abbildung 7.21 oben sind die dy 's für alle 6 Ebenen des Silizium Spurdetektors histogrammisiert. Wie man sieht, schwanken die Breiten der entsprechenden Verteilungen ohne Alignment Korrektur zwischen 10 und 20 μm (Ebene 3 ausgenommen). Nach der Korrektur durch die mit TAS und Teilchen gemessenen Alignmentdaten liegen die Breiten der Verteilungen (bis auf Ebene 2) alle unter 10 μm (Abbildung 7.21 unten).

In Tabelle 7.3 sind die einzelnen Breiten σ_y der jeweiligen Verteilungen in den sechs Ebenen des Silizium Spur Detektors mit und ohne Alignment notiert.

Man erhält mit der Alignment Korrektur also im Schnitt eine um 20% bessere Ortsauflösung und damit auch eine um 20% bessere Impulsauflösung. Die Ergebnisse dieser Alignment Messungen wurden in die Analyse der AMS-01

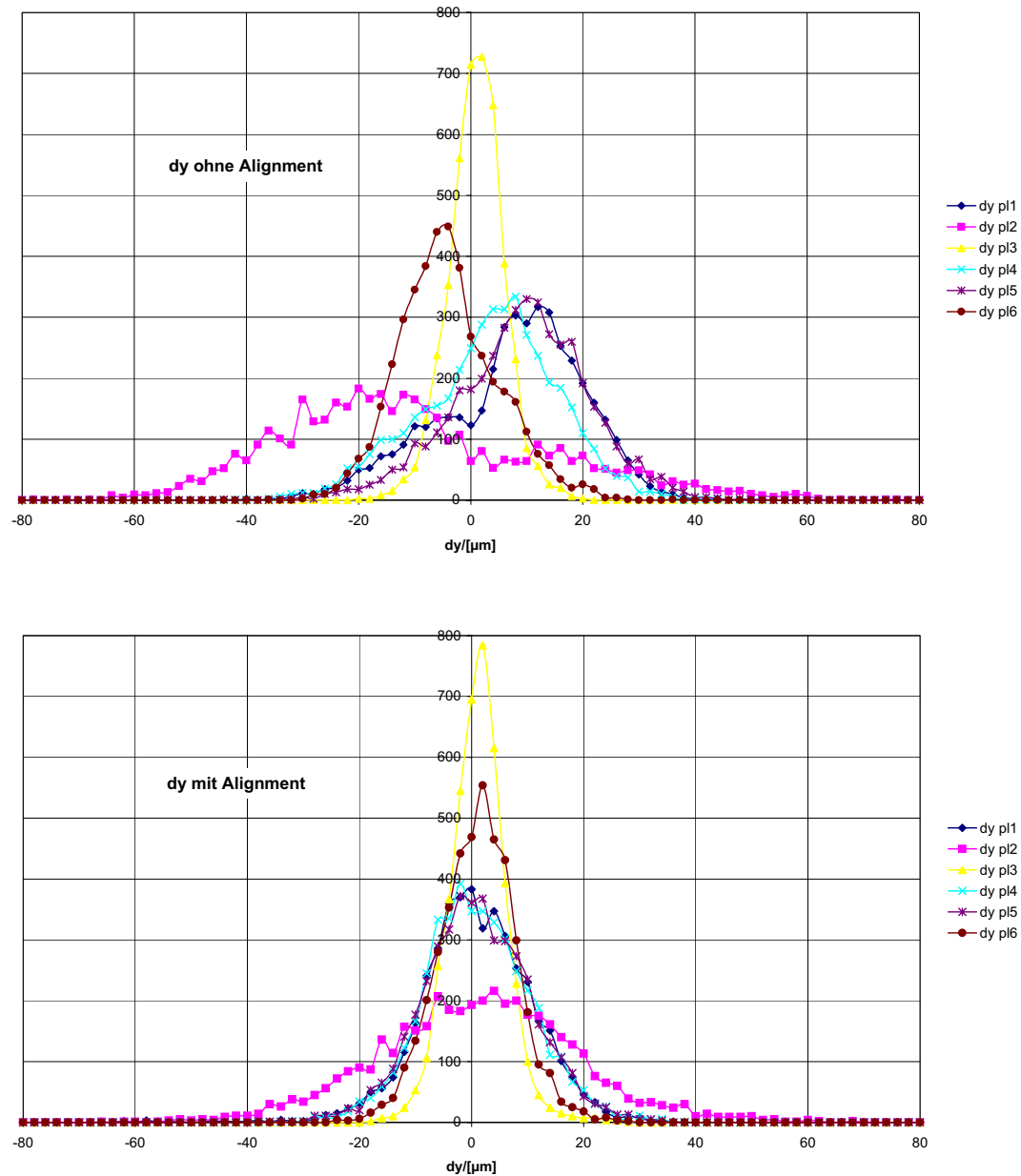


Abbildung 7.21: Die Ortsauflösung der y -Koordinate der 6 Ebenen des Silizium Spurdetektors von AMS-01 ohne (oben) und mit (unten) Cosmic Alignment Korrektur (siehe auch Tabelle 7.3)

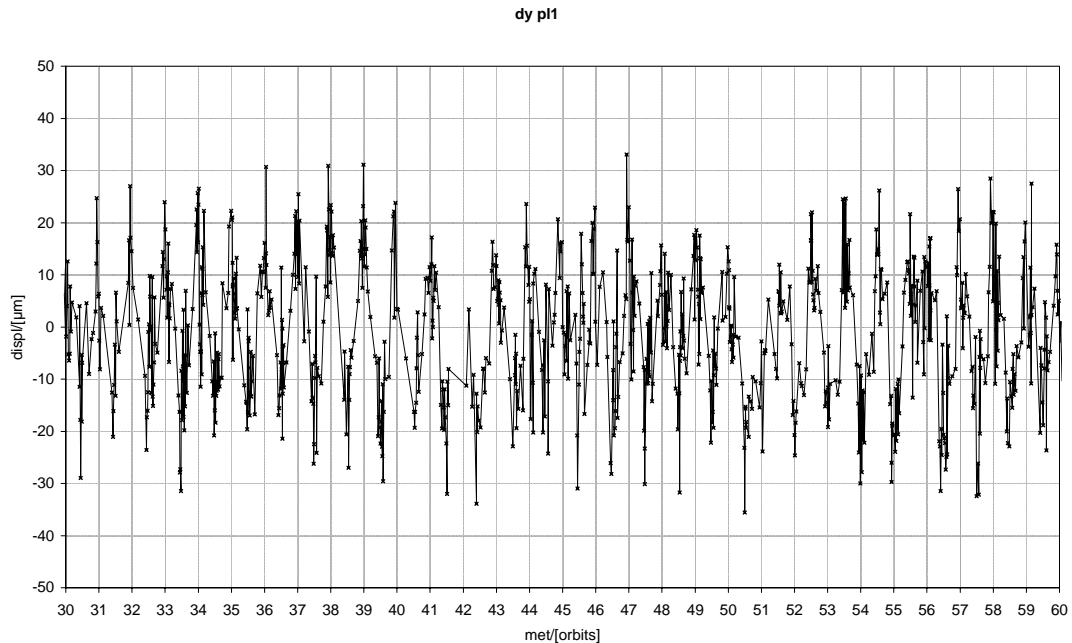


Abbildung 7.22: Der zeitliche Verlauf der Positionsmessungen des Cosmic Alignment für die y -Koordinate der Ebene 1 während der Erdumläufe 30 bis 60 des STS-91 Weltraumflugs

STS-91 Daten implementiert, um so die erzielte Impulsauflösung entsprechend zu verbessern. [107]

7.5 Orbitstruktur

In Abbildung 7.14 erkennt man allerdings noch eine zweite, wesentlich schnellere zeitliche Struktur in den Positionsdaten für die y -Koordinate des Cosmic Alignment, deren Amplitude zwei bis fünfmal so groß ist, wie die Amplitude der oben beschriebenen langsamen Bewegung der y -Koordinate und die periodisch in der Zeit verläuft. Diese Struktur kann wiederum in den Positionsdaten der x -Koordinate des Cosmic Alignment nicht beobachtet werden.

Vergrößert man die Zeitskala, indem man sich z. B. nur einen Tag der zehntägigen STS-91 Mission ansieht, so sieht man, dass die Periode dieser oszillierenden y -Bewegung 91,85 Minuten beträgt. Dies ist exakt die Zeit, die das Space Shuttle für einen Erdumlauf braucht. D. h., dass man hier einen starken Effekt beobachtet, der in irgendeiner Weise an die Position des Space Shuttles im Orbit gekoppelt ist. Diese Tatsache wird in Abbildung 7.22 exemplarisch für die Daten der Orbits 30 bis 60 in der Ebene 1 gezeigt. Für die anderen Ebenen und Orbits verhält sich das Signal entsprechend (vgl. Abbildung 7.14).

Alleine die Tatsache, dass man mit dem Silizium Spurdetektor des AMS-01 Experimentes Effekte beobachten kann, die in irgendeiner Weise mit der Posi-

tion des Space Shuttles auf seiner Erdumlaufbahn verknüpft sind, ist äußerst bemerkenswert und spricht für die Präzision des Detektors. Jedoch möchte man natürlich wissen in welcher Art und Weise dieser Mechanismus abläuft, d. h. welchen Einfluss die Orbitposition der Raumfähre *Discovery* auf die Positionsbestimmung des Silizium Spurdetektors ausübt.

Die Vermutung, dass diese oszillierenden Bewegungen nicht wie die oben beschriebene langsamen Bewegung des Trackers ausschließlich durch thermische Verschiebungen der Nachweisstruktur entstehen, liegt aus den folgenden drei Gründen nahe:

1. Im Gegensatz zu den oben beschriebenen langsamen Bewegungen, die sowohl vom Cosmic Alignment als auch vom TAS gemessen wurden werden die vom Cosmic Alignment gemessenen schnellen und periodischen Bewegungen nicht von den mit dem Laser gemessenen Alignmentdaten reproduziert, und das, obwohl ihre Amplituden bis zu fünfmal so groß sind, wie die Amplituden der langsamen Bewegungen. Die Datennahme des TAS erfolgte zwar zu selten, um eine solche 91 minütige Struktur überhaupt zu erfassen, allerdings schließen die Laserdaten trotzdem eine derartige Bewegung aus, da die zeitlichen Abstände der einzelnen Laser Datenpunkte keine ganzzahligen Vielfachen der Orbitzeit (91,85 Minuten) sind. Um die mit dem TAS gemessenen flachen Bewegungsverläufe trotz mechanischer Bewegung des Silizium Detektors und/oder des TAS zu reproduzieren, müssten die Zeitpunkte der TAS Messungen nämlich immer exakt zur gleichen Zeit innerhalb eines Orbits gemessen werden, damit es keine Positionsänderungen gibt. Dies ist jedoch aufgrund der völlig willkürlich gewählten Messzeitpunkte der Laser Messungen nicht der Fall
2. Die globale Temperaturkurve vom AMS-01 zeigt keine 91 minütigen Änderungen, deren Amplitude zwei bis fünfmal so groß ist wie die Stufen des langsamen Temperaturverlaufs (vgl. Abbildung 5.8). Da die Amplituden der oszillierenden Bewegung jedoch bis zu fünfmal so groß sind, wie die der langsamen Bewegung, müsste auch die Amplitude der zugrunde liegenden Temperatursprünge, die diese Bewegung verursachen, bis zu fünfmal so groß sein wie die Amplitude der langsamen Temperaturbewegung, wenn beide Bewegungen den gleichen Ursprung haben sollen. Dies ist jedoch nicht der Fall.
3. Die Zeitkonstante (ca. 91 Minuten) dieser Bewegung ist zu schnell, als dass sich bei den Wärmetransport- und Wärmeausdehnungs- Eigenschaften der in AMS-01 verwendeten Materialien mechanische Verschiebungen von bis zu $\pm 50 \mu\text{m}$ in dieser kurzen Zeit ergeben könnten.

Die Tatsache, dass diese oszillierende Struktur ausschließlich in den y -Koordinaten des Cosmic Alignment zu beobachten ist, führt zu der Annahme,

dass es sich bei diesem Effekt um einen Effekt des Magnetfelds handeln muss, da sowohl der Laser des TAS als auch die x -Koordinate der Teilchenspuren unempfindlich gegenüber dem Magnetfeld sind. Die y -Koordinate des Cosmic Alignment reagiert dagegen empfindlich auf Änderungen des Magnetfelds, da sie ja gerade diejenige Koordinate ist, über die die Krümmung der Spur im Magnetfeld und damit der Teilchenimpuls gemessen wird (vgl. Kapitel 7.1).

Die Temperaturabhängigkeit des vom AMS-01 Permanentmagneten erzeugten Magnetfelds beträgt laut AMS-01 Technical Proposal $dB/dT = 0,15\%/K$ (siehe Gleichung 3.1) [60]

Der mittlere Impuls der Cosmic Alignment Teilchen Spuren von ca. 5 GeV entspricht einer mittleren Sagitta von ca. 1 mm (vgl. Tabelle 7.1). Die mittlere Ablenkung der mit dem Cosmic Alignment gemessenen Positionen beträgt $dy \approx 10 \mu\text{m}$ (vgl. Abbildung 7.14). $10 \mu\text{m}$ entsprechen ca. 1% von 1 mm. Laut Gleichung 7.5 ist die Sagitta s proportional zum Magnetfeld B , d. h. eine 1 prozentige Änderung der Sagitta ds erfordert eine ebenfalls 1 prozentige Änderung des Magnetfelds dB , die laut Gleichung 3.1 nur durch eine Temperaturänderung von $dT = 6,6 \text{ K}$ hervorgerufen werden kann.

Ein Blick auf die Abbildung 7.23 zeigt, dass lokale Temperaturänderungen des Magneten von $dT \approx 6 \text{ K}$ tatsächlich auch innerhalb der kurzen (91 minütigen) Tag-Nacht-Phasen des Space Shuttles durchaus im Bereich des Möglichen liegen.

Die Abbildung 7.23 zeigt die Temperaturverläufe der 16 Temperatursensoren auf dem Magneten von AMS-01. Deutlich zu erkennen ist die 91 minütige Struktur der schnellen Temperaturschwankungen durch Aufheizen und Abkühlen beim Durchgang durch die Tag- und Nachtphasen während eines Orbits, sowie damit überlagert das langsame generelle Aufheizen des gesamten Magneten (vgl. Abbildung 5.8).

Wie man sieht, sind lokale Temperatursprünge von 3 K bis 15 K pro Orbit durchaus möglich. Außerdem erkennt man, dass ein und der selbe Temperatursensor von Orbit zu Orbit äußerst unterschiedliche Amplituden in seinen Temperaturschwankungen haben kann.

Um die mit dem Cosmic Alignment gemessenen oszillierenden Bewegungen durch temperaturbedingte Schwankungen des Magnetfelds zu erklären, ist es unbedingt erforderlich, dass der Magnet sich inhomogen, also nur an bestimmten Stellen lokal aufwärmt bzw. abkühlt. Eine globale Temperaturänderung hätte neben den in Kapitel 7.2 beschriebenen mechanischen Verschiebungen lediglich eine gleichmäßige, globale Änderung der Stärke des Magnetfelds zur Folge. Eine solche globale Änderung der Magnetfeldstärke würde aber keinen Einfluss auf die Spur Rekonstruktion eines Teilchens durch das Magnetfeld haben, sondern nur auf die Umrechnung der Spurkrümmung in den entsprechenden Impuls.

Die rekonstruierte Spur eines geladenen Teilchens mit unbekanntem Impuls

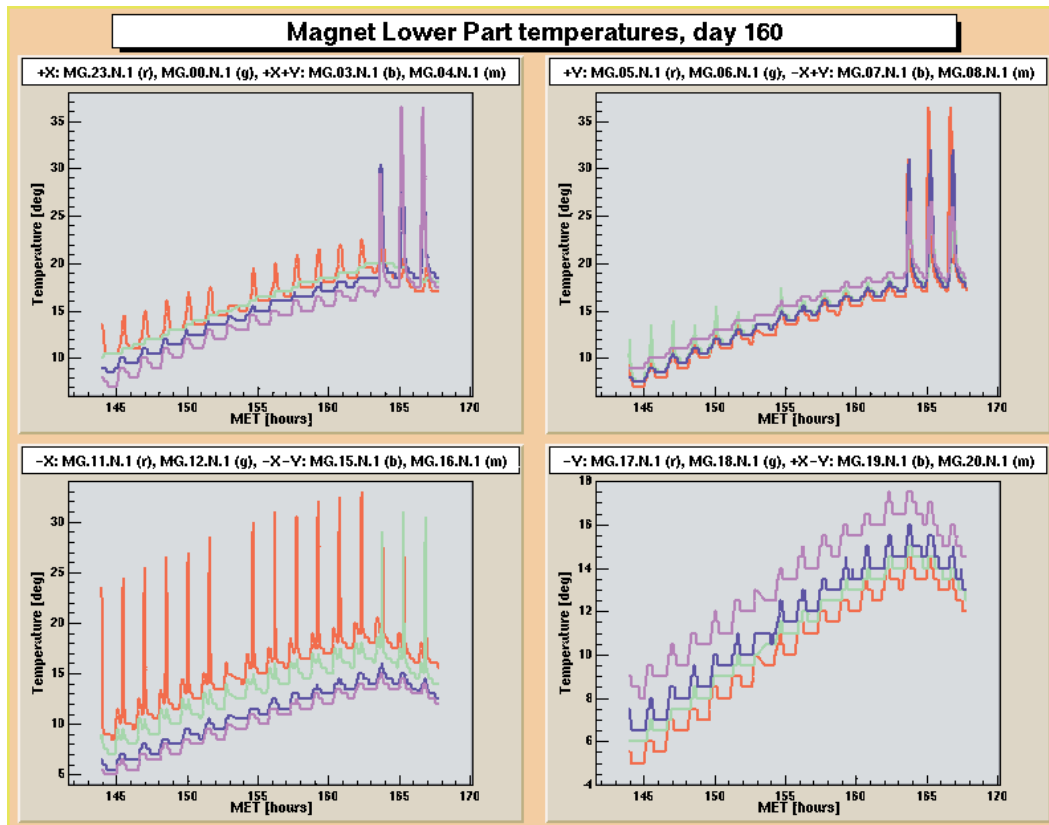


Abbildung 7.23: Die Temperatur Verläufe der 16 Magnet Temperatursensoren am 9. Juni 1998 (Tag 160) = 7. Tag der Mission

durch ein Magnetfeld bleibt bei einer globalen Skalierung des Magnetfelds um einen (temperaturabhängigen) Faktor x exakt dieselbe. Lediglich der aus der Spurkrümmung berechnete Impuls des Teilchens ändert sich bei einer solchen globalen Skalierung des Magnetfelds. Daher wurde diese temperaturabhängige Skalierung des Magnetfelds bei der Berechnung der Teilchenimpulse in die AMS-01 Analyse integriert, sie reicht jedoch nicht aus, um die mit dem Cosmic Alignment gemessenen oszillierenden Bewegungen zu erklären.

Um eine Änderung der rekonstruierten Teilchenspur durch das Magnetfeld zu erhalten, bedarf es nämlich ausschließlich lokaler Änderungen der Magnetfeldstärke oder gar der Magnetfeldrichtung. Diese können jedoch wiederum nur durch lokale Änderungen der Magnettemperatur verursacht werden. Zur Erklärung des weiter oben beschriebenen Effektes der oszillierenden Bewegungen der Cosmic Alignment Daten ist also ein lokaler Temperaturunterschied von mindestens 6 bis 7 K in verschiedenen Bereichen des Magneten erforderlich, der zusätzlich an die Position des Space Shuttles im Orbit gekoppelt ist. Ein solcher zeitabhängiger Temperaturgradient im AMS-01 Magneten wird durch die Abbildung 7.23 bestätigt.

Es stellt sich natürlich zwangsläufig die Frage, ob man diese schnellen,

periodischen Positionsänderungen in y nicht genauso nachträglich korrigieren kann, wie die langsamen Bewegungen, um so die Orts- und damit die Impulsauflösung des Silizium Trackers zu verbessern (vgl. Kapitel 7.4). Da die Amplituden der schnellen, periodischen Änderungen bis zu fünfmal so groß sind wie die maximalen Amplituden der langsamen Bewegungen, würde eine Korrektur in diesem Fall sogar einen noch größeren Effekt in der Verbesserung der Orts- bzw. Impulsauflösung erzielen.

Eine genauere Untersuchung der periodischen Bewegungen zeigt jedoch, dass deren Verlauf, trotz Ihrer Periodizität zu unsystematisch ist, um hiermit eine generelle Korrektur der gemessenen Positionen vorzunehmen. So gibt es beispielsweise starke Amplitudenschwankungen und Phasensprünge in dem Verlauf der periodischen Bewegung, wie ein Blick auf Abbildung 7.22 verrät.

Innerhalb der dargestellten 30 Erdumläufe schwankt die Amplitude von Orbit zu Orbit statistisch um bis zu 200% und bei Orbit 51 gibt es einen Phasensprung in der Periodizität um 180° . Bei den Erdumläufen 30 bis 50 liegen die Maxima des Bewegungsverlaufs immer am Anfang und die Minima in der Mitte eines jeden Orbits. Bei den Erdumläufen 51 bis 55 liegen dagegen die Minima am Anfang und die Maxima in der Mitte eines jeden Orbits, um dann bei Orbit Nummer 56 in die erste Phasenlage zurückzukehren.

Unter der oben erwähnten Vermutung, dass die Ursache der Oszillation mit dem lokalen Aufwärmen bzw. Abkühlen einzelner Bereiche des Magneten durch Sonneneinstrahlung bzw. Schattenbildung im Verlaufe eines Erdumlaufs zusammenhängt, liegt die Vermutung nahe, dass ein solcher Phasensprung um 180° durch die Veränderung der Position der Raumfähre im Orbit hervorgerufen werden könnte.

Tatsächlich wechselte die Raumfähre *Discovery* während des zehntägigen STS-19 Weltraumflugs einige Male ihre Position im Orbit, indem sie sich um 180° um ihre Längsachse drehte, so dass sie mal mit der Ladebucht nach oben, mal kopfüber flog. Eine derartige Drehung des Space Shuttles könnte in der Tat die Ursache der beobachteten 180° Phasensprünge in den y -Positionsdaten von AMS-01 sein, da der AMS-01 Detektor in der Payload Bay des Space Shuttles bei Drehungen des Shuttles um 180° ebenfalls um 180° gedreht wird. Dadurch befinden sich genau die entgegengesetzten Seiten des Magneten in der Sonne bzw. im Schatten, was den entsprechenden Temperatur Effekt auf das Magnetfeld umkehren könnte.

Schaut man im Flugplan der STS-91 Mission nach, so erfährt man, dass das Space Shuttle zu den Zeitpunkten einiger Phasensprünge in den Daten tatsächlich gedreht wurde. Dem gegenüber stehen allerdings auch Phasensprünge in den Daten, zu Zeiten, an denen an der Shuttle Position nichts geändert wurde, sowie Änderungen der Shuttle Position, die nicht in einem entsprechenden Phasensprung in den Daten resultieren. Auch wenn also offenbar ein Zusammenhang zwischen der Shuttle Position und den Phasensprüngen in den Daten existiert, so ist dieser anscheinend nicht unmittelbar. Offensichtlich

ist die Art der Wechselwirkung zwischen der Orbitposition des Space Shuttles und Positionsmessung des Silizium Trackers zu komplex, um sie vollkommen zu verstehen.

Faltet man die Positionsmessungen des Cosmic Alignment in den 6 Tracker Ebenen über die 146 Erdumläufe der STS-91 Mission auf einen einzelnen Standardorbit zusammen, so erhält man die 6 Postionsverteilungen in Abbildung 7.24, bei denen 2 Dinge sofort ins Auge fallen:

1. die annähernd homogene Verteilung der Amplituden innerhalb der Bewegungen, die eine systematische Korrektur der Positionsdaten nahezu unmöglich machen, sowie
2. die Knoten zu Beginn, in der Mitte und am Ende eines jeden Orbits, die beweisen, dass die Phasensprünge in der Oszillation tatsächlich ausschließlich um 180° erfolgen.

Auch wenn dieses Ergebnis des Cosmic Alignment aufgrund seiner teilweise unverständlichen Systematik nicht direkt zur Verbesserung der Orts- bzw. Impulsauflösung des Silizium Trackers von AMS-01 beiträgt, so ist es dennoch erstaunlich und bemerkenswert, mit welcher Empfindlichkeit und Präzision der Detektor in der Lage ist, äußere Einflüsse, wie z. B. die Position der Raumfähre im Orbit, zu reproduzieren, obwohl diese auf den ersten Blick in keinerlei Zusammenhang mit der Nachweisstruktur stehen. Derartige Untersuchungen verbessern in jedem Fall das Verständnis über die Funktionsweisen der komplexen Detektor Systeme.

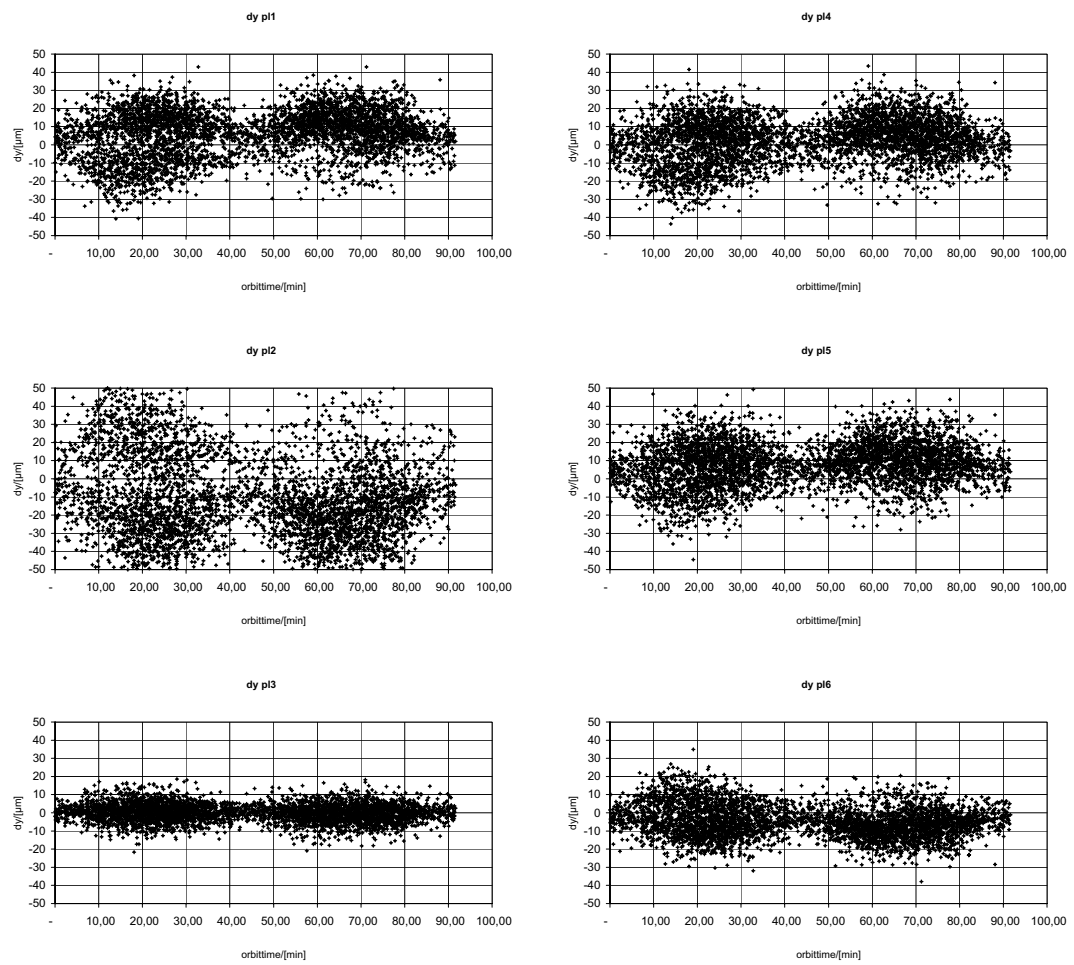


Abbildung 7.24: Der zeitliche Verlauf der Positionsmessungen des Cosmic Alignment für die y -Koordinate der 6 Ebenen des Silizium Spur Detektors während der 146 Erdumläufe des STS-91 Weltraumflugs gefaltet auf einen Standardorbit (91,85 Minuten)

7.6 Zusammenfassung des AMS-01 STS-91 Alignment

Die Zusammenfassung der AMS-01 STS-91 Alignment Messungen ist in der Abbildung 7.25 zu sehen. Prinzipiell existieren bei AMS-01 zwei verschiedene Temperatur Bewegungen während der STS-91 Mission:

1. eine langsame, globale Abkühlung und Erwärmung des gesamten AMS-01 Detektors mit einer maximalen Amplitude dT von ca. 15 K und einer Zeitkonstanten dt von mehreren Tagen, sowie
2. eine schnelle, lokale Abkühlung und Erwärmung einzelner Bereiche des AMS-01 Detektors durch die unterschiedliche Schattenbildung bei der Bewegung des Detektors im Erdorbit mit einer maximalen Amplitude dT von ca. 30 K und einer Zeitkonstanten dt von genau einem Orbit (91 Minuten).

Beide Temperaturänderungen verursachen jeweils sowohl Änderungen in der magnetischen Feldstärke des Permanentmagneten mit einer Temperaturabhängigkeit von $dB/dT = 0,15\%/K$ (siehe Gleichung 3.1), als auch Änderungen in der mechanischen Supportstruktur mit materialabhängigen Temperaturkoeffizienten. Es gibt also zwei verschiedene Ursachen mit jeweils zwei verschiedenen Wirkungen, was zu vier generell unterschiedlichen Signalstrukturen bei den Alignment Messungen führt (siehe Abbildung 7.25).

1. Die langsame, globale Temperaturänderung bewirkt eine ebenso langsame und globale Änderung des gesamten Magnetfelds um $dB \approx 2\%$, die mit den Magnetfeldsensoren von AMS-01 erfasst wird. Da sowohl das Cosmic Alignment, als auch das Laser Alignment nicht sensitiv für globale Änderungen des Magnetfelds sind, gibt es hier keine entsprechenden Signale. Der aus der Magnetfeldänderung resultierende Fehler bei der Impulsbestimmung aus der Krümmung (Sagitta) der rekonstruierten Teilchenspuren wird mit einer generellen Skalierung des Magnetfelds korrigiert. Bei AMS-02 wird dieser Effekt keine Probleme bereiten, da hier ein supraleitender Magnet zum Einsatz kommt, dessen Magnetfeld temperaturunabhängig ist.
2. Außerdem bewirkt die langsame, globale Temperaturänderung eine ebenso langsame mechanische Verschiebung der Silizium Sensoren um bis zu 20 μm . Diese Verschiebungen zeigen sich sowohl in den Laser Alignment Messungen, als auch in den Cosmic Alignment Messungen, mit einer Übereinstimmung von $\leq 10 \mu\text{m}$ zwischen den beiden verschiedenen Messverfahren. Die entsprechende Positionskorrektur führt zu einer 20 prozentigen Verbesserung der Impulsauflösung von AMS-01. Diese Korrektur wird auch bei AMS-02 zum Einsatz kommen.

AMS-01 STS-91 Alignment Conclusions

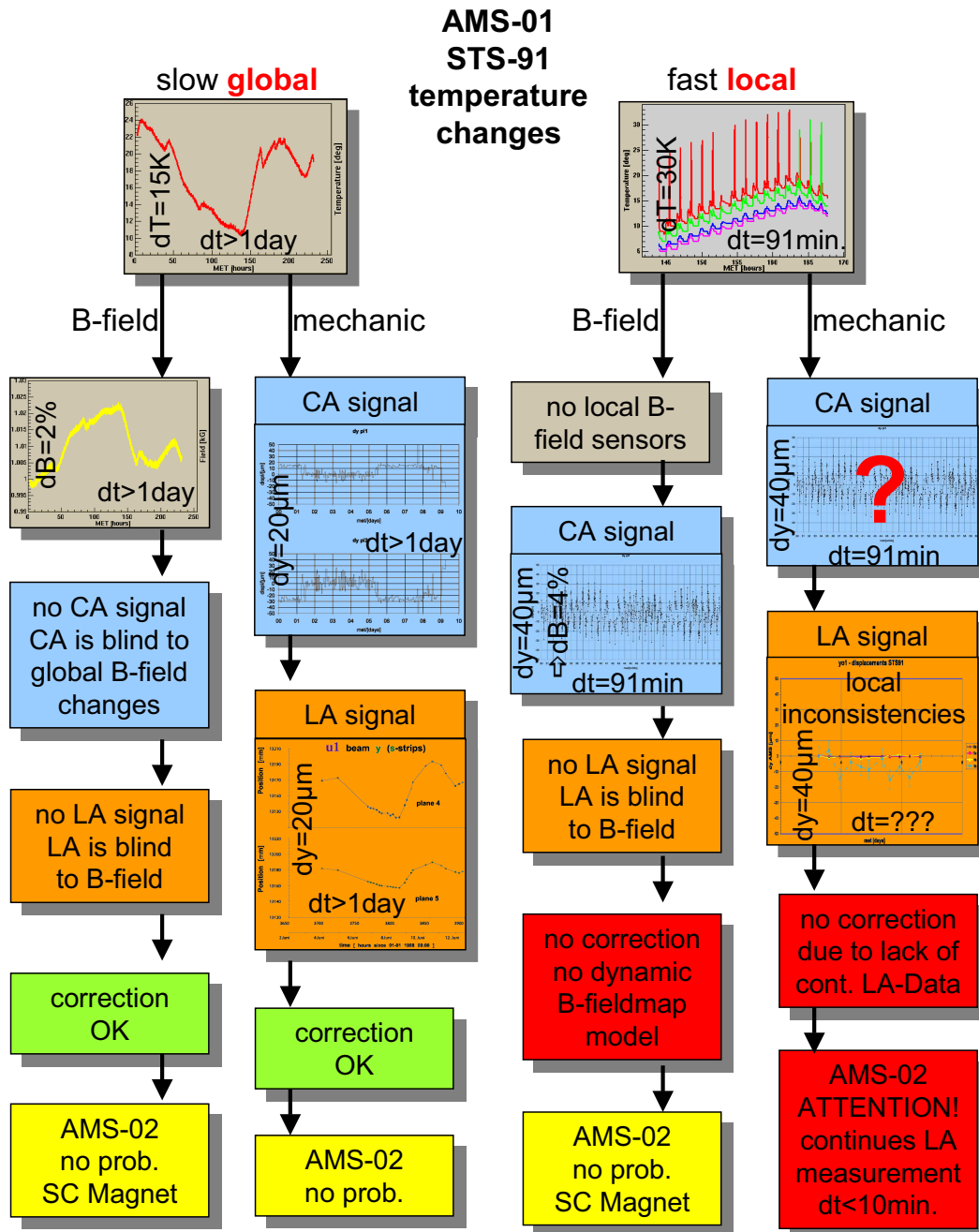


Abbildung 7.25: Die Zusammenfassung der AMS-01 STS-91 Alignment Messungen

3. Die schnellen, lokalen Temperaturänderungen bewirken ebenso schnelle und lokale Änderungen des Magnetfelds um $\delta B \approx 4\%$, die sich deutlich im Cosmic Alignment widerspiegeln, da das Cosmic Alignment empfindlich für lokale Magnetfeldänderungen ist. Das Laser Alignment sieht dagegen nichts von diesen lokalen Magnetfeldänderungen, da der Laser unempfindlich auf das Magnetfeld ist. Aus Mangel eines dynamischen Modells für diese lokalen Magnetfeldänderungen, gibt es bei AMS-01 keine Korrektur für diesen Effekt, obwohl er fast doppelt so stark ist, wie die langsamen Verschiebungen. Für AMS-02 stellt dies allerdings kein Problem dar, da der hier zum Einsatz kommende supraleitende Magnet über ein konstantes (temperaturunabhängiges) Magnetfeld verfügt.
4. Außerdem bewirken die schnellen, lokalen Temperaturänderungen mechanische Verschiebungen der Silizium Sensoren, die mit beiden Alignmentverfahren zu sehen sein sollten. Beim Cosmic Alignment kann man nicht sagen, welcher Anteil des Signals durch die Magnetfeldänderung und welcher Anteil durch eventuelle lokale mechanische Verschiebungen induziert wird, da das Signal eine Überlagerung beider Effekte darstellt. Beim Laser Alignment sollten derartige lokale Verschiebungen dagegen sofort sichtbar werden. Leider gab es während der STS-91 Mission zu wenig Laser Messungen ($dt \approx 8$ h), um damit eine genaue Aussage über die zeitliche Struktur ($dt = 91$ min.) zu machen. Es gibt jedoch in den Laserdaten lokale Inkonsistenzen von bis zu $40 \mu\text{m}$, die sich nicht alleine durch eine Bewegung des Lasersystems erklären lassen. Dies legt die Vermutung nahe, dass es sich bei diesen Inkonsistenzen um genau die lokalen Verschiebungen handelt. Da nicht genügend Laserdaten vorhanden sind, lässt sich für die STS-01 Mission von AMS-01 keine Korrektur auf diese schnellen, lokalen Verschiebungen in der Mechanik durchführen. Aus diesem Grund ist es für AMS-02 besonders wichtig, dass die Laser Messungen mindestens alle 10 Minuten durchgeführt werden, damit eine solche Korrektur möglich wird.

Kapitel 8

Ladungsmessungen an den AMS-01 SI Sensoren (Genf 5/99)

Bei Silizium Detektoren hängt die gemessene Ladung und Position eines Teilchens von der Position des Teilchendurchgangs relativ zu den Auslese-Streifen des Detektors ab. Daher hat auch das Muster der einzelnen Auslese- und Floating-Streifen einen entscheidenden Einfluss auf die Orts- und Ladungsmessung durchgehender Teilchen. Vor allem bei Silizium Detektoren mit einem großen Abstand zwischen den einzelnen Auslestreifen macht sich dieser Effekt natürlich besonders stark bemerkbar (siehe Abbildung 8.1). [117, 135]

Tatsächlich wird ein derartiger Effekt auch beim Silizium Spurdetektor von AMS-01 beobachtet. Die Ladungsmessung auf der k-Seite (mit $208 \mu\text{m}$ Auslestreifen Abstand) zeigt deutliche Verluste von bis zu 50% gegenüber der Ladungsbestimmung auf der s-Seite (mit nur $110 \mu\text{m}$ Auslestreifen Abstand).

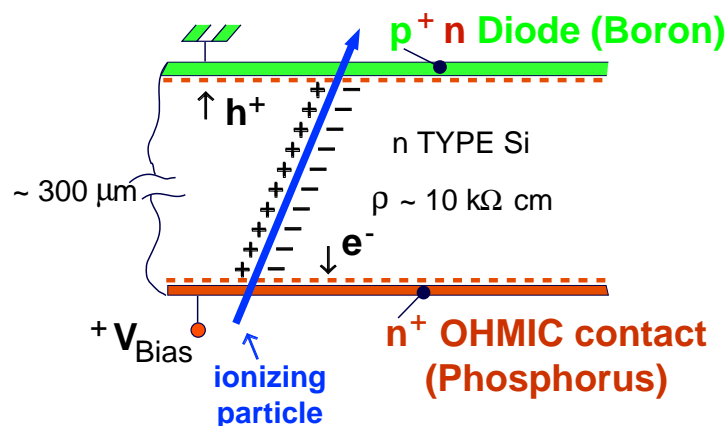


Abbildung 8.1: Das Prinzip eines Silizium Streifen Detektors

prototype	developed in	wafer	new Bonds	depletion voltage
1.	Perugia	12	64	110 V
2.	Geneva	2	32	110 V

Tabelle 8.1: Die beiden Prototypen der AMS-01 Leiter

Dies liegt vor allem daran, dass der Widerstand zwischen den Auslestreifen auf der K-Seite mit $\approx 10 \text{ M}\Omega$ wesentlich kleiner ist als der Widerstand zwischen den Auslestreifen auf der S-Seite ($\approx 10 \text{ G}\Omega$). Die entsprechende Feldverteilung im doppelseitigen Silizium Sensor verteilt die Ladungen auf der K-Seite dadurch auf mehr Streifen als auf der S-Seite.

Um dieses Problem zu beheben, wurden zwei Prototypen (siehe Tabelle 8.1) von AMS-01 Silizium Leitern entwickelt, bei denen auf der K-Seite in einem Bereich wie in Kapitel 3.1.5 beschrieben nur jeder vierte Streifen an die Verstärker angebondet wurde (herkömmliches Bondingschema) und in einem zweiten Bereich der mittlere der 3 Floating-Streifen zwischen 2 Auslese-Streifen mit einem benachbarten Auslese-Streifen elektrisch verbunden wurde (neues Bondingschema) (siehe Abbildung 8.2). Die S-Seiten der beiden Detektoren wurden nicht mit zusätzlichen Bonds versehen, da hier keine Probleme bei der Ladungsmessung auftreten.

Die Idee dieses neuen Bondingschemas ist, dass durch das Kurzschließen des Auslestreifens mit dem mittleren Floatingstreifen die zwischen den Auslestreifen „verloren gegangene“ Ladung auf einfache Art und Weise wieder aufgespürt werden kann. Der Erfolg dieses Konzepts soll in diesem Kapitel mit Hilfe des TAS Lasers untersucht werden, da das Lasersignal ein konstantes Energiespektrum hat und somit eine reproduzierbare Ladungsverteilung im Silizium erzeugt.

Leider ist die Ladungsverteilung, die der auf 1 mm Durchmesser fokussierte Laserstrahl des TAS im Silizium erzeugt, nur sehr schlecht mit der erzeugten Ladungsverteilung eines fast nadelförmigen Teilchendurchgangs zu vergleichen. Während das Lasersignal gleichzeitig 10 - 20 Auslestreifen auf einmal trifft, ist das typische Signal eines minimal ionisierenden Teilchen (mip, minimal ionizing particle) maximal 2 - 3 Auslestreifen breit, je nach dem unter welchem Winkel das Teilchen durch den Detektor gegangen ist. Der „Ionisations-schlauch“ eines mips hat bedingt durch die Vielfachstreuung im Silizium typischer Weise einen Durchmesser von einigen Mikrometern (siehe Abbildung 8.3).

Um dem Teilchensignal möglichst nahe zu kommen, wird der TAS Laser mit einer Mikrofokus Optik ausgestattet, die in der Lage ist, den Laserstrahl in einem Abstand von 2 cm von der Optik auf einen Durchmesser von $\emptyset \leq 20 \mu\text{m}$ zu fokussieren.

Bei den folgenden Messungen soll mit dem mikrofokussierten ($\emptyset \leq 20 \mu\text{m}$) und exakt positionierbaren ($\Delta x \leq 3 \mu\text{m}$) Infrarot-Laser ($\lambda = 1083 \text{ nm}$) des

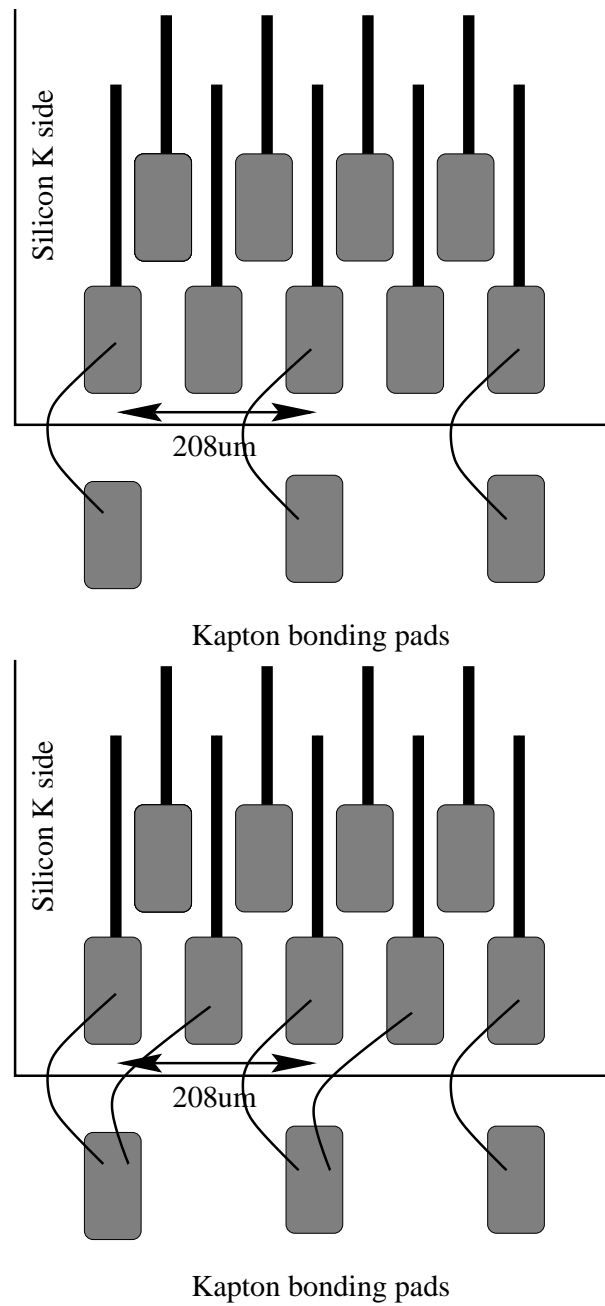


Abbildung 8.2: Das herkömmliche Bondingschema von AMS-01 (oben) und das neue Bondingschema (unten)

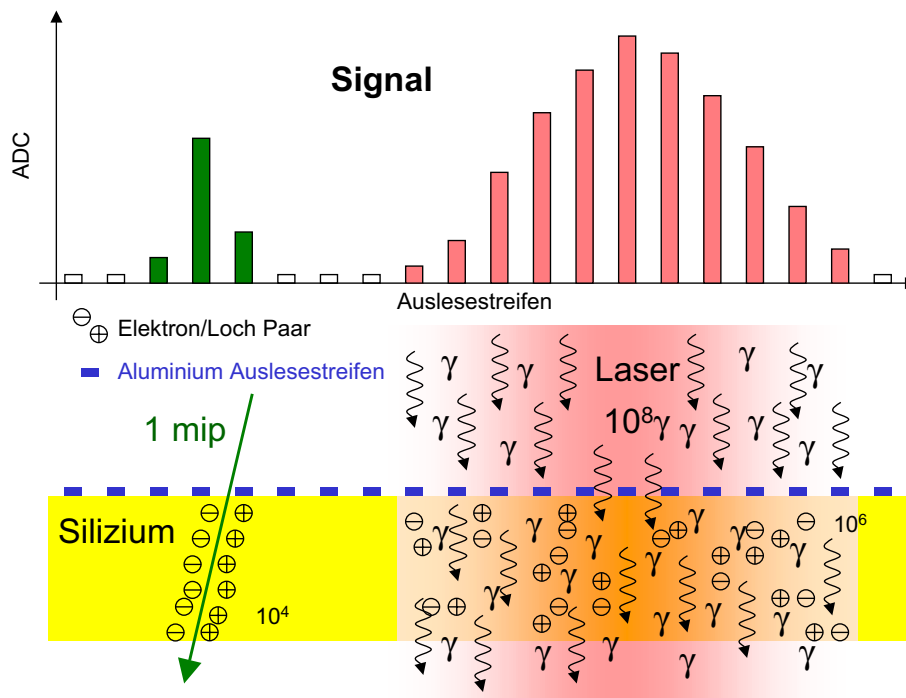


Abbildung 8.3: Vergleich eines Teilchensignals mit dem TAS Lasersignal im Silizium Detektor

TAS die Abhängigkeit der Orts- und Ladungsmessung von Abstand und Bondingschema der Auslestreifen für die doppelseitigen Silizium Detektoren des AMS-01 Experimentes mit zwei verschiedenen Bonding-Mustern für Auslese- und Floating-Streifen auf der K-Seite untersucht werden. Die S-Seite wird zum Vergleich mit untersucht.

8.1 Messaufbau

Der Messaufbau (Abbildung 8.4) ist ähnlich wie der in Kapitel 4.3.4 beschriebene Messaufbau zur Bestimmung der Ortsauflösung des TAS, nur ohne CCD Kamera unter den Silizium Wafern (Abbildung 4.19).

Das Laserlicht der Infrarot-Laserdiode mit einer Wellenlänge von $\lambda = 1083 \text{ nm}$ wird in eine Monomode Glasfaser eingekoppelt. Diese Wellenlänge befindet sich gerade an der Absorptionskante des Absorptionsspektrums von Silizium (siehe Abbildung 4.10), so dass ein Teil des Laserlichts komplett durch den $300 \mu\text{m}$ dicken Silizium-Wafer hindurchgeht, ein anderer Teil jedoch im Silizium absorbiert wird und somit zur Ladungstrennung und zu dem gemessenen Signal führt (vgl. Kapitel 4.2). Durch die hohe Wellenlänge kommt genügend Laserlicht durch das Silizium hindurch. Dadurch findet die Ladungstrennung, ähnlich wie bei einem ionisierenden Teilchen, auf dem ganzen Weg durch das Silizium statt, und nicht nur an der Oberfläche des Siliziums.

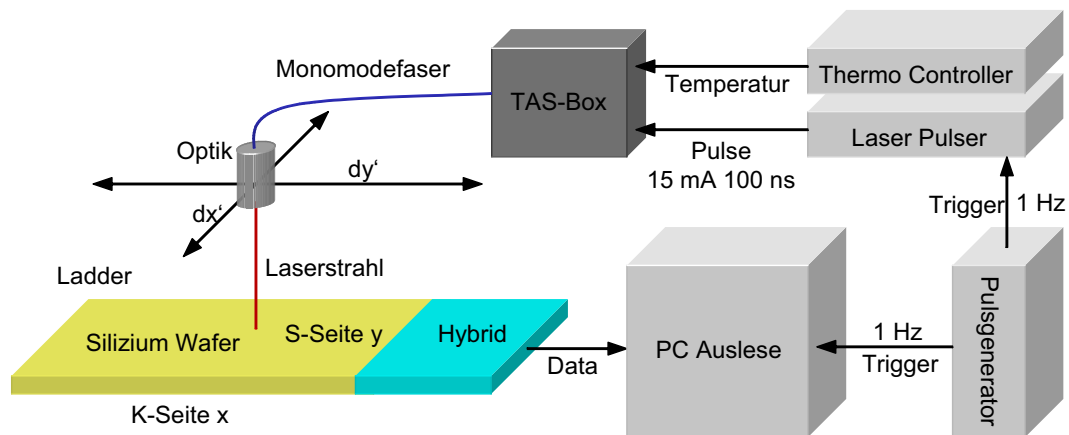


Abbildung 8.4: Der Messaufbau zur Bestimmung der Ladungsmessungseffizienz des neuen Bondingschemas

Am Ende der Faser befindet sich die Mikrofokus-Optik, die den Strahl in einem Abstand von ca. 2 cm von der Optik auf einen Durchmesser von ca. 20 μm fokussiert. Zur Einstellung des Fokus wird eine CCD Kamera benutzt, deren CCD Chip genau 2 cm von der Optik entfernt ist. Dann wird so lange fokussiert, bis das Profil auf dem an der CCD Kamera angeschlossenen Monitor minimal wird (ca. 20 μm).

Die Mikrofokus Optik ist auf einer Positionier-Vorrichtung montiert, die sich in ca. 2 cm Abstand zum Silizium Detektor in den 2 Koordinaten Richtungen x und y der Leiter parallel zur Ebene des Siliziums auf ca. 3 μm genau positionieren lässt (siehe Abbildung 8.4).

Die Laserdiode wird von einem Laserpulsler mit einem Strom von 15 mA (unterhalb der Laserschwelle der Diode) und einer Pulsbreite von 100 ns betrieben. Das entsprechende Signal im Silizium Detektor entspricht ca. 3 - 4 mips¹. Außerdem wird die Temperatur der Diode mit dem eingebauten Temperatursensor und Peltier-Element über einen Temperatur-Controller konstant auf 17°C gehalten, um Temperaturänderungen und dadurch eventuell bedingte Amplitudenschwankungen der Laserdiode zu vermeiden, da diese zwangsläufig auch zu Schwankungen in der gemessenen Ladung führen würden. Laserpulsler und Datennahme werden synchron von einem externen Pulsengenerator mit einer Frequenz von ca. 1 Hz getriggert.

8.2 Messungen

Zunächst wird eine Messung ohne Laser gemacht, um den Pedestal des Detektors mit 500 Ereignissen zu ermitteln. Die Positionier-Vorrichtung wird danach so eingestellt, dass der Laserstrahl sowohl den neu gebondeten als auch

¹minimal ionizing particles = minimal ionisierende Teilchen

Nr.	Leiter	Seite	Messpunkte	Schrittweite	Richtung	Streifen
1	1	K	400	12 μm	x	23
2	1	S	200	4 μm	y	7
3	2	K	460	12 μm	x	26
4	2	S	200	12 μm	y	21

Tabelle 8.2: Messparameter der Ladungsmessungen

den herkömmlich gebondeten Bereich der K-Seite in 12 μm großen Schritten abfährt. Auf dieser Position werden 100 Laserpulse mit je 100 ns Pulslänge und mit 15 mA Laserstrom auf den Silizium-Wafer gefeuert. Dies ist unterhalb der Laserschwelle der Diode (ca. 60 mA) und entspricht einem Teilchensignal von ca. 3 - 4 mips. Die pedestalsubtrahierten Werte der einzelnen Auslese-Kanäle werden über diese 100 Ereignisse gemittelt und die Mittelwerte und Varianzen der 1024 Kanäle über diese 100 Ereignisse werden zur späteren Analyse (siehe Kapitel 8.3) abgespeichert.

Nach diesem Messvorgang fährt die Positionier-Vorrichtung ca. 12 μm parallel zur x -Achse der Leiter, um hier erneut 100 Ereignisse zu messen. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis der gesamte Messbereich mit neuem und alten Bondingschema auf der K-Seite der jeweiligen Leiter abgedeckt ist. Danach wird zum Vergleich die gleiche Messung in y -Richtung für die S-Seite des Detektors gemacht. Diese Messungen werden mit beiden Prototypen gemacht. Tabelle 8.2 zeigt die einzelnen Parameter der Messungen.

8.3 Analyse

Bei der Analyse der Daten wird speziell die Ladungsmessung und die Ortsbestimmung des Lasersignals in Abhängigkeit von der Position des Laserstrahls auf dem Sensor untersucht.

8.3.1 Ladungsmessung

Zur Ermittlung eines zur gesamten gemessenen Ladung Q proportionalen Wertes aus den Daten, wird auf der K-Seite für jede der 400 (460 bei Leiter 2) Positionen der Streifen n_{max} mit dem maximalen ADC Eintrag gesucht, und sein Wert $\text{ADC}(n_{max})$ mit den ADC Einträgen seiner beiden Nachbarkanäle $\text{ADC}(n_{max} - 1)$ und $\text{ADC}(n_{max} + 1)$ addiert (Gleichung 8.1).

$$Q \propto \sum_{n=1}^3 \text{ADC}(n) \quad (8.1)$$

Q Ladung

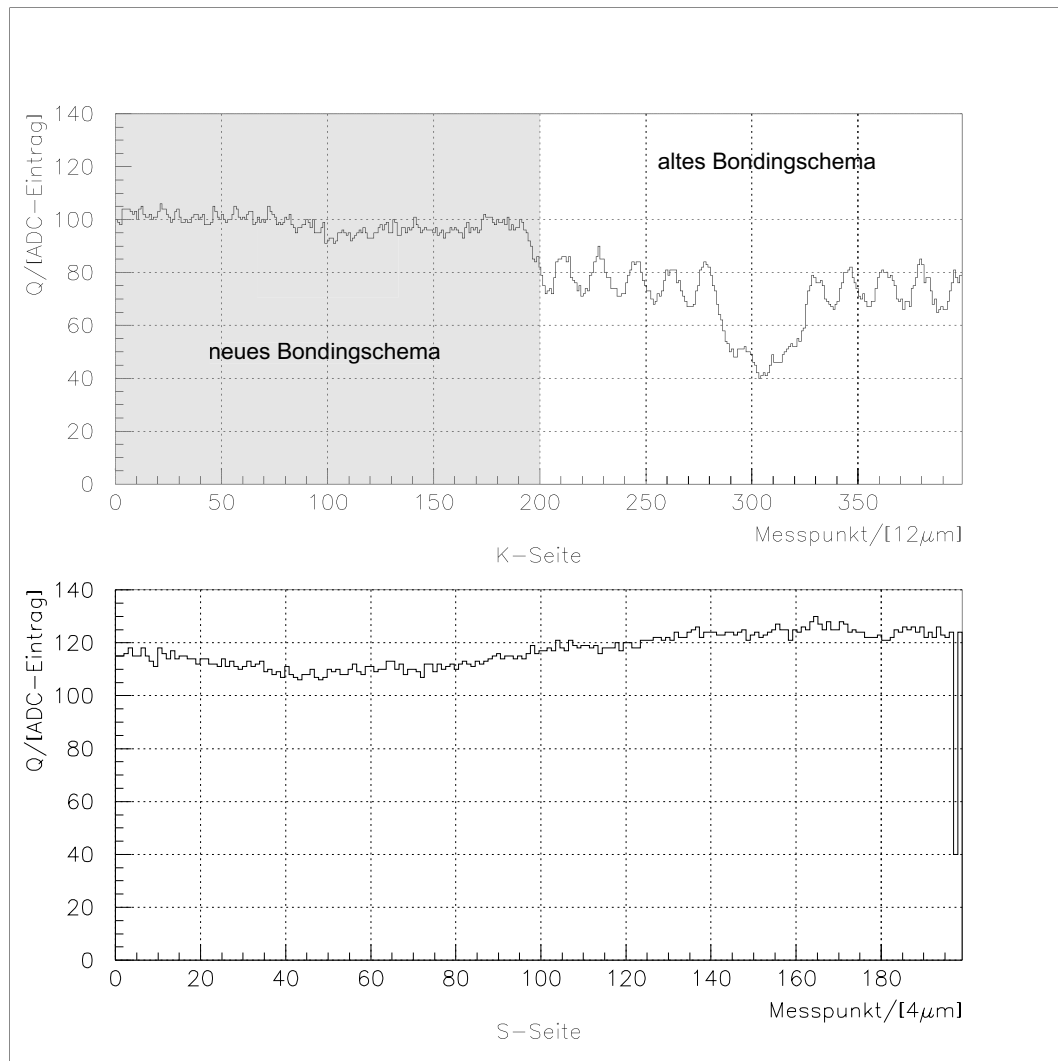


Abbildung 8.5: Leiter 1, Ladung vs. Position

n Nummer des Auslestreifens im Signal
 $ADC(n)$ ADC Eintrag des n -ten Auslestreifens

Da die von dem ca. $20 \mu\text{m}$ breiten Laser Signal erzeugten Ladungen auf maximal 2 - 3 Auslestreifen treffen, ist dieser Wert, der der Fläche unter dem Signal entspricht, proportional zur insgesamt gemessenen Ladung Q .

Das Ergebnis dieser Messung für die K-Seite von Leiter 1 für alle 400 Messpunkte zeigt Abbildung 8.5 oben.

Man erkennt in der Mitte deutlich den Übergang vom neu gebondeten Bereich (links, grau) zum normal gebondeten Bereich (rechts, weiß). Während in dem neu gebondeten Bereich die gesammelte Ladung nahezu konstant bei ca. 100 ADC Einträgen liegt, also unabhängig von der Position des mit dem Laser simulierten Teilchendurchgangs ist, zeigt sich in dem normal gebondeten Bereich eine starke Abhängigkeit der gesammelten Ladung von der Laser-

Position. Die Frequenz der auftretenden Minima und Maxima entspricht genau dem Abstand der Auslese-Streifen. D. h. die Ladungsaufnahme ist maximal, wenn der Laser sich in der Nähe eines Auslestreifens befindet, bzw. minimal, wenn er sich genau zwischen zwei Auslestreifen befindet. Mit einem Durchmesser von ca. $20 \mu\text{m}$ kann der Laserstrahl niemals ganz von einem der $12 \mu\text{m}$ breiten Aluminiumstreifen abgeschirmt werden.

Außerdem erkennt man, dass die gemessene Ladung im normal gebondeten Bereich im Mittel ca. 30% kleiner ist, als im neu gebondeten Bereich. Das neue Bondingschema verbessert also sowohl die Ortsunabhängigkeit als auch die Gesamtsumme der gemessenen Ladung um ca. 30%. Das breite Minimum im normalen Bondingbereich bei Kanal 300 lässt auf einen elektrisch schlechten Bereich schließen.

Zum Vergleich erfolgt die gleiche Messung auf der S-Seite von Leiter 1, allerdings mit nur 200 Messpunkten mit $4 \mu\text{m}$ Abstand in y -Richtung. Da der Abstand der Auslestreifen auf der S-Seite ($110 \mu\text{m}$) nur halb so groß ist, wie der auf der K-Seite ($208 \mu\text{m}$), werden auch fast doppelt so viele Streifen von dem Laser getroffen. Daher werden auf der S-Seite nicht nur 3 sondern 5 Streifen zur Ladungsmessung herangezogen. Also nicht nur die beiden direkten Nachbarkanäle ($n_{max} - 1$ und $n_{max} + 1$) des Kanals mit maximalem ADC Eintrag n_{max} , sondern auch noch die beiden nächsten ($n_{max} - 2$ und $n_{max} + 2$) (Gleichung 8.2).

$$Q \propto \sum_{n=1}^5 \text{ADC}(n) \quad (8.2)$$

Q	Ladung
n	Nummer des Auslestreifens im Signal
$\text{ADC}(n)$	ADC Eintrag des n -ten Auslestreifens

Das Ergebnis dieser Messung für die S-Seite von Leiter 1 für alle 200 Messpunkte zeigt Abbildung 8.5 unten.

Es bestätigt sich, dass auf der S-Seite kein neues Bondingschema notwendig ist. Durch die doppelte Anzahl von Auslese-Streifen pro Fläche ist die gesammelte Ladung hier über den gesamten Messbereich nahezu konstant und hoch bei ca. 100 ADC Einträgen. Der Einbruch am Ende der Messung liegt an einem toten Kanal.

Die gleichen Messungen werden dann mit dem zweiten Prototypen (siehe Tabelle 8.1) durchgeführt, wobei die Messungen auf der K-Seite bei dieser Messung nicht nur über 400, sondern über 460 Messpositionen laufen, da das neue Bondingschema bei diesem Prototypen an mehreren Stellen auf der K-Seite angewendet wurde und man daher über einen breiteren Bereich messen muss. Außerdem beträgt der Abstand zwischen den einzelnen Messpunkten der S-Seite nicht $4 \mu\text{m}$ Abstand, sondern ebenfalls mit $12 \mu\text{m}$ (siehe Tabelle 8.2).

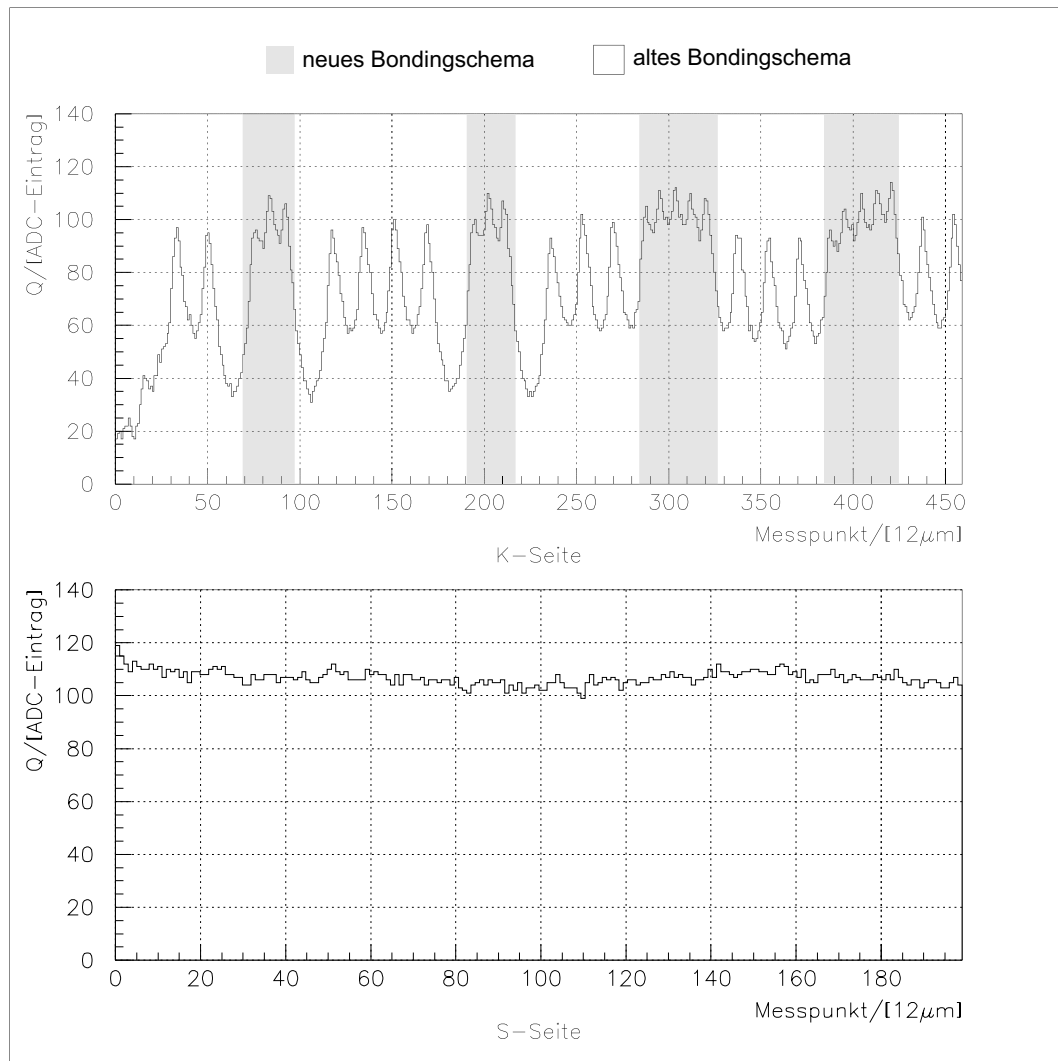


Abbildung 8.6: Leiter 2, Ladung vs. Position

Ansonsten ist das Prinzip der Ladungsmessung auf K und S-Seite dasselbe wie bei Leiter 1 (Gleichung 8.1 und 8.2). Die Ergebnisse dieser Messung für die K und die S-Seite von Leiter 2 zeigt Abbildung 8.6.

Auch bei diesem Prototypen sind die Unterschiede in der Ladungsmessung zwischen den neu gebondeten Bereichen (grau) und den normal gebondeten Bereichen (weiß) auf der K-Seite deutlich zu erkennen. Während in dem neu gebondeten Bereich die gesammelte Ladung wiederum nahezu konstant bei ca. 100 ADC Einträgen liegt, also unabhängig von der Position des mit dem Laser simulierten Teilchendurchgangs ist, zeigt sich in dem normal gebondeten Bereich eine starke Abhängigkeit der gesammelten Ladung von der Laser-Position. Die Frequenz der auftretenden Minima und Maxima entspricht auch hier wieder genau dem Abstand der Auslese-Streifen. D. h. die Ladungsaufnahme ist maximal, wenn der Laser sich in der Nähe eines Auslesestreifen befindet, bzw. minimal, wenn er sich genau zwischen zwei Auslestreifen be-

findet. Mit einem Durchmesser von ca. $20 \mu\text{m}$ kann der Laserstrahl niemals ganz von einem der $12 \mu\text{m}$ breiten Aluminiumstreifen abgeschirmt werden.

Außerdem erkennt man auch hier wieder, dass die gemessene Ladung im normal gebondeten Bereich im Mittel ca. 30% kleiner ist, als im neu gebondeten Bereich. Das neue Bondingschema verbessert also auch bei diesem Prototypen sowohl die Ortsunabhängigkeit als auch die Gesamtsumme der gemessenen Ladung um ca. 30%.

Auch für die S-Seite bestätigt sich bei diesem Prototypen wieder, dass hier kein neues Bondingschema notwendig ist. Durch die doppelte Anzahl von Auslese-Streifen pro Fläche ist die gesammelte Ladung hier über den gesamten Messbereich nahezu konstant und hoch bei ≥ 100 ADC Einträgen.

8.3.2 Ortsmessung

Zur Positionsbestimmung wird der Schwerpunkt x_{cog} der 3 (5) signalgebenden Streifen ermittelt, indem das Produkt aus Streifennummer n und den jeweiligen ADC Einträgen für die 3 (5) signalgebenden Streifen $ADC(n)$ aufsummiert wird und diese Summe dann durch die bereits in Kapitel 8.3.1 ermittelte Fläche Q (Gleichung 8.1 und 8.2) unter dem Signal dividiert wird.

$$x_{cog} = \sum_{n=1}^3 \frac{n \cdot ADC(n)}{Q} \text{ für die K-Seite, und} \quad (8.3)$$

$$x_{cog} = \sum_{n=1}^5 \frac{n \cdot ADC(n)}{Q} \text{ für die S-Seite,} \quad (8.4)$$

x_{cog}	Position des Signalschwerpunkts
n	Nummer des Auslesestreifens im Signal
$ADC(n)$	ADC Eintrag des n -ten Auslesestreifens

Dieser Schwerpunkt (cog²) des Signals liefert einen guten Referenzwert für die Position des Signals. Man könnte natürlich auch -genau wie in Kapitel 4.2.4 beschrieben- versuchen, eine Gaussfunktion an das Laserprofil anzufitten, um auf diese Weise die Position zu bestimmen. Dies wäre allerdings in diesem Fall ungünstig, da die Profile des mikrofokussierten Laserstrahls maximal 3 (5) Streifen breit sind. Man hätte also nur 3 (5) Stützpunkte für den Gaussfit zur Verfügung, der seinerseits jedoch über 3 freie Fitparameter, bzw. in der in Kapitel 4.2.4 beschriebenen Form mit einem notwendigen Offset, sogar über 4 freie Fitparameter verfügt (Gleichung 4.1). Somit hätte man ungefähr genau so viele Stützpunkte wie Fitparameter zur Verfügung, was einen Fit unsinnig macht.

²center of gravity

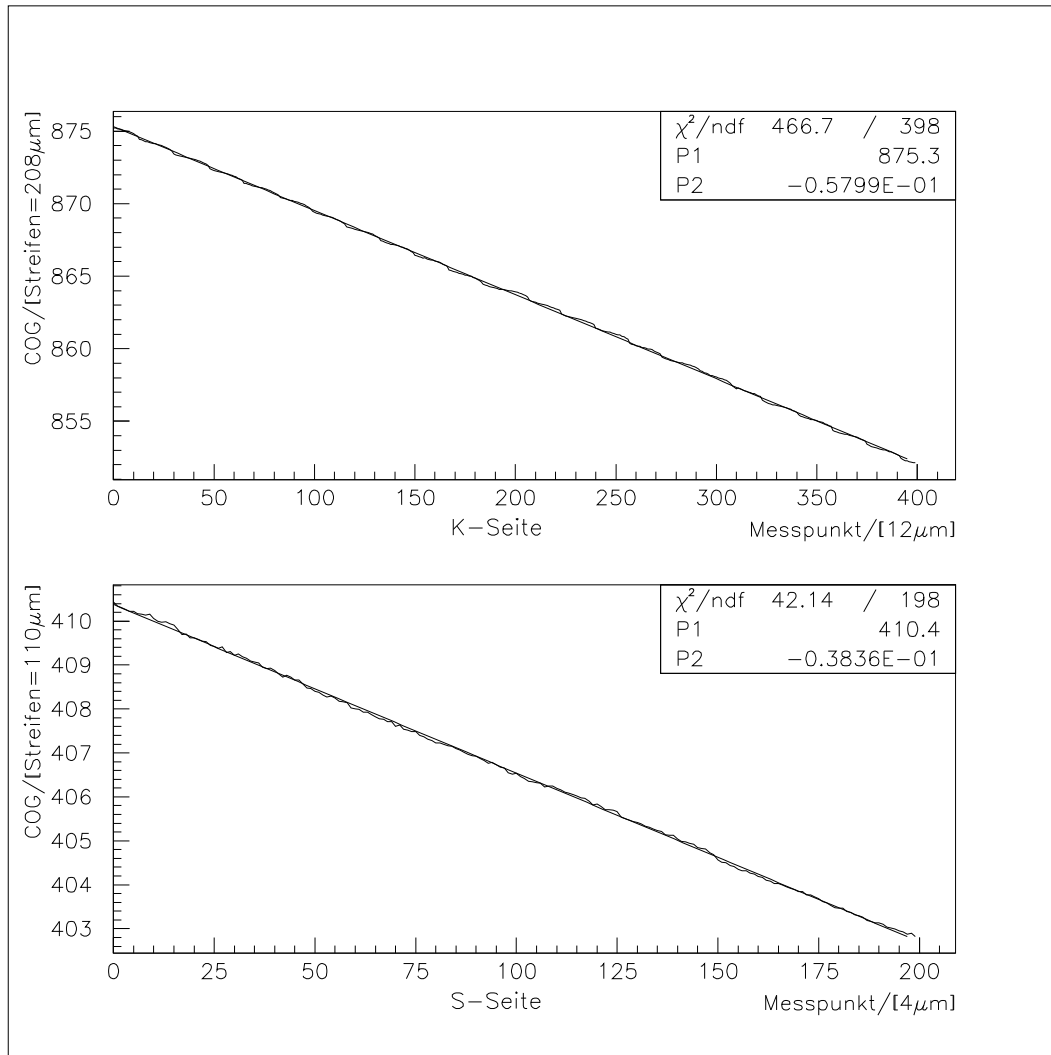


Abbildung 8.7: Leiter 1, gemessener Signalschwerpunkt (cog) vs. Position

Die auf ca. 1 mm Durchmesser fokussierten Laserprofile des TAS treffen dagegen bis zu 15 Auslestreifen. Von daher hat man in diesem Fall genügend Stützpunkte für den 4 Parameter Fit einer Gaussfunktion mit einem Offset. Die in den beiden Gleichungen 8.3 und 8.4 beschriebenen Schwerpunktberechnungen des Laserprofils reichen im Fall des mikrofokussierten Laserstrahls vollkommen aus, zumal diese Methode auch zur Positionsbestimmung der Teilchensignale bei AMS benutzt wird.

In Abbildung 8.7 sind die auf diese Art ermittelten Positionswerte für die K und S-Seite der Leiter 1 aufgetragen und in Abbildung 8.8 für die Leiter 2.

Man erkennt eine gute Linearität in der Abhängigkeit des ermittelten Schwerpunktes von der Position des Lasers über den gesamten Bereich. Die lineare Regression ergibt folgende Geradengleichungen:

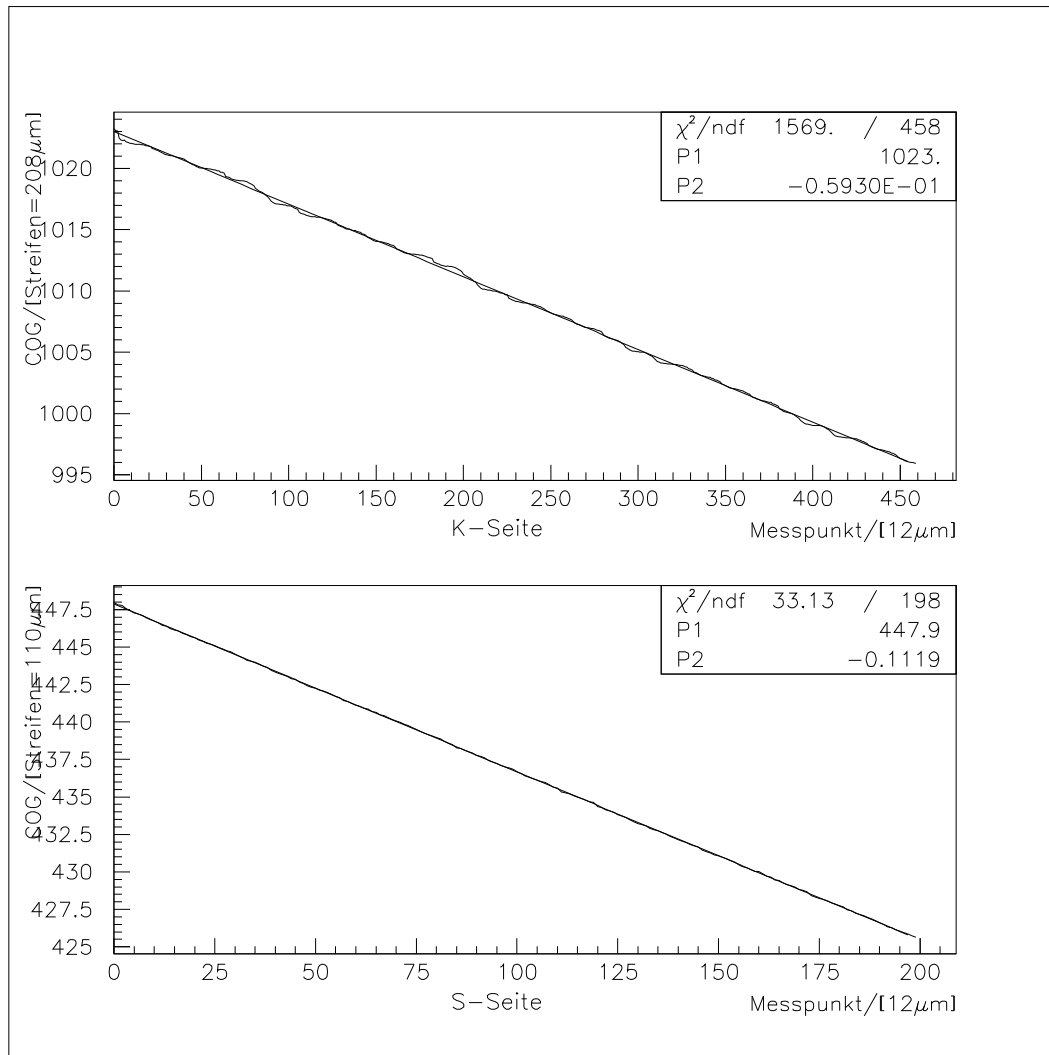


Abbildung 8.8: Leiter 2, gemessener Signalschwerpunkt (cog) vs. Position

$$y(x) = -0,05799 \cdot x + 875,3 \text{ für die K-Seite von Leiter 1} \quad (8.5)$$

$$y(x) = -0,03836 \cdot x + 410,4 \text{ für die S-Seite von Leiter 1} \quad (8.6)$$

$$y(x) = -0,05930 \cdot x + 1023 \text{ für die K-Seite von Leiter 2} \quad (8.7)$$

$$y(x) = -0,1119 \cdot x + 447,9 \text{ für die S-Seite von Leiter 2} \quad (8.8)$$

Die um $1/3$ kleinere Steigung bei der S-Seite von Leiter 1 gegenüber der S-Seite von Leiter 2 korrespondiert mit der ebenfalls um $1/3$ kleineren Schrittweite zwischen den 200 Messpunkten von $4 \mu\text{m}$ für Leiter 1 gegenüber $12 \mu\text{m}$ für Leiter 2, während die Steigungen für die K-Seiten der beiden Leitern im Rahmen der Positionierungsgenauigkeit der Leitern unter der Positioniereinheit gut übereinstimmen. Auch das Verhältnis der Steigungen zwischen K und S-Seite entspricht im Rahmen dieser Fehler dem Verhältnis der entsprechenden Streifenabstände $208 \mu\text{m}/110 \mu\text{m}$.

Die Abweichungen der ermittelten Schwerpunkte von diesen Regressionsgeraden ist in der Abbildung 8.9 für die K und S-Seite von Leiter 1 und in der Abbildung 8.10 für die K und S-Seite von Leiter 2 zu sehen.

In diesen Diagrammen erkennt man auf den K-Seiten der beiden Leitern deutlich das Streifenmuster der Auslestreifen. Die Übergänge zwischen den neu gebondeten (grau) und den normal gebondeten Bereichen (weiß) sind an den hiermit verbundenen Phasensprüngen zu erkennen.

Bei Leiter 1 oszilliert der Schwerpunkt des Signals auf der K-Seite sowohl im neu gebondeten Bereich als auch im herkömmlich gebondeten Bereich mit einer maximalen Amplitude von ca. $0,1$ Streifen ($\approx 20 \mu\text{m}$) um die Regressionsgerade.

Leiter 2 zeigt auf der K-Seite im Großen und Ganzen ein ähnliches Verhalten wie Leiter 1. Auch hier ist eine Oszillation des Signalschwerpunkts mit einer Amplitude von ca. $0,1$ Streifen ($\approx 20 \mu\text{m}$) um die Regressionsgerade zu beobachten. Allerdings zeigt die Leiter 2 besonders an den Übergängen zwischen den zwei verschiedenen Bonding Bereichen starke Sprünge von bis zu $0,3$ Streifen ($\approx 60 \mu\text{m}$). Dies liegt vor allem daran, dass die Übergänge zwischen den beiden verschiedenen Bonding Bereichen bei Leiter 2 durch Auslassen eines Auslestreifens realisiert wurden. Die hierdurch entstehenden Sprünge in der Ortsmessung machen sich natürlich gerade an den Übergängen zwischen den beiden Bonding Bereichen bemerkbar.

Die gleichen Messungen für die S-Seiten der beiden Leitern zeigen wieder deutlich den Vorteil der doppelt so engen Auslese-Streifen auf der S-Seite. Die maximale Abweichung des Schwerpunktes des Signals von der Regressionsgeraden ist weniger als $0,1$ Streifenbreiten ($\approx 10 \mu\text{m}$) unabhängig von der Position des Lasers. Eine Verbesserung des Bondingschemas ist also auch aus der Sicht der Ortsmessung für die S-Seite des Detektors nicht erforderlich.

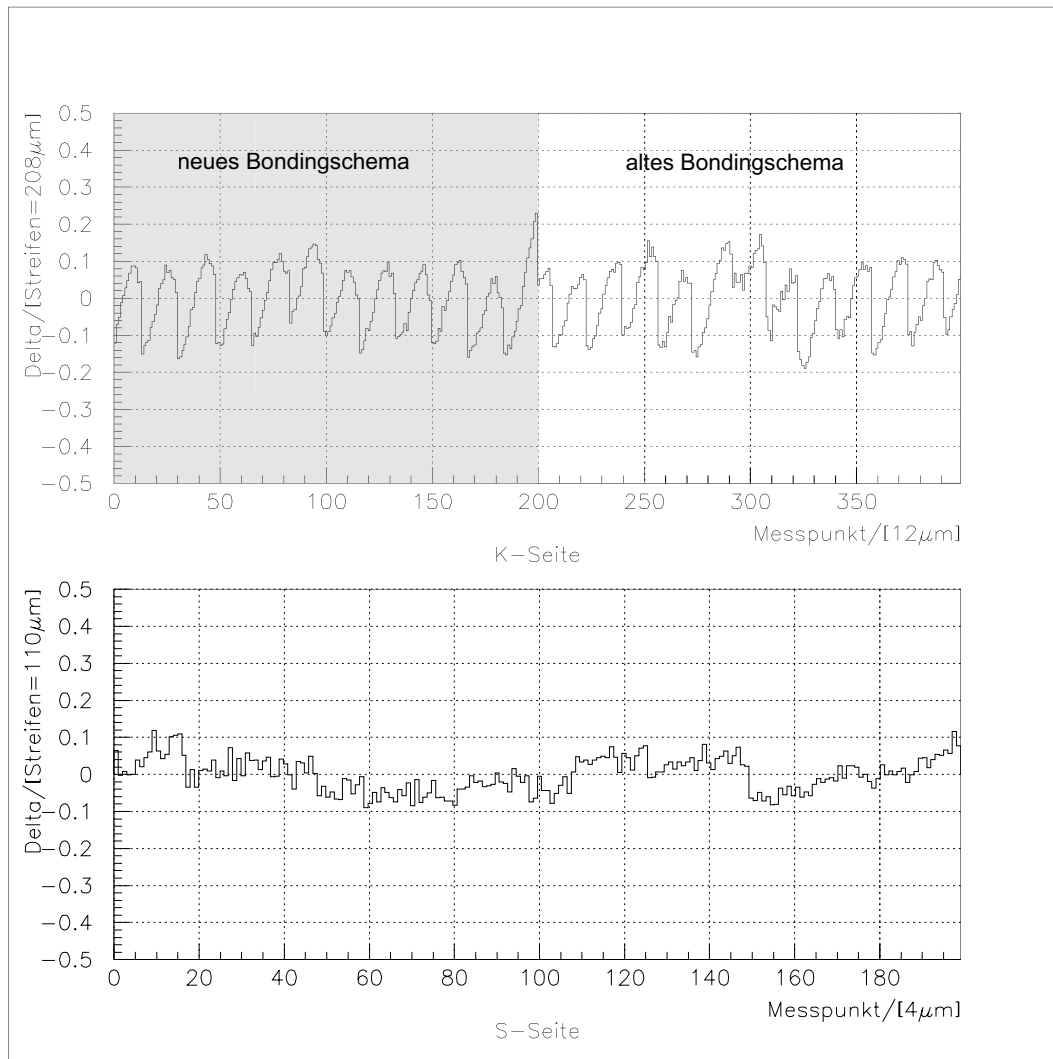


Abbildung 8.9: Leiter 1, Abstand des Signalschwerpunkts (cog) von der Regressionsgeraden vs. Position

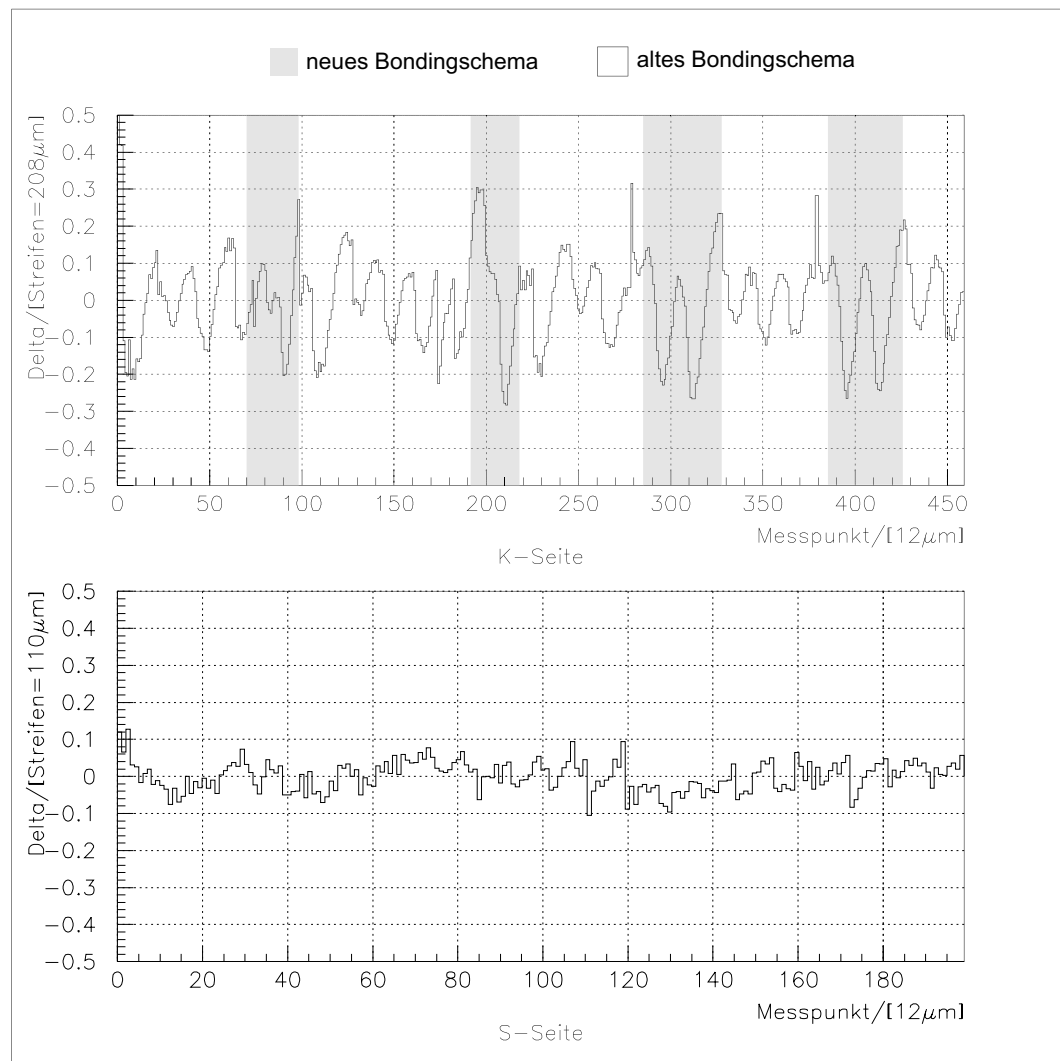


Abbildung 8.10: Leiter 2, Abstand des Signalschwerpunkts (cog) von der Regressionsgeraden vs. Position

8.4 Zusammenfassung der Ladungsmessungen

Es zeigt sich somit, dass schon das bloße Kurzschließen eines Floating-Streifens mit einem Auslese-Streifen, die Ladungsmessung auf der K-Seite des Detektors um bis zu 30% verbessert, ohne dabei die Positionsmessung zu stören.

Aufgrund der positiven Ergebnisse dieser Untersuchungen werden die K-Seiten der Silizium Wafer für AMS-02 komplett mit dem neuen Bondingschema (Abbildung 8.2 unten) ausgestattet.

Kapitel 9

Zusammenfassung

Abschließend lässt sich im Rahmen dieser Arbeit folgendes Fazit ziehen:

- Mit Hilfe von 4 Infrarot ($\lambda = 1083 \text{ nm}$) Laserstrahlen wurde ein leichtes und weltraumtaugliches Positions Kontroll System (TAS) für den Silizium Spur Detektor des AMS Detektors entwickelt, das in der Lage ist, ohne zusätzliche Nachweisstruktur und ohne zusätzliche Auslese Elektronik, die Positionen der Silizium Sensoren mit einer Genauigkeit von besser als $3 \mu\text{m}$ zu bestimmen. Das TAS kam während des zehntägigen STS-91 Weltraumflugs von AMS-01 an Bord der *Discovery* erfolgreich zum Einsatz.
- Während der ruhigen Phase des STS-91 Weltraumflugs zeigen die TAS Daten, dass der Silizium Tracker von AMS-01 im Rahmen von $\leq 10 \mu\text{m}$ stabil ist. Während der unruhigen Phase gibt es dagegen Bewegungen von bis zu $40 \mu\text{m}$, die nicht alleine durch eine Bewegung des Laser Systems erklärt werden können. Es existiert eine starke Korrelation zwischen der Temperatur von AMS-01 und den gemessenen Bewegungen.
- Die Ergebnisse des TAS wurden durch das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren des Cosmic Alignment zum einem bestätigt und zum anderen ergänzt. Mit Hilfe der Ergebnisse aus den beiden Positions Kontroll Verfahren, TAS und Cosmic Alignment, konnte die Impulsauflösung des AMS-01 Detektors um 20% verbessert werden. Beide Verfahren -TAS und Cosmic Alignment zusammengenommen- bieten die für ein satellitengebundenes Experiment wie AMS notwendige Redundanz, wobei das Laser System die schnellere Information liefert.
- Mit Hilfe des TAS Laser Systems und einer Mikrofokus Optik wurde das Bondingschema der K-Seite der Silizium Detektoren von AMS-01 optimiert. Es konnte gezeigt werden, dass das bloße Kurzschließen eines Floating-Streifens mit einem Auslese-Streifen, die Ladungsmessung auf der K-Seite des Detektors um bis zu 30% verbessert, ohne dabei die Positionsmessung zu verschlechtern.

Kapitel 10

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wäre nicht ohne die tatkräftige Unterstützung zahlreicher Personen möglich gewesen, denen ich an dieser Stelle meinen ausdrücklichen Dank aussprechen möchte.

Danken möchte ich insbesondere Herrn Prof. Dr. Klaus Lübelmeyer dafür, dass er mir die Arbeit an seinem Lehrstuhl ermöglichte sowie Herrn Prof. Dr. Stefan Schael für die äußerst unproblematische Weiterführung meiner Arbeit über die Eremitierung von Herrn Prof. Dr. Klaus Lübelmeyer hinaus.

Weiterhin gilt mein besonderer Dank natürlich meinem Betreuer Herrn Prof. Dr. Wolfgang Wallraff, der mich während der vergangenen dreieinhalb Jahre dieser Doktorarbeit immer kompetent und freundlich beriet, sowie allen anderen Mitarbeitern des I. Physikalischen Instituts für Ihre freundliche Unterstützung und das angenehme Arbeitsklima. Stellvertretend möchte ich hier Dr. Frank Raupach, Dipl.-Phys. Martin Weisgerber, Dipl.-Phys. Roland Wagner, sowie alle Mitarbeiter der mechanischen und elektrischen Werkstatt nennen.

Ein weiterer Dank gilt den zahlreichen Mitarbeitern der AMS Kollaboration, die mir während meiner Aufenthalte in Zürich, Florida, Houston und Genf in vielen technischen Fragen hilfreich zu Seite standen. Wiederum nur stellvertretend für alle anderen seien hier Giovanni Ambrosi, Bill Burger, Vitaly Choutko und Georg Schwing genannt. Außerdem möchte ich mich bei der Firma LemnaTec für Ihre Geduld und Unterstützung bis zum Abschluss meiner Promotion bedanken sowie bei den Bewohnern der CERN-Farm, insbesondere bei Robert Becker und Dirk Meyer, für Ihre Gastfreundschaft, während meiner zahlreichen Aufenthalte in Genf, die mit dieser Arbeit verbunden waren.

Mein ganz besonderer Dank geht natürlich an meine Familie und Freunde, insbesondere an meine beiden Eltern Anni und Claus Vandenhirtz, ohne die diese Arbeit gar nicht möglich gewesen wäre.



Abbildung 10.1: Die STS-91 Besatzung vor dem Space Shuttle *Discovery* auf der Startplattform 39-A (von links nach rechts: D. Gorie, F. Chang-Diaz, W. B. Lawrence, J. Kavandi, Ch. Precourt, V. Ryumin) NASA, KSC 5.5.1998 [123]

Abbildungsverzeichnis

1.1	Das prinzipielle Konzept von AMS	10
2.1	Die Spiralgalaxie NGC1365 [64]	13
2.2	Die Expansion des Universums seit dem Urknall (Big Bang) . .	16
2.3	Fluchtgeschwindigkeiten einiger Galaxien in Abhängigkeit von ihrer Entfernung zur Erde [126]	17
2.4	Planck-Verteilung der 2,7 K Hintergrundstrahlung (COBE- Daten, NASA) [54]	18
2.5	Fluktuationen in der 2,7 K Hintergrundstrahlung [24]	19
2.6	Gegenwärtige Grenzen zur Suche nach kosmischer Antimaterie .	23
2.7	Rotationsgeschwindigkeiten für sieben Spiralgalaxien [63]	26
2.8	Das Spektrum der kosmischen Strahlung sowie der Messbereich und die Raten von AMS und gängigen Experimenten	28
3.1	Der AMS Detektor auf der internationalen Raumstation ISS [123]	29
3.2	Der AMS-01 Detektor [122]	32
3.3	Zeitauflösung der Flugzeitähler von AMS-01	33
3.4	Der AMS-01 Permanent Magnet	34
3.5	Die Magnetisierung und das B-Feld des AMS-01 Magneten . . .	34
3.6	Eine Scheibe des AMS-01 Magneten beim mechanischen Bela- stungstest für die Weltraumtauglichkeit	35
3.7	Eine AMS-01 Leiter mit 12 Silizium Wafern	36
3.8	Ebene 2 des AMS-01 Silizium Spurdetektors bei der Montage der Leitern in Genf	37
3.9	Die 6 AMS-01 Ebenen aus CFC bei der Montage in Zürich . . .	37
3.10	Das Prinzip der Silizium Wafer bei AMS-01	38
3.11	Layout der Wafer beim AMS-01 Silizium-Detektor	38
3.12	Impulsauflösung des Silizium Spurdetektors von AMS-01	39

3.13	Der AMS-02 Detektor [122]	41
4.1	Die prinzipielle Funktionsweise des TAS	46
4.2	Der Aufbau der TAS-Box	47
4.3	Der Beamportholder des TAS	48
4.4	Das Kaptonkabel ohne (oben) und mit Löchern (unten) für das TAS (siehe auch Abbildung 3.7)	50
4.5	Der Aufbau des TAS inklusive Elektronik TASE	51
4.6	Ein übersteuertes Laserprofil	53
4.7	Die Pedestal Subtraktion der Lasersignale (oben: Laser Rohsignal (A), Mitte: mittlerer Pedestal (B), unten Pedestal subtrahiertes Lasersignal (C))	55
4.8	Gaussfit an ein TAS Laserprofil	56
4.9	Die Höhenlinien von 480 aufeinander folgenden Laserpulsen und das daraus gewonnene mittlere Profil	57
4.10	Das Transmissionsspektrum von Silizium	59
4.11	Die Antireflexschicht der Alignmentsensoren	59
4.12	Die Reflektivität der TAS Silizium Sensoren in Abhängigkeit von der Dicke d der Antireflexschicht (SiN_x)	60
4.13	Elementarzelle des Streifenmusters bei AMS-01 Silizium-Detektoren	61
4.14	Der Messaufbau zur Bestimmung der optischen Eigenschaften der Alignment Sensoren	62
4.15	Das Profil des Laserstrahls vor und nach Durchgang durch einen Silizium Sensor	64
4.16	Verteilung der Abstände des Schwerpunktes beim Durchgang des Laserstrahls durch einen Silizium Sensor	65
4.17	Der Vibrationstest des TAS am Max Planck Institut für extraterrestrische Forschung in Garching	66
4.18	Das Massenspektrum des Thermo Vakuum Tests des TAS am Max Planck Institut für extraterrestrische Forschung in Garching	67
4.19	Der Messaufbau zur Bestimmung der Ortsauflösung des TAS	68
4.20	Die Abweichung dx (oben) und dy (unten) des aus 300 Ereignissen ermittelten Laserstrahl Schwerpunktes vom Sollwert für 112 Verschiebungen zwischen $2,5 \mu\text{m}$ und $200 \mu\text{m}$	69
4.21	Der AMS-01 Detektor beim Zusammenbau in der ETH Zürich	71

4.22	150 mA, 4 μ s Lasersignale U1O1 auf Ebene 1	73
5.1	Der AMS-01 Detektor in der USS am <i>Kennedy Space Center</i> KSC in Florida/USA	76
5.2	Start der Raumfähre <i>Discovery</i> zur Mission STS-91 mit AMS- 01 an Bord am 2. Juni 1998 vom Launch Pad 39-A des <i>Kennedy</i> <i>Space Centers</i> KSC [123]	77
5.3	AMS-01 an Bord der Raumfähre <i>Discovery</i> von der Raumstati- on MIR aus fotografiert [123]	78
5.4	Position des Laserstrahls U1 in x -Richtung in den Ebenen 4, 5 und 6 während des 9 tägigen Weltraumflugs STS-91	79
5.5	Position des Laserstrahls U1 in y -Richtung in den Ebenen 4, 5 und 6 während des 9 tägigen Weltraumflugs STS-91	80
5.6	Position des Laserstrahls O1 in x -Richtung in den Ebenen 4, 5 und 6 während des 9 tägigen Weltraumflugs STS-91	81
5.7	Position des Laserstrahls O1 in y -Richtung in den Ebenen 4, 5 und 6 während des 9 tägigen Weltraumflugs STS-91	82
5.8	Mittlerer Temperaturverlauf des Silizium Spurdetektors während des 9 tägigen Weltraumflugs STS-91	83
6.1	Auslenkung der TAS Laserstrahlen bei mechanischer Belastung der Ebene 6	87
6.2	Teststrahl Spektrum am GSI in Darmstadt	88
6.3	Position des Laserstrahls O2 in x -Richtung in den Ebenen 4, 5 und 6 am GSI	90
6.4	Position des Laserstrahls O2 in y -Richtung in den Ebenen 4, 5 und 6 am GSI	91
6.5	Teststrahl Spektrum am CERN in Genf/CH	92
6.6	Auslenkung der TAS Laserstrahlen bei Drehung des AMS-01 Detektors um 180° um die x -Achse	93
7.1	Durchgang eines geladenen Teilchens durch das homogene Ma- gnetfeld im Silizium Spurdetektor von AMS-01	99
7.2	Die Sagitta s eines Kreisbahnabschnitts	100
7.3	Das Eventdisplay eines Antiprotons mit 800 MeV	103
7.4	Die Rigiditätsverteilung der bei STS-91 gesammelten Ereignisse für $Z > 1$ (sub sample)	104

7.5	Die Rigiditätsverteilung der bei STS-91 gesammelten Ereignisse für $Z = 2$ (AMS-01 volles Datensample mit Spur-Qualitäts-Schnitten)	105
7.6	Die obere Grenze für das Verhältnis $\bar{H}e/He$ von AMS verglichen mit bisherigen Experimenten	106
7.7	Die Massenverteilung der bei STS-91 gesammelten Ereignisse [107]	107
7.8	Zeitverteilung der ca. 90.000 Cosmic-Alignment-Ereignisse über den gesamten Zeitraum der STS-91 Mission	108
7.9	Rigiditätsverteilung der ca. 90.000 Cosmic-Alignment-Ereignisse	109
7.10	Trefferkoordinaten der ca. 90.000 Cosmic-Alignment-Ereignisse in den 6 Ebenen des AMS-01 Silizium-Spurdetektors (x - und y -Koordinaten in cm)	110
7.11	Bestimmung der Abstände dx und dy der Fitspur vom „wahren“Treffer in einer der sechs Tracker Ebenen, wobei der Treffer in der jeweiligen Ebene beim Fit nicht mit berücksichtigt wird .	111
7.12	Der zeitliche Verlauf der Positionsmessungen des Cosmic Alignment für die x -Koordinate der sechs Tracker Ebenen aus den STS-91 Flugdaten	112
7.13	Die Ortsauflösung der x -Koordinate der 6 Ebenen des Silizium Spurdetektors von AMS-01 (siehe auch Tabelle 7.3)	112
7.14	Der zeitliche Verlauf der Positionsmessungen des Cosmic Alignment für die y -Koordinate der sechs Tracker Ebenen aus den STS-91 Flugdaten	113
7.15	Der zeitliche Verlauf der langsamen Bewegung des Cosmic Alignment für die x -Koordinate der sechs Tracker Ebenen aus den STS-91 Flugdaten	114
7.16	Der zeitliche Verlauf der langsamen Bewegung des Cosmic Alignment für die y -Koordinate der sechs Tracker Ebenen aus den STS-91 Flugdaten	115
7.17	Die mit Cosmic Alignment und Laser Alignment gemessenen Positionsverläufe für x und y auf Ebene 5 während des STS-91 Weltraumflugs	116
7.18	Künstliche Verschiebung der Ebene 4 vom dritten bis zum fünften Tag der STS-91 Mission, zur Überprüfung des entsprechenden Signals im Cosmic Alignment (getrennt für x und y) . .	117
7.19	Der mit dem Cosmic Alignment gemessene Positionsverlauf in den sechs Tracker Ebenen bei einer künstlichen Verschiebung der Ebene 4 in x -Richtung	118

7.20	Der mit dem Cosmic Alignment gemessene Positionsverlauf in den sechs Tracker Ebenen bei einer künstlichen Verschiebung der Ebene 4 in y -Richtung	119
7.21	Die Ortsauflösung der y -Koordinate der 6 Ebenen des Silizium Spurdetektors von AMS-01 ohne (oben) und mit (unten) Cosmic Alignment Korrektur (siehe auch Tabelle 7.3)	122
7.22	Der zeitliche Verlauf der Positionsmessungen des Cosmic Alignment für die y -Koordinate der Ebene 1 während der Erdumläufe 30 bis 60 des STS-91 Weltraumflugs	123
7.23	Die Temperatur Verläufe der 16 Magnet Temperatursensoren am 9. Juni 1998 (Tag 160) = 7. Tag der Mission	126
7.24	Der zeitliche Verlauf der Positionsmessungen des Cosmic Alignment für die y -Koordinate der 6 Ebenen des Silizium Spur Detektors während der 146 Erdumläufe des STS-91 Weltraumflugs gefaltet auf einen Standardorbit (91,85 Minuten)	129
7.25	Die Zusammenfassung der AMS-01 STS-91 Alignment Messungen	131
8.1	Das Prinzip eines Silizium Streifen Detektors	133
8.2	Das herkömmliche Bondingschema von AMS-01 (oben) und das neue Bondingschema (unten)	135
8.3	Vergleich eines Teilchensignals mit dem TAS Lasersignal im Silizium Detektor	136
8.4	Der Messaufbau zur Bestimmung der Ladungsmessungseffizienz des neuen Bondingschemas	137
8.5	Leiter 1, Ladung vs. Position	139
8.6	Leiter 2, Ladung vs. Position	141
8.7	Leiter 1, gemessener Signalschwerpunkt (cog) vs. Position	143
8.8	Leiter 2, gemessener Signalschwerpunkt (cog) vs. Position	144
8.9	Leiter 1, Abstand des Signalschwerpunkts (cog) von der Regressionsgeraden vs. Position	146
8.10	Leiter 2, Abstand des Signalschwerpunkts (cog) von der Regressionsgeraden vs. Position	147
10.1	Die STS-91 Besatzung vor dem Space Shuttle <i>Discovery</i> auf der Startplattform 39-A (von links nach rechts: D. Gorie, F. Chang-Diaz, W. B. Lawrence, J. Kavandi, Ch. Precourt, V. Ryumin) NASA, KSC 5.5.1998 [123]	152

Tabellenverzeichnis

3.1	Die Mitgliedsorganisationen der AMS Kollaboration	31
3.2	Konfiguration des Silizium Spur Detektors bei AMS-01	38
7.1	Sagittae s für einige typische Teilchenimpulse p bei AMS-01 . .	101
7.2	Die mit der Methode des Cosmic Alignment mittleren gemessenen Positionen der Ebene 4 im Vergleich zu den entsprechenden künstlichen Verschiebungen der Ebene 4	118
7.3	Die Breiten σ_x und σ_y der Verteilungen in den sechs Ebenen des Silizium Spur Detektors. Für σ_y mit und ohne Cosmic Alignment Korrektur	121
8.1	Die beiden Prototypen der AMS-01 Leiter	134
8.2	Messparameter der Ladungsmessungen	138

Literaturverzeichnis

- [1] I. APPENZELLER, *Kosmologie und Teilchenphysik*, „Spektrum der Wissenschaft“ Verlagsgesellschaft, ISBN 3-89330-751-6
- [2] R. N. CAHN & G. GOLDBABER, *The experimental foundations of particle physics*, Cambridge University Press (1991) ISBN 0-521-42425-9
- [3] T. PADMANABHAN, *Cosmology and Astrophysics through Problems*, Cambridge University Press (1996)
- [4] T. PADMANABHAN, *Structure Formation in the Universe*, Cambridge University Press (1993) ISBN 0-521-42486-0
- [5] M. ROWAN-ROBINSON, *Cosmology*, 3rd ed., Clarendon Press (1996) ISBN 0-19-851885-40
- [6] D. W. SCIAMA, *Modern Cosmology and the Dark Matter Problem*, Cambridge University Press, ISBN 0-521-43848-9
- [7] P. J. PEEBLES, D. N. SCHRAMM, E. L. TURNER AND R. G. KORN, *The evolution of the universe*, Scientific American 10, 1994, p. 29
- [8] *Cosmic Beachcombers*, New Scientist, 25.12.1995, p. 56-58
- [9] J.W. CRONIN, *Nucl. Phys.* **B43**, 343-349 (1995)
- [10] J. SILK, *Cosmic Enigmas*, AIP(1994)
- [11] W. L. FREEDMAN, *Expansion rate and size of the universe*, Scientific American 11, 1993, p. 54
- [12] G. STEIGMAN, *A quick and dirty early universe/cosmology course*, Nucl. Phys. **B37C**, 61-67 (1995)
- [13] P. J. E. PEEBLES ET AL., *The case for the relativistic hot Big Bang cosmology*, Nature 352, 769-776 (1991)
- [14] A. C. ARP, F. HOYLE ET AL., *The extragalactic universe: an alternate view*, Nature 346, 807-812 (1990)

- [15] P. COLES AND G. ELLIS, *The case for an open universe*, Nature 370, 609-615 (1994)
- [16] J. ELLIS, *The very early universe and particle physics*, Les Houches (1993), CERN-TH-7083/93
- [17] P. SOKOLSKY, *Introduction to Ultrahigh Energy Cosmic Ray Physics*, Addison Wesley (1989)
- [18] AC. F. X. BARCONS, *Intergalactic Matter*, Rep. Prog. Phys. **54**, 1069 (1991)
- [19] G. STEIGMAN, *Big Bang Nucleosynthesis*, Nucl. Phys. **B37C**, 68-73 (1995)
- [20] M. GLEISER, *Baryogenesis in brief*, in: *Birth of the Universe and fundamental physics*, F. OCCHIONERO (ED.), Lecture Notes in Physics, vol. 455, 333-342, Springer (1995)
- [21] S. VAUCLAIR, *Observational constraints on primordial elements*, 4ème rencontre de Blois, June 15.-20.1992, Particle Astrophysics, éditions frontières, p.392-402
- [22] G. F. R. ELLIS, *Observations and Cosmological Models*, in: *Galaxies in the Young Universe*, H. HIPPELEIN, K. MEISENHEIMER AND H.-J. RÖSER (EDS.), Lecture Notes in Physics, vol. 463, 51-65, Springer (1995)
- [23] S. V. W. BECKWITH ET AL., *An Infrared Search for Primeval Galaxies*, in: *Galaxies in the Young Universe*, H. HIPPELEIN, K. MEISENHEIMER AND H.-J. RÖSER(EDS.), Lecture Notes in Physics, vol. 463, 283-288, Springer(1995)
- [24] B. GROSS-LEVI, *COBE measures anisotropy in cosmic microwave background radiation*, Physics Today **6**, 17-20 (1992)
- [25] A. SANDAGE, *Observational Tests of World Models*, Ann. Rev. Astr. and Astroph. **26**, 5611-630 (1988)
- [26] *Particle Physicists Take to Orbit*, Science **271**, 142-144 (1996)
- [27] H. V. KLAPDOR UND A. STAUDT, *Teilchenphysik ohne Beschleuniger*, Teubner-Verlag (1995)
- [28] A. LINDE, *Particle Physics and Inflationary Cosmology*, harwood academic (1990)
- [29] L. B. OKUN, *Leptons and Quarks*, North Holland (1984)

-
- [30] P. SILKVIE, *Sources and distributions of dark matter*, Nucl. Phys. **B43**, 90-99(1995)
- [31] J. P. OSTRIKER, *Astronomical Tests of the Cold Dark Matter Scenario*, Ann. Rec. Astr. and Astroph. **31** (1993)
- [32] M. SPIRO, *Dark Matter*, Nucl. Phys. **B43** (1995)
- [33] J. PRIMACK, *The Detection of Dark Matter*, Ann. Rev. Nucl. and Part. Sci. **38**, 751-807 (1988)
- [34] G. FOSTER, *Dark Matter Detectors*, Nucl. Phys. **B44**, 175-180 (1995)
- [35] T. J. SUMNER, *The search for non-baryonic dark matter*, Nucl. Phys. **B22B**, 165-177 (1991)
- [36] A. ALESSANDRELLO ET AL., *Underground Low Temperature Calorimeters to search Rare Events*, Nucl. Phys. **B44**, 181-185 (1995)
- [37] E. L. WRIGHT, *Dark Matter in the light of COBE*, UCLA Dark matter conference, February 1994
- [38] R. BERNABEI, *Particle Dark Matter Search with Low Activity Scintillators*, Nucl. Phys. **B43**, 161-164 (1995)
- [39] M. J. WEST, *X-rays reveal heart of darkness*, Nature 379, 401 (1996)
- [40] R. ANSARI, *Gravitational Microlensing experiments: a review*, Nucl. Phys. **B43**, 108-117 (1995)
- [41] *Probing the Galactic dark matter mass function using microlensing and direct searches*, Nucl. Phys. **B43**, 157-160 (1995)
- [42] P. JETZER, *Gravitational Microlensing by Halo Dark matter*, in: *Birth of the Universe and fundamental physics*, F. OCCHIONERO (ED.), Lecture Notes in Physics, vol. 455, 295-300, Springer (1995)
- [43] H. KATTUNEN ET AL., *Fundamental Astronomy*, Springer Verlag, ISBN 3-540-60936-9
- [44] F. COMBES ET AL., *Galaxies and Cosmology*, Springer Verlag, ISBN 3-540-58933-3
- [45] M. HARWIT, *Astrophysical concepts*, Springer Verlag, ISBN 0-387-94943-7
- [46] A. DEKEL, J. P. OSTRIKER, *Formation of structure in the universe*, Cambridge University Press, ISBN 0-521-58632-1

- [47] L. M. LEDERMANN UND D. N. SCHRAMM, *Vom Quark zum Kosmos*, Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft, Heidelberg (1990)
- [48] M. RIORDAN UND D. N. SCHRAMM, *Die Schatten der Schöpfung*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (1993)
- [49] G. BÖRNER, J. EHLERS UND H. MEIER (Hg.), *Die Kosmologie der Gegenwart*, R. Piper GmbH & Co. KG, München (1993)
- [50] S. WEINBERG, *Die ersten drei Minuten*, dtv, München (1982)
- [51] H. SCHOPPER, *Materie und Antimaterie*, R. Piper GmbH & Co. KG, München (1989)
- [52] R. K. ADAIR, *The Great Design*, Oxford University Press (1987)
- [53] N. S. HETHERINGTON, *Encyclopedia of Cosmology*, Garland Publishing Inc., New York (1993)
- [54] G. BÖRNER, *The Early Universe*, Springer-Verlag, Berlin (1993)
- [55] H. GOENNER, *Einführung in die Kosmologie*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (1994) ISBN 3-86025-332-8
- [56] M. S. LONGAIR, *High energy astrophysics*, 2nd ed., Cambridge University Press
- [57] J. KRAUTER, E. SEDLMAYR, K. SCHAIFERS UND G. TRAVING, *Meyers Handbuch Weltall*, Meyers Lexikonverlag (1994)
- [58] R. L. GOLDEN ET AL., *Phys. Rev. Lett.* **43**, 1196 (1979)
- [59] T. K. GAISSER, *Cosmic Rays and Particle Physics*, Cambridge University Press (1992)
- [60] S. C. C. TING ED., *AMS Technical Proposal*, MIT-LNS, März 1995
- [61] G. STEIGMANN, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **14**, 339 (1976)
- [62] KARTUNNEN, KRÖGER, OJA, POUTANEN, DONNER (Hrsg.) *Astronomie, Eine Einführung*, Springer Verlag (1990)
- [63] V. C. RUBIN ET AL., *Astrophys. J. (Lett.)* **225**, L107 (1978)
- [64] Aufnahme des Hubble Space Telescope, Wide Field Planetary Camera 2

- [65] hep-ex/9806014 (<http://www.lanl.gov>), oder http://www.phys.washington.edu/superk/sk_release.html (5.6.1998), Veröffentlichung während der „Neutrino’98“-Konferenz
- [66] R. HAGEDORN, *Cargese Lectures in Physics*, **6**, 643 (1973)
- [67] H. R. QUINN & M. S. WITHERELL, *The Asymmetry between Matter and Antimatter*, Scientific American, Oktober 1998
- [68] „KAONS AT THE TEVATRON - GROUP“, *Establishing Direct CP Violation* (24.02.1999)
- [69] J. D. JACKSON, *Classical Electrodynamics*, 2nd ed., (Wiley & Sons)
- [70] S. FOPP, *Untersuchungen zur Entwicklung eines Übergangsstrahlungs-Detektors für das AMS-Experiment*, Diplomarbeit in Physik, I. Physikalisches Institut der RWTH-Aachen (1999)
- [71] W. WALLRAFF, *Cosmic Antimatter Search with the Alpha Magnetic Spectrometer*, I. Physikalisches Institut der RWTH-Aachen (1998)
- [72] W. WALLRAFF, *The Antimatter Spectrometer for high sensitivity searches of antinuclei in space*, I. Physikalisches Institut der RWTH-Aachen (1998)
- [73] W. R. LEO, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer, (1994) 2. Auflage
- [74] B. BURGER ET AL., Université de Genève, *an Nucl. Inst. and Meth.*, eingereicht
- [75] R. BATTISTON, *The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS): search for antimatter and dark matter on the International Space Station*, hep-ex/9708039 (27. August 1997)
- [76] J. WILSON, *Optoelectronics, an introduction*, 2nd ed. Prentice Hall international series in optoelectronics (1989)
- [77] R. TURCHETTA, *Spatial resolution of silicon microstrip detectors*, *Nucl. Inst. and Meth. A* 335, **44**, (1993)
- [78] W. WALLRAFF, *private Mitteilung*, I. Physikalisches Institut der RWTH-Aachen
- [79] F. RAUPACH, *private Mitteilung*, I. Physikalisches Institut der RWTH-Aachen

- [80] W. H. PRESS ET AL., *Numerical Recipes in Fortran*, Cambridge University Press, 2nd ed. (1992)
- [81] D. BLANCHARD ET AL., (NASA Johnson Space Center Study Team and AMS Collaboration), „*Antimatter Spectrometer in Space - Study of Feasibility on International Space Station Alpha and Space Shuttle: Final Report*“, 26. August 1994
- [82] E. W. KOLB AND M. S. TURNER, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **33**, 645 (1983)
- [83] P. J. E. PEEBLES, *Principles of Physical Cosmology*, Princeton University Press, Princeton, N. J. (1993) ISBN 0-691-01933-9
- [84] A. D. SAKHAROV, *JETP Lett.* **5**, 24 (1967)
- [85] E. W. KOLB AND M. S. TURNER, *The Early Universe* Addison-Wesley, New York (1990)
- [86] A. D. DOLGOV, *Phys. Rep.* **222**, 309 (1992)
- [87] A. G. COHEN, D. B. KAPLAN AND A. E. NELSON, *Ann. Rev. Nucl. Part. Phys.* **43**, 27 (1993)
- [88] D. E. DORFMAN, J. EADES, L. M. LEDERMANN, W. LEE AND S. C. C. TING, *Phys. Rev. Lett.* **1**, 1003 (1965)
- [89] J. A. APPEL, M. H. BOURQUIN, I. GAINES, L. M. LEDERMANN, H. P. PAAR, J.-P. REPELLIN, D. H. SAXON, J. K. YOH, B. C. BROWN AND J.-M. GAILLARD, *Phys. Rev. Lett.* **32**, 428 (1974)
- [90] P. A. M. DIRAC, *Proc. Roy. Soc. (London)* **A117**, 610 (1928)
- [91] AMS-COLLABORATION, contributed papers to the 24th International Cosmic Ray Conference, Roma (1995)
- [92] R. J. PROTEROE, *Ap. J.* **251**, 387 (1981)
- [93] M. H. SALAMON ET AL., *Ap. J.* **349**, 78 (1990)
- [94] R. E. STREITMATTER ET AL., *Proc. 21st Inter. Cosmic Ray Conf.* **3**, 277 (1990)
- [95] D. MÜLLER AND K. K. TANG, *Proc. 21st Inter. Cosmic Ray Conf.* **3**, 249 (1990)
- [96] A. BUFFINGTON, S. M. SCHINDLER AND C. R. PENNYPACKER, *Ap. J.* **248**, 1179 (1981)

-
- [97] G. F. SMOOT, A. BUFFINGTON AND C. D. ORTH, *Phys. Rev. Lett.* **35**, 258 (1975)
- [98] S. P. AHLEN ET AL., *Nucl. Instr. and Meth.* **A350**, 351 (1994)
- [99] G. JUNGMAN AND M. KAMIONKOWSKI, *Phys. Rev.* **D49**, 2316 (1994)
- [100] J. ELLIS ET AL., *Phys. Lett.* **B214**, 403 (1988)
- [101] R. RUDAZ AND F. W. STECKER, *Ap. J.* **325**, 16 (1988)
- [102] W. R. WEBBER ET AL., *Ap. J.* **380**, 230 (1991)
- [103] J. J. BEATTY ET AL., *Ap. J.* **413**, 268 (1993)
- [104] R. SILBERBERG AND M. M. SHAPIRO, *Proc. 17th Intern. Cosmic Ray Conf.* **3**, 249 (1981)
- [105] S. P. AHLEN ET AL., *Ap. J.* **260**, 20 (1982)
- [106] F. W. STECKER, *NASA Tech. Memo.* **83083** (1981)
- [107] Y. GALAKTIONOV AND V. SHOUTKO, *AMS Note*, May 30, 1997
- [108] M. ACCIARI ET AL., *Nucl. Inst. and Meth.* **A351**, 300 (1994)
- [109] J. W. MITCHELL ET AL. [IMAX], *Phys. Rev. Lett.* **76**, 3057 (1996)
- [110] M. HOF ET AL. [MASS2], *Ap. J.* **467**, L33 (1996)
- [111] S. ORITO ET AL. [BESS], *Proc. 24th Intern. Cosmic Ray Conf.* **3**, 75 (1995)
- [112] R. J. PROTEROE, *Ap. J.* **313**, 391 (1982)
- [113] M. WEISGERBER, *Lagemessungen von Silizium-Detektoren mit Laserstrahlen am AMS-Experiment*, Diplomarbeit in Physik, I. Physikalisches Institut der RWTH-Aachen (1999)
- [114] G. AMBROSI, *AMS Tracker (AmsT) Web Page*, Genf 20. July 1996
- [115] W. WALLRAFF, *Cosmic Antimatter Search with the Alpha Magnetic Spectrometer*, Mitteilung, I. Physikalisches Institut der RWTH-Aachen (1999)
- [116] AMS-COLLABORATION, *Search for antihelium in cosmic rays*, *Phys. Lett.* **B461**, 387-396, 2. September 1999
- [117] AMS-COLLABORATION, *The AMS silicon tracker readout: performance results with minimum ionizing particles*, *Nucl. Inst. & Meth.* **A439**, 53-64 (2000)

- [118] *Cosmic-ray positrons: are there primary sources?*, *Astroparticle Physics* **11**, 429-435 (1999)
- [119] A. BUFFINGTON, C. D. ORTH AND G. F. SMOOT, *Measurement of primary cosmic-ray electrons and positrons from 4 to 50 GeV*, *Ap. J.* **199**, 669-679 (1975)
- [120] THE AMERICAN PHYSICAL SOCIETY, *Physical Review D, Particles and fields*, American Institute of Physics Vol. 50, No. 3, 2000
- [121] PARTICLE DATA GROUP, *Particle Physics Booklet*, Springer, 2000
- [122] R. BECKER, *AMS II Mechanical Integration Homepage*, <http://rbecker.home.cern.ch/rbecker/AMSII.html>, (2000)
- [123] *NASA picture gallery*, <http://www.nasa.gov/gallery/photo/index.html>, (1997)
- [124] A. FRIEDMANN, *Zeitschrift für Physik*, **10**, 377 (1922)
- [125] E. P. HUBBLE, *Proc. Nat. Acad. Sci.* **15**, 169 (1929)
- [126] S. HAWKING, *The edge of spacetime*, in P. DAVIS (ED.), *The new physics*, Cambridge Univ. Press, New York (1989)
- [127] A. A. PENZIAS AND R. W. WILSON, *Astrophys. J.* **142**, 419 (1965)
- [128] J. C. MATHER, *Astrophys. J.* **420**, 439 (1994)
- [129] D. N. SCHRAMM, *Nucl. Phys. B, Proc. Suppl.* **28A**, 243 (1992)
- [130] K. PRETZL, *Dark matter searches, Preprint Bern*, BUHE-94-5, Vulcano Workshop, Italy (1994)
- [131] COUTIN ET AL., *AMS note*
- [132] G. SCHWERING, *AMS note*
- [133] ANNECY, *AMS note*
- [134] K. LÜBELSMEYER, *private Mitteilung*
- [135] L3-KOLLABORATION, <http://l3www.cern.ch>

Kapitel 14

Lebenslauf

Jörg Nikolaus Josef Vandenhirtz

geboren am 28. Juni 1967 in Aachen, Deutschland
Staatsangehörigkeit: Deutsch
Familienstand: ledig, keine Kinder
zur Zeit wohnhaft: Vaalser Straße 131, D-52074 Aachen

Mutter: Anni Martha Vandenhirtz, geborene Erlinghagen
am 11. September 1942 in Aachen, Deutschland
Staatsangehörigkeit: Deutsch
Beruf: Bürokauffrau, Hausfrau

Vater: Nikolaus Joseph Maximilian Vandenhirtz
geboren am 26. Dezember 1937 in Aachen, Deutschland
Staatsangehörigkeit: Deutsch
Beruf: Elektromeister (selbständig)

Beruflicher Werdegang:	Physiker
August 1973 - Juni 1977	Grundschule Höfchensweg Aachen
August 1977 - Juni 1986	Pius-Gymnasium Aachen
Juni 1986	Abitur Pius-Gymnasium Aachen (Mathematik, Physik, Englisch, Erdkunde)
Juli 1986 - September 1986	Grundwehrdienst W-15 Sportförderkompanie Essen
Oktober 1986 - September 1987	Wehrdienst W-15 FKG-II Geilenkirchen
Oktober 1987 - März 1991	Grundstudium Physik RWTH-Aachen
April 1991	Vordiplom Physik RWTH-Aachen
Mai 1991 - Mai 1994	Hauptstudium Physik RWTH-Aachen
Juni 1994 - Mai 1996	Diplomarbeit: <i>Studien zum Bau von Driftkammern für den Myonennachweis am LHC</i> (CMS Experiment, CERN, Genf, CH)

	III. Physikalisches Institut RWTH-Aachen, Prof. Dr. S. Bethke Diplom Physik RWTH-Aachen
Juni 1996	
September 1996	Gründung (Geschäftsführer) der Firma van&sun sportmarketing
April 1997 - Dezember 2000	Dissertation: <i>Ein IR Laser Positions- Kontroll-System für das AMS Experiment</i> (NASA, Kennedy Space Center, Florida, USA)
	I. Physikalisches Institut RWTH-Aachen, Prof. Dr. K. Lübelmeyer
Mai 1998	Mitgründung (teilhabender Gesellschafter) der Firma LemnaTec GmbH
seit Juni 1998	Anstellung als Leiter der Software Abteilung der Firma LemnaTec GmbH
Januar 2001	Gründung (Geschäftsführer) der Firma ViLab
Oktober 2001	Promotion Physik RWTH-Aachen
Hobbys:	Schwimmen, Musik, Synthesizer, Ski, Reisen
1981 - 1992	durchgehende Zugehörigkeit zur 1. Bundesliga- Mannschaft des Aachener Schwimmvereins 06 e.V.
Juni 1986	Deutscher Vizemeister über 50 m Schmetterling
Juli 1987	zweifacher Vize-Militärweltmeister über 100 m Schmetterling und mit der 4 x 100 m Lagen Staffel
Sommer 1987 - 1993	Organisation und Leitung von insgesamt sieben zwei- bis dreiwöchigen Jugend-Ferienfahrten (20 - 30 Pers.) des Aachener Schwimmvereins 06 e.V. nach Frankreich, Portugal, Griechenland und Italien
November 1996	Organisation und Leitung der 1. Neptun Sprint Champions Night in Aachen
Sprachkenntnisse:	Deutsch, Englisch und Französisch in Wort und Schrift
Aachen, den 4. September 2002	
Jörg Vandenhirtz	
Diplom-Physiker	