

Design, Realisierung und Test der Steuersoftware für das primäre Target des \bar{P} ANDA-Hyperkernexperiments

Diplomarbeit

Michael Bölting
Helmholtz-Institut Mainz
Johannes Gutenberg-Universität Mainz

31. März 2017

Betreut durch Prof. Dr. J. Pochodzalla

Kurzdarstellung

Das $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Hyperkernexperiment setzt zur Erzeugung von $\Lambda\Lambda$ -Hyperkernen ein zweistufiges Target ein. Das primäre Target besteht aus einem internen Kohlenstoff-filament. Zur Vermeidung monatelanger Zwangspausen bei Bruch eines Filaments während des Experiments ist ein Magazin mit Ersatztargets vorgesehen, welches sich in einer in das Strahlrohr integrierten Vakuumkammer befindet.

Nach Vorgabe der Verantwortlichen des Beschleunigers soll das Strahlrohr einen möglichst schmalen Schlitz haben. Derzeit wird von einer Breite von 2 mm ausgegangen. Für den Austausch des primären Targets ist somit eine hochpräzise, zweiachsige Verschiebung notwendig. Das bedeutet, dass das Magazin parallel zur Strahlachse und jedes Target einzeln senkrecht dazu bewegt werden kann.

Durch die kurze Lebensdauer des zunächst erzeugten Ξ^- muss der gesamte Target-aufbau kompakt sein. Die Nähe zum primären Wechselwirkungspunkt bedingt hohe Strahlenbelastung und die Notwendigkeit der Funktion in einem Magnetfeld von 2 T. In dieser Umgebung können die Anforderungen nur mit Piezomotoren erfüllt werden. Sensorelektronik zur Positionsbestimmung in direkter Targetnähe muss vermieden werden. Dennoch muss eine Logik identifizieren können, ob und wenn ja welches Target ferngesteuert bewegt werden darf.

Das, im Vergleich zum Gastarget des Standard- $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Aufbaus, massive Target muss zum Erreichen von Reaktionsraten von durchschnittlich $2 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ außerhalb des Strahlzentrums platziert werden. Durch die vorhandenen Motoren ist es möglich die Position des Targets anzupassen, so dass die sinkende Strahlteilchenzahl des Speicherrings ausgeglichen wird und die Reaktionsrate konstant bleibt.

Die vorliegende Arbeit präsentiert eine in EPICS entwickelte Steuerlogik für den Targettausch sowie die Steuerung und Identifikation des primären Targets. Zusätzlich wird ein Prototyp der Fernsteuerung vorgestellt. Dabei gibt das erste Kapitel eine Einführung in das $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Hyperkernexperiment. Im zweiten Kapitel wird die verwendete Hardware erläutert, die als Basis für die Steuerung dient. Das dritte Kapitel erklärt - neben der Funktionsweise von EPICS - die Steuerlogik, die im vierten Kapitel kurzen Tests unterzogen wird.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Arbeit selbstständig und unter ausschließlicher Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel erstellt zu haben.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Michael Bölting

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	0
1 Einleitung	1
1.1 Hyperatome und $\bar{\nu}$ -kerne	3
1.1.1 Hyperatome	3
1.1.2 Hyperkerne	4
1.2 FAIR	4
1.3 Das \bar{P} ANDA-Experiment	5
1.4 Hyperatome und $\bar{\nu}$ -kerne bei \bar{P} ANDA	6
1.4.1 Erzeugung von Hyperatomen und $\bar{\nu}$ -kernen bei \bar{P} ANDA	7
1.4.2 Das Targetsystem	9
1.4.3 Der Germanium-Detektor	10
2 Das primäre Target	12
2.1 Mechanik der primären Targets	12
2.2 Die Piezo-Motoren	14
2.2.1 Arbeitsprinzip	14
2.3 Motor-Steuereinheit	16
2.4 Encoder	18
2.5 Selbstentwickeltes Lagekontrollsystem	19
2.6 BeagleBone Black	19
3 Die Steuerlogik für das primäre Target	21
3.1 EPICS	22
3.2 Vorbereitende Programmierung	26
3.2.1 StreamDevice-Protokoll	26
3.2.2 Motor-Identifikation	27
3.2.3 Datenbank	28
3.2.4 Aktivierung des ADC	30
3.3 Automatisierung mit EPICS	32
3.4 Grafische Nutzerschnittstelle	35
3.5 Der Zustandsautomat	36
3.5.1 Zustand „Initialisierung“	36
3.5.2 Zustand „Stopp“	37
3.5.3 Zustand „Messung“	37
3.5.4 Zustand „Target sichern“	39
3.5.5 Zustand „Strahlvorbereitung“	39

3.5.6	Zustand „Target-Wechsel“	40
4	Test der Steuersoftware	46
4.1	Lichtschanke	46
4.2	Gleichmäßigkeit des Motors	49
5	Zusammenfassung und Ausblick	58
A	Bibliographie	59
B	Abbildungsverzeichnis	62
C	Handbücher	64

Abkürzungsverzeichnis

ADC	A nalog D igital C onverter
APPA	A tomic P hysics, P lasma and A ppled Science
CBM	C ompressed B aryonic M atter
CR	C ollector R ing
DIRC	D etection of I nternally R elected C herenkov light
EPICS	E xperimental P hysics and I ndustry C ontrol S ystem
FAIR	F acility for A ntiproton and I on R esearch
HESR	H igh E nergy S torage R ing
MVD	M icro V ertex D etector
NuSTAR	N uclear S tructure, A strophysics and R eactions
\bar{P} ANDA	A ntiproton A nnihilation at D armstadt
STT	S traw T ube T racker
TOF	T ime of F light

1 Einleitung

Eine Herausforderung der Physik in diesem Jahrhundert ist die Vereinheitlichung der vier bekannten Grundkräfte. Die Beobachtung von Gravitationswellen, welche beim Verschmelzen zweier schwarzer Löcher entstehen [Abb+16], erlaubt es, Theorien zur Gravitation in Anwesenheit starker Felder auszuschließen. Im Zentrum von Neutronensternen herrscht ähnlich starke Gravitation. [Psa08] Die Bildung von Neutronensternen wird jedoch durch alle vier Grundkräfte beeinflusst. Die gut verstandene elektromagnetische Kraft geht nur wenig, die schwache Kraft nur indirekt durch die Anzahl von Freiheitsgraden in die Zustandsgleichung des Neutronensterns ein. Daher bieten Neutronensterne eine einzigartige Möglichkeit die Kombination aus starker Kernkraft und Gravitation zu untersuchen.

Der Fund eines Neutronensterns mit doppelter Sonnenmasse schließt die meisten Zustandsgleichungen der Neutronensterne mit exotischer Materie als Baustein aus. [Dem+10] Gleichzeitig werden Hyperonen¹ als Teilchen in Neutronensternen ab der zwei- bis dreifachen Dichte von Kernmaterie erwartet.[DSW10] Dieser Widerspruch ist ein offenes Puzzle („Hyperonpuzzle“). Der Grund für das ungelöste Problem scheint unser unvollständiges Verständnis der zugrunde liegenden Baryon-Baryon-Wechselwirkung zu sein.

Gebundene Systeme mit mehreren Hyperonen erlauben es diese Wechselwirkung zu untersuchen.

Bisherige Experimente mit solchen Systemen (zum Beispiel KEK-PS E373 [Ich+00], BNL-AGS E906 [Ahn+01]) liefern durch die verwendete Analysetechnik (Emulsionsstapel werden mit Kameras gescannt) nur wenig Statistik und keine hohe Auflösung. In Kürze soll bei J-PARC das E07-Experiment [NY14] durchgeführt werden, welches ebenfalls Emulsionsplatten verwendet. Dabei wird durch semiautomatisierte Analysen eine höhere Statistik erwartet. Alle diese Experimente nutzten oder nutzen einen Strahl aus instabilen Teilchen, welcher daher nicht über eine lange Strecke auf hohe Güte gebracht werden kann. Des Weiteren wurde bisher nur der Grundzustand von $\Lambda\Lambda$ -Hyperkernen untersucht und zahlreiche Experimente an Teilcheninstabilen Zuständen geplant (siehe Abb. 1.1).

¹Baryonen mit strange-Quark

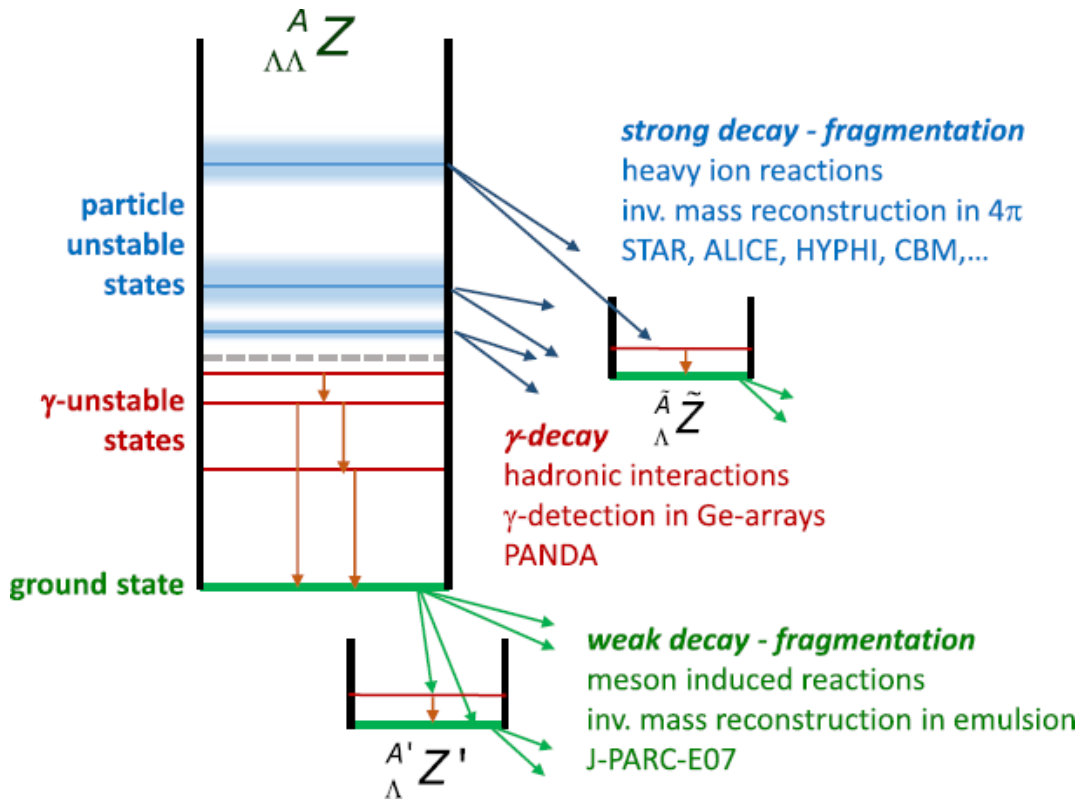


Abb. 1.1: Einordnung verschiedener Experimente zu $\Lambda\Lambda$ -Hyperkernen. Mit Schwerionenstrahlen ist die Produktion von Teilcheninstabilen Zuständen möglich. Die Grundzustände von $\Lambda\Lambda$ -Hyperkernen können mittels Kaonenstrahlen an J-PARC gemessen werden. PANDA hingegen fokussiert sich auf die dazwischenliegenden γ -instabilen Zustände. [The16]

Ein Ergebnis des KEK-PS E373-Experiments ist das Nagara-Ereignis, welches in Abb. 1.2 gezeigt ist. Es handelt sich um das erste vollständig identifizierte $\Lambda\Lambda$ -Hyperkern-Ereignis.

Die \bar{P} ANDA²-Teilexperimente zur Erforschung von gebundenen Hyperonsystemen (das Hyperatom- und das Hyperkernexperiment) bei FAIR³ nutzen hingegen - wie das vollständige \bar{P} ANDA-Experiment einen Strahl aus stabilen Teilchen (Antiprotonen) und elektronische Nachweismethoden. Außerdem ist das \bar{P} ANDA-Hyperkernexperiment das erste Experiment, welches die γ -instabilen Zustände von $\Lambda\Lambda$ -Hyperkernen untersucht.

² Antiproton Annihilation at Darmstadt

³ Facility for Antiproton and Ion Research

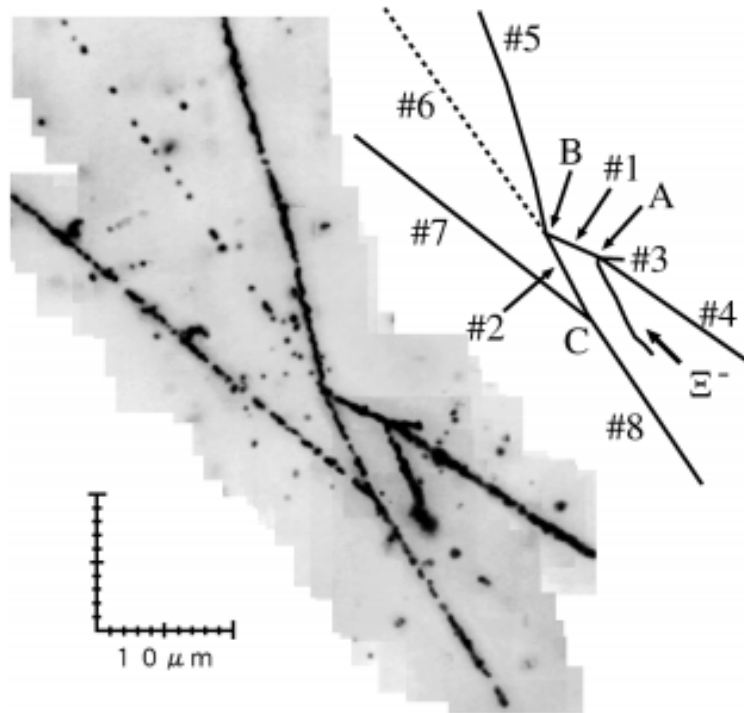


Abb. 1.2: Das NAGARA-Ereignis des E373-Experiments. Es zeigt die Topologie einer schwachen Zerfalls-Kaskade eines $\Lambda\Lambda$ -Hyperkerns. Ein Ξ^- wird am Punkt A abgestoppt. Spur 1 ist das erzeugte ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$, Spur 2 das ${}^5_{\Lambda}\text{He}$. Die übrigen Spuren sind die Zerfallsprodukte dieser beiden Teilchen [Tak+01].

1.1 Hyperatome und -kerne

$\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ erlaubt es, zwei gebundene Systeme von Hyperonen mit $s = -2$ zu untersuchen. Dies sind das Hyperatom- und das Hyperkernexperiment.

1.1.1 Hyperatome

Bei myonischen Atomen, also Atomen bei denen ein Elektron durch ein Myon ersetzt wird, ergeben sich Abweichungen des Energiespektrums gegenüber dem normalen Atomspektrum. Dies liegt daran, dass das Myon etwa 200 mal schwerer als das Elektron ist und sich deshalb näher am Kern befindet. Wenn als Ersatz für ein Elektron nicht ein Myon sondern ein negativ geladenes Hyperon eingebunden wird, werden ebenfalls Abweichungen vom Energiespektrum erwartet. Die γ -Übergänge der Kaskade des Hyperons lassen sich mit Ausnahme des letzten sehr gut mittels der Quantenelektrodynamik vorhersagen. Der letzte Übergang der Kaskade zeigt eine Beeinflussung durch die starke Wechselwirkung zwischen Hyperon und Kern, welche sich in einer zusätzlichen Energieverschiebung zeigt. Daraus lässt sich auf die Eigenschaften der Hyperonen und der Hyperatome schließen.

1.1.2 Hyperkerne

Bei Atomkernen im Grundzustand wird die durch das Pauli-Prinzip vorgegebene Schalenstruktur durch die Nukleonen des Atomkerns nach steigender Bindungsenergie sortiert besetzt. Dies führt dazu, dass nach außen keine Wechselwirkungen der Nukleonen untereinander zu beobachten sind. Durch Anregung eines Atomkerns und Beobachtung der folgenden Abregung kann die Schalenstruktur gemessen werden, ebenso bei dem Zerfall instabiler Atomkerne. Da in der zugänglichen Natur vorkommende Kerne nur aus den Quarks u und d bestehen, reichen diese für eine genaue Erforschung der Kernkräfte nicht aus.

Eine Möglichkeit weitere Erkenntnisse zu gewinnen besteht darin, Hyperonen – also Teilchen aus u -, d -, und s -Quark - im Atomkern zu binden. Die dadurch entstehenden Kerne nennt man Hyperkerne. Das Hyperon unterscheidet sich durch seine Strangeness von Nukleonen, weshalb ihm das Pauli-Prinzip die von Nukleonen besetzten Kernschalen nicht verbietet.

Die starke Wechselwirkung kann die Generation eines Quarks nicht ändern, so dass das Λ -Hyperon als leichtestes Hyperon nur gemäß der schwachen Wechselwirkung zerfallen kann. Dies bewirkt eine typische Lebensdauer um 10^{-10} s und ermöglicht daher spektroskopische Untersuchungen.

Die Beobachtung des Zerfalls im Kern gebundener Hyperonen bietet Zugang zur starken Wechselwirkung zwischen Nukleonen und Hyperonen. Da bereits Hyperkerne mit doppelter Strangeness beobachtet werden konnten und sich bei diesen die Möglichkeit zur Untersuchung der Wechselwirkung gebundener Hyperonen untereinander bietet, ist das Ziel des \bar{P} ANDA-Hyperkernexperiments eine größere Anzahl an $\Lambda\Lambda$ -Hyperkernen zu erzeugen.

Für die Erzeugung von $\Lambda\Lambda$ -Hyperkernen werden Teilchenbeschleuniger benötigt. Diese gehören zum neuen Komplex FAIR.

1.2 FAIR

Am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung entsteht mit FAIR ein neues Beschleunigerzentrum. Die geplante Umsetzung der modularen Startversion [GG09] ist in Abb. 1.3 dargestellt. FAIR stellt Protonen- und Schwerionenstrahlen sowie sekundär einen Antiprotonenstrahl zur Verfügung. Die bisher bestehenden Beschleuniger werden als Vorbeschleuniger weiter genutzt.

Die Experimente, welche mit den FAIR-Anlagen durchgeführt werden sollen, decken einen breiten Bereich der Physik sowie angrenzende wissenschaftliche Bereiche ab. Neben dem \bar{P} ANDA-Experiment, welches im folgenden Kapitel genauer erläutert wird, sind dies: [GG09]

- APPA: Atom-, Plasma- sowie angewandte Physik
- CBM: Hadronen- und Quarkphysik bei hohen Dichten
- NuSTAR: Kernstruktur, nukleare Astrophysik, Physik nuklearer Reaktionen

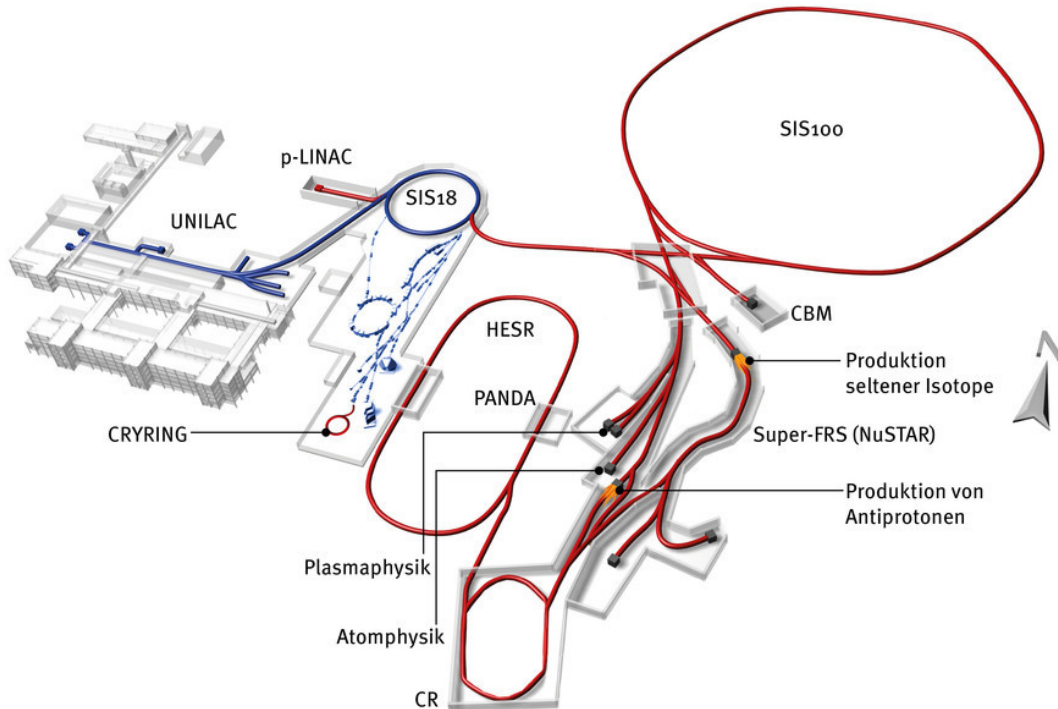


Abb. 1.3: Überblick über GSI & FAIR: in rot dargestellt die neuen Beschleunigeranlagen. Zentral der HESR und $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ [ion17].

1.3 Das $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment

Das $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiment ist ein Fixed-Target-Experiment, welches die Antiprotonen des HESR⁴ nutzt. Der HESR bekommt vom CR⁵ auf 3 GeV beschleunigte Antiprotonen, sammelt diese und bringt sie auf die gewünschten Strahlparameter. In der ersten Ausbaustufe des HESR ist der maximale Impuls auf 9 GeV/c begrenzt, wobei bis zu 10^{10} Antiprotonen aufgenommen werden und die relative Impulsaufösung 10^{-5} beträgt.

Der Antiprotonenstrahl des HESR wird in der Standardkonfiguration des $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Experiments (siehe Abb. 1.4) mit einem Wasserstofftarget (Cluster-Jet oder Pellet) zur Kollision gebracht. Die Reaktionsprodukte werden im $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Detektor, einem 4π -Detektor, nachgewiesen. Wie die heute üblichen 4π -Detektoren ist der Detektor dabei in verschiedene Subsysteme aufgeteilt, die dedizierte Aufgaben haben: Zunächst erfolgt eine Spurdetektion der Teilchen durch mehrere Lagen (MVD⁶ und STT⁷). Im

⁴High Energy Storage Ring

⁵Collector Ring

⁶MikroVertexDetector

⁷Straw Tube Tracker

Anschluss werden die Teilchen mit DIRC⁸ und TOF-Detektor⁹ identifiziert. Noch vor dem Solenoid-Magneten, der die Bahn geladener Teilchen zur Identifikation krümmt, befindet sich ein elektromagnetisches Kalorimeter zur Energiemessung. Als äußerste Lage folgt ein Myonen-Detektor. Diese Systeme bilden zusammen das Target-Spektrometer. In Vorwärtsrichtung befindet sich das Vorwärts-Spektrometer. Dieses

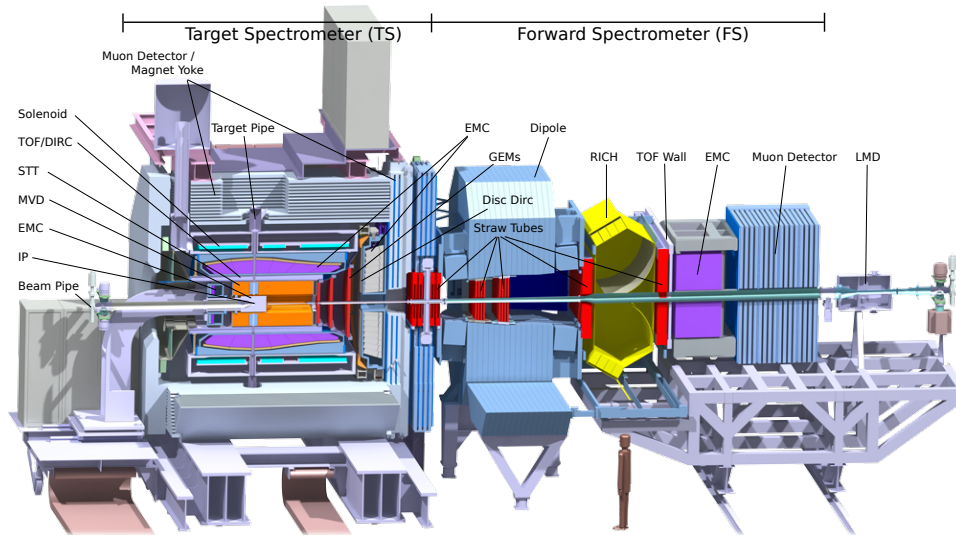


Abb. 1.4: Schnitt durch den \bar{P} ANDA-Detektor[Ern+17]

hat prinzipiell den gleichen, in Schichten angeordneten Aufbau. Durch den Boost der Teilchen herrschen in diesem Bereich jedoch höhere Raten, so dass die Komponenten hieran angepasst werden müssen.

Zur Überwachung der Luminosität dient ein dedizierter Detektor, der etwa 11 Meter in Vorwärtsrichtung einen Bereich von 3 mrad – 8 mrad abdeckt. Dieser Bereich schließt die Mehrfachstreuung der Antiprotonen aus, gleichzeitig ist aber der Impulsübertrag zwischen Target und Strahl durch die Coulomb-Wechselwirkung dominiert und damit mittels QED berechenbar.

Zum Triggern eines Events bedient sich der Detektor ausschließlich darauf angepasster Software.

Der Detektor dient auf diese Weise der Spektroskopie von Charmonium-Zuständen, der Suche nach gluonischen Anregungszuständen, nach Zerfällen mit CP-Verletzung, der Untersuchung von D-Meson-Zerfällen und der Nukleonenstruktur.

1.4 Hyperatome und –kerne bei \bar{P} ANDA

Das Hyperkern- und das Hyperatomexperiment nutzen die Modularität des Detektors. Um Platz zu schaffen für ein dediziertes Targetsystem und um Strahlenschäden

⁸ Detection of Internally Reflected Cherenkov light

⁹ Time of Flight

im MVD zu vermeiden wird dieser entfernt. Außerdem wird die rückwärtige Endkappe des Kalorimeters entfernt, um dort eine Anordnung von Germanium-Detektoren zur hochauflösenden γ -Spektroskopie zu platzieren.

Das eingebundene Hyperon hat, aufgrund seiner höheren Masse und der Strangeness, neue nukleare Strukturen zur Folge, welche in normalen Kernen nicht vorliegen. Deshalb kann ein Vergleich eines Hyperkerns mit einem normalen Kern neue Informationen für offene Fragen der Kernphysik liefern. Diese beiden Experimente, sowie die Effekte, die mit ihnen untersucht werden, werden in den nächsten Abschnitten ausführlicher beschrieben.

1.4.1 Erzeugung von Hyperatomen und $\bar{\Lambda}$ -kernen bei \bar{P} ANDA

Zur Erzeugung der Hyperatome und $\bar{\Lambda}$ -kerne wird bei \bar{P} ANDA ein zweistufiger Prozess verwendet. Jeder dieser Prozesse findet in einem eigenen Target statt. Dadurch sind - anders als bei E07 (J-PARC) - dünne Targets möglich, die nur vergleichsweise wenig Absorption der Zerfallsprodukte aufweisen.

Das primäre Target befindet sich dabei im Inneren des HESR-Strahlrohrs und erfährt Wechselwirkungen mit dem Antiprotonenstrahl. Die dabei erwünschten Reaktionen $\bar{p} + p \rightarrow \Xi^- \bar{\Xi}^+$ und $\bar{p} + n \rightarrow \Xi^- \bar{\Xi}^0$ treten in weniger als einem von Tausend Ereignissen auf. Durch diese niedrige Erzeugungsrate der Hyperonen ist eine hohe Strahlintensität erforderlich.

In den beiden gesuchten Reaktionen entsteht das doppelt seltsame Ξ^- -Hyperon, welches in weiteren Streuprozessen im primären Target Energie verliert, bevor es dieses verlässt. Schematisch ist dies in Abb. 1.5 im oberen, rot hinterlegten Bereich dargestellt.

Bei Impulsen unter 750 MeV/c kann das Ξ^- im sekundären Target mit der Wahrscheinlichkeit, welche in Abb. 1.6 dargestellt ist, abgestoppt werden, wodurch nach dem Einfang durch ein Absorberatom ein angeregtes Hyperatom entsteht.

Die Verteilung der Wahrscheinlichkeit lässt sich erklären: Es dauert - abhängig vom Eingangsimpuls - eine gewisse Zeit bis das Ξ^- abgebremst ist. Ist diese Abbremszeit größer als die mittlere Lebensdauer des Ξ^- , so ist die Wahrscheinlichkeit des Abstoppens gering, da das Teilchen schon zerfallen ist. Bei niedrigen Impulsen reicht dagegen die Lebensdauer des Ξ^- nicht, um überhaupt zum sekundären Target zu gelangen, da das Strahlrohr breiter ist als der Weg den die Ξ^- zurücklegen. Dadurch ist leicht erkennbar, dass das sekundäre Target möglichst nah am primären liegen muss.

Das ebenfalls entstehende, Antistrangeness enthaltende, Anti-Hyperon wird das primäre Target aufgrund von Annihilation wahrscheinlich nicht verlassen, der Nachweis der Zerfallsprodukte kann jedoch als Trigger für die erfolgreiche Erzeugung des Hyperons dienen.

Das angeregte Hyperatom geht durch eine γ -Kaskade des Hyperons in seinen Grundzustand über, hierbei weist der letzte Übergang durch die starke Wechselwirkung zwischen Kern und Hyperon Abweichungen von den QED-Voraussagen auf, die mit den Germanium-Detektoren aufzulösen sind. Erwartet wird eine Energie der Röntgenstrahlung < 1 MeV. [BFG99]

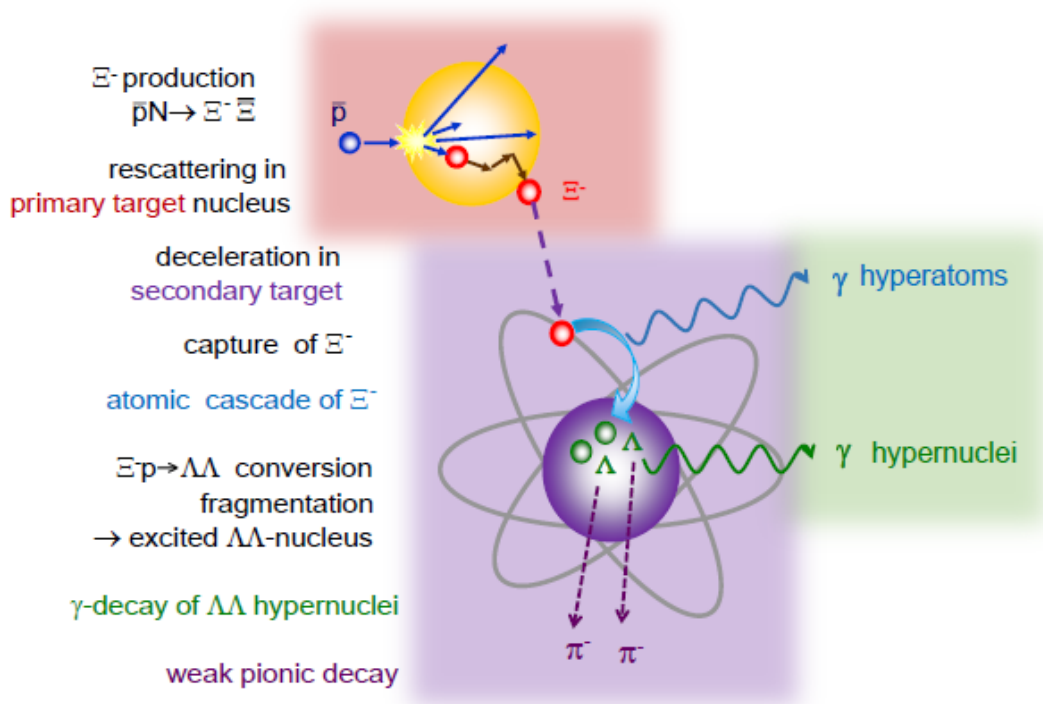


Abb. 1.5: Schema der Erzeugung eines $\Lambda\Lambda$ -Hyperkerns. Rot hinterlegt ist die Erzeugung des doppelt seltenen Ξ^- im primären Target. Der violett hinterlegte ange deutete Atomkern soll das sekundäre Target darstellen, in dem das Ξ^- abgebremst und eingefangen wird. Der grün hinterlegte Bereich stellt den Germanium-Detektor dar, in welchem die γ -Quanten der Experimente nachgewiesen werden. [The16]

Das Hyperkernexperiment geht einen Schritt weiter: Das Ξ^- im Kern wird mit einer Wahrscheinlichkeit von 5% [San10] mit einem Proton in der Reaktion



in zwei Λ -Hyperonen umgewandelt.

In der schematischen Darstellung aus Abb. 1.5 sind diese Schritte violett hinterlegt.

Der durch die überschüssige Energie angeregte $\Lambda\Lambda$ -Hyperkern fragmentiert, wobei beide Fragmente Λ -Hyperonen enthalten können. Die Anregungsenergie der Fragmente reicht nicht zum Abdampfen weiterer Teilchen aus, so dass γ -Quanten bis zum Zerfall in den Grundzustand emittiert werden. Die Energie dieser Photonen liegt bei $< 10 \text{ MeV}$. [San10]

Für schwere Hyperkerne sind die beiden häufigsten Zerfallskanäle des Λ -Baryons über den schwachen, mesonischen Zerfall durch das Pauli-Prinzip unterdrückt - die frei werdende Energie reicht nicht um das jeweils entstehende Nucleon auf eine freie Schale zu heben, stattdessen finden in schweren Targetkernen nichtmesonische Zer-

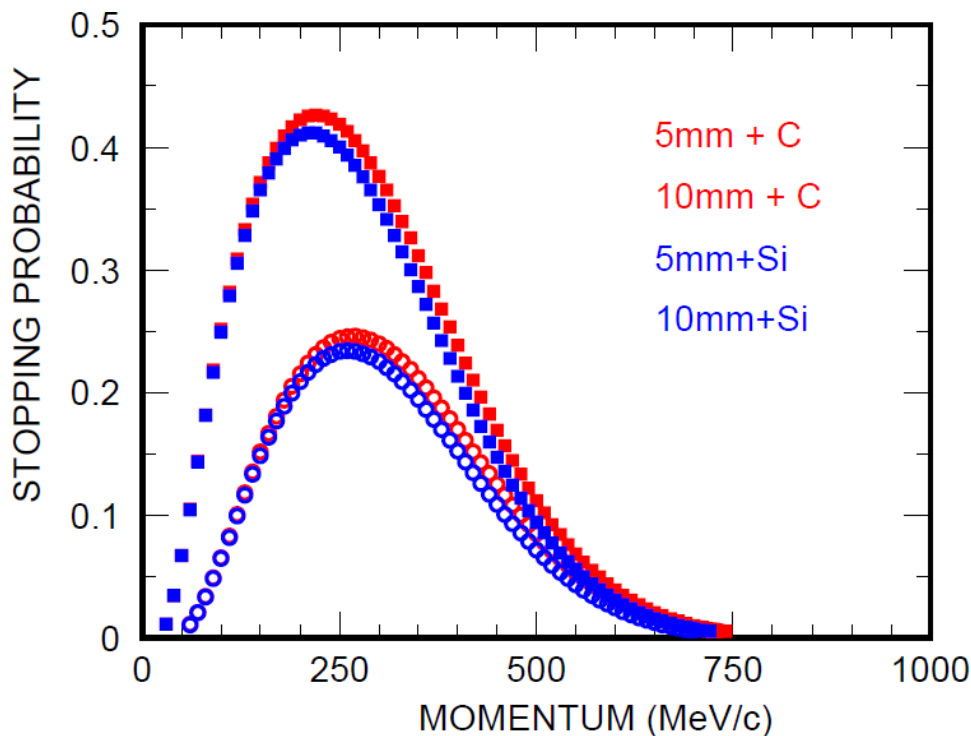


Abb. 1.6: Einfangwahrscheinlichkeit gegen Impuls eines Ξ^- in Kohlenstoff beziehungsweise Silizium. Die höheren Verteilungen gehen von 10 mm Strahlrohrdurchmesser aus, die unteren von 20 mm [Ble10]

fälle statt. Für mesonische Zerfälle, bei denen nachweisbare Pionen entstehen, ist es daher nötig, ein leichtes Absorbermaterial zu verwenden. Da auch leichte Targets noch zu einer Schwelle für den Zerfall führen, verlängert sich die Lebensdauer des Hyperons, so dass der Hyperkern spektroskopisch untersucht werden kann.

Insgesamt lässt sich hieraus die Bindungsenergie $\Delta B_{\Lambda\Lambda}$ des $\Lambda\Lambda$ -Hyperkerns ermitteln.

1.4.2 Das Targetsystem

Wie im vorigen Kapitel angedeutet, besteht das Targetsystem aus einem primären und einem sekundären Target. Das primäre Target ist ein 5 μm dünnes Kohlenstofffilament. Da dieses durch mechanische Einflüsse, Erwärmung oder Reaktionen mit dem Antiprotonenstrahl beschädigt werden könnte, muss ein ferngesteuerter Austausch möglich sein, um wochenlange Zwangspausen für das Experiment zu verhindern. Hierzu werden fünf primäre Targets parallel zum Strahlrohr nebeneinander gelagert. Bei einer Messung wird eines der Targets durch einen 2 mm breiten Schlitz ins Innere des Strahlrohrs gebracht. Hierfür ist es notwendig die Targets sowohl parallel (Z-Richtung) als auch orthogonal (X-Richtung) zur Strahlrichtung bewegen zu können.

Details zum mechanischen Aufbau, der diese Bewegungen ermöglicht, befinden sich in Kap. 2.1. Die Steuerlogik dazu ist in Kap. 3.5 beschrieben.

Die Redundanz des primären Targets bedingt, dass das sekundäre Target, welches sich außerhalb des Strahlrohrs befindet, nur $\frac{3}{4}$ des Winkelbereichs um das Strahlrohr einnehmen kann. Die verbleibende Seite dient der Aufnahme der Mechanik des primären Targets (siehe Abb. 2.1).

Das sekundäre Target besteht aus einer Sandwich-Struktur aus sechs Absorberlagen und acht aktiven Siliziumstreifen-Detektoren. Wenn das Ξ^- durch elastische Streuung im Sekundärtarget weit genug abgebremst wurde, wird es im Absorber eingefangen. Die Siliziumstreifen-Detektoren dienen dazu, die Zerfallsprodukte der Hyperonen nachzuweisen. Im Fall des Hyperatom-Experiments wird das sekundäre Target durch einen, speziell an die Maximierung der Produktion der Hyperatome und die Minimierung der Absorption ihrer Röntgenphotonen angepasster, Absorber aus Eisen ersetzt. Eine genauere Beschreibung des Sekundärtargets für das Hyperkern-Experiment befindet sich in [Ble10].

1.4.3 Der Germanium-Detektor

Zum Nachweis der γ -Quanten dient ein dedizierter Germanium-Detektor. Dieser befindet sich zur Reduzierung der Hintergrundstrahlung sowie aus Platzgründen in Rückwärtsrichtung und deckt hier den Polarwinkelbereich $\theta = 100^\circ - 160^\circ$ ab. Die Anordnung besteht aus 20 sogenannten Triple-Detektoren, die je drei Germanium-Kristalle zu einer Einheit bündeln. Der Detektor wird in Kooperation mit NuSTAR¹⁰ entwickelt. Jeder Triple-Detektor hat einen hochintegrierten Aufbau und beinhaltet mehrere unterstützende Baugruppen wie zum Beispiel die Versorgung mit Hochspannung oder die Untergrundunterdrückung. Mittels eines elektromechanischen Kühlers wird der Detektor auf der Temperatur von flüssigem Stickstoff gehalten. Ausgegeben wird das analoge Signal, da eine elektronische Weiterverarbeitung durch die hohen Strahlendosen vor Ort nicht realisierbar ist. Schematisch ist ein Triple-Detektor und die wichtigsten integrierten Komponenten in Abb. 1.7 dargestellt. Mehr zur Germanium-Anordnung und zur Entwicklung derselben findet sich in [Ste17].

Die Integration dieses Aufbaus in den $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Detektor ist in Abb. 1.8 dargestellt.

¹⁰Nuclear Structure, Astrophysics and Reactions

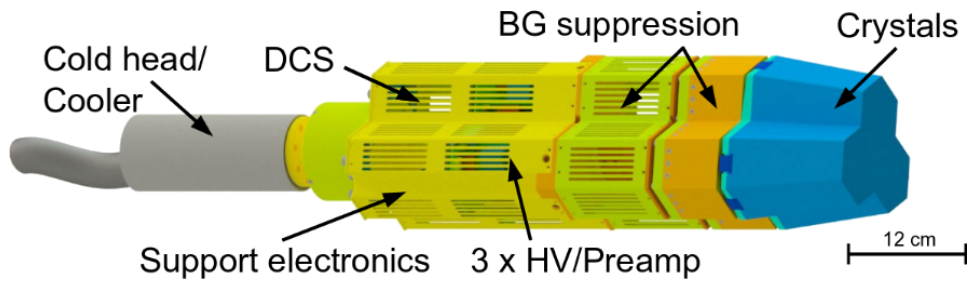


Abb. 1.7: Einer der 20 Triple-Detektoren, die den Germanium-Detektor bilden. Die Detektoren haben ein vollständig integriertes Design, das heißt sowohl die Versorgung als auch die erste Verarbeitung der Daten finden bereits im Gerät statt. [Ste17]

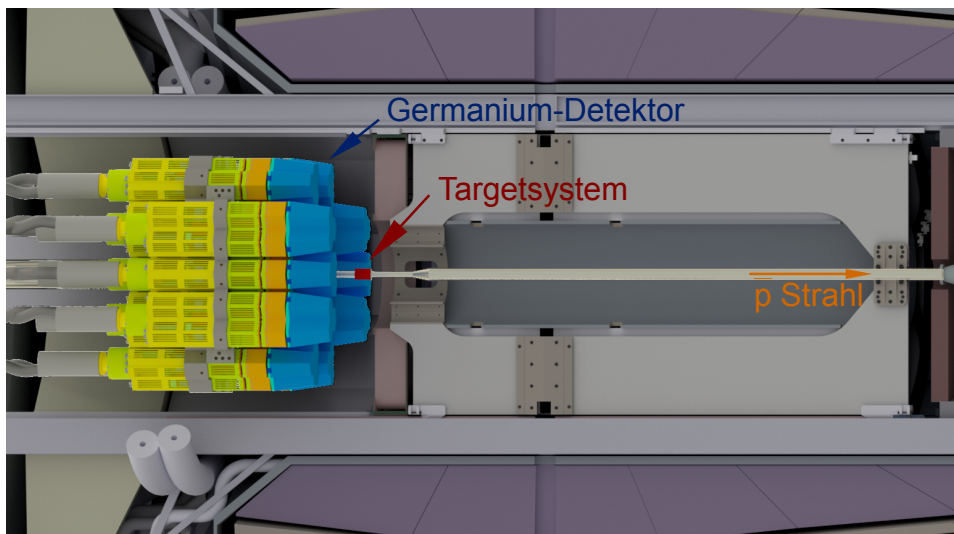


Abb. 1.8: Aufbau des Hyperkernexperimentes im Inneren des \bar{P} ANDA-Detektors; farblich hervorgehoben die zusätzlichen Einbauten. Im Vergleich zum Standardaufbau von \bar{P} ANDA fehlen der MVD und die Endkappe des Kalorimeters. Das dedizierte Targetsystem benötigt eine Modifikation des Strahlrohrs. [Ste17]

2 Das primäre Target

Der Fokus dieser Arbeit liegt darauf die Steuersoftware des primären Targets zu entwickeln. Dazu ist es jedoch notwendig, das gesamte System und dessen Komponenten zu kennen. Diese werden im folgenden Kapitel eingeführt und erklärt.

2.1 Mechanik der primären Targets

Wie bereits erwähnt existieren fünf primäre Targets, welche parallel zum Strahlrohr nebeneinander angeordnet sind. Zum Wechsel auf ein neues Target muss das alte Target aus dem Strahlrohr entfernt, die nächste Position angefahren und schließlich das neue Target in das Strahlrohr gebracht werden (siehe Abb. 2.1).

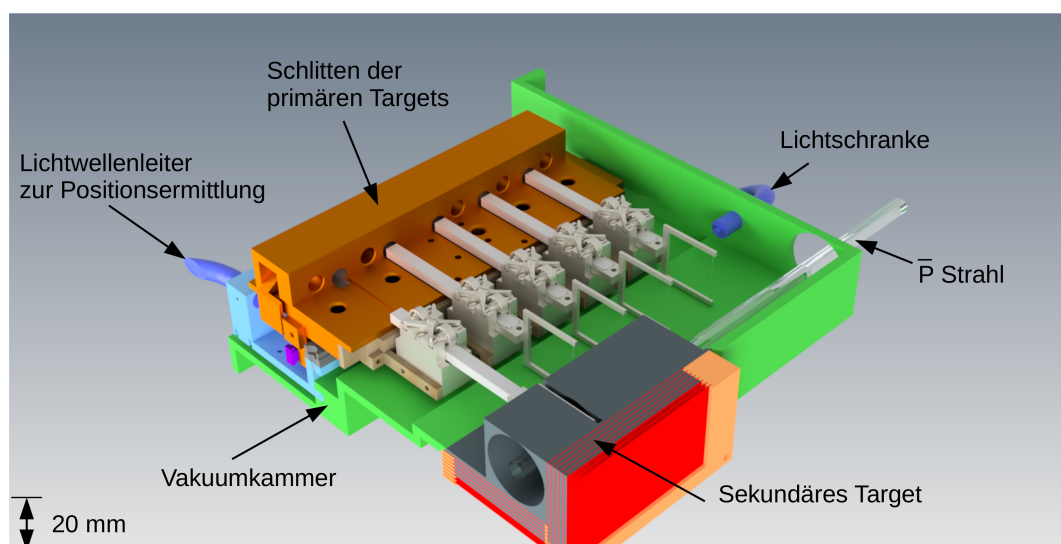


Abb. 2.1: Schnittbild der Vakuumkammer mit sekundärem Target, das vorderste primäre Target ist in Position zur Vorbereitung des Antiprotonenstrahls. In Dunkelblau sind die Lichtwellenleiter zu erkennen, welche zur Bestimmung der Position von Target-Motoren und Schlitten dienen. Das Gegenstück der Lichtschanke ist durch den Schnitt nicht zu sehen.

Jedes der primären Targets ist hierfür auf einem eigenen Piezomotor (siehe Kap. 2.2) befestigt, welcher die Bewegung in X-Richtung, also senkrecht zur Strahlachse, ermöglicht. Über einen „Befestigungsschuh“ sind diese mit einem Schlitten verschraubt.

Die Stromkabel der Piezomotoren werden durch den Schlitten geführt, welcher deshalb aus zwei miteinander verschraubten Teilen besteht.

Der Schlitten wiederum kann mit einem weiteren Piezomotor angetrieben werden. Dies ermöglicht es, ein anderes Target in Position zu bringen. Dabei muss die Position mit einer Präzision von 0,1 mm angefahren werden um einen sicheren Betrieb des Targetsystems zu gewährleisten. Dies ist notwendig, da das Target eine schmale Aussparung innerhalb des Absorbers treffen muss. Ein System zur Positionsbestimmung, das dies unter den Strahlungs-, Magnetfeld- und Vakuumbedingungen erfüllt, wird in Kap. 2.5 vorgestellt. Wegen des Absorbers muss auch sichergestellt werden, dass der Schlitten nicht bewegt wird, wenn ein Target in dem Strahlrohr ist. Hierfür ist eine Lichtschranke geplant, welche den Z-Motor nur dann freigibt, wenn dies nicht der Fall ist.

Abb. 2.2 zeigt eine Explosionszeichnung dieser Mechanik. Eine genauere Beschreibung dieser Mechanik ist in [Sch17] zu finden.

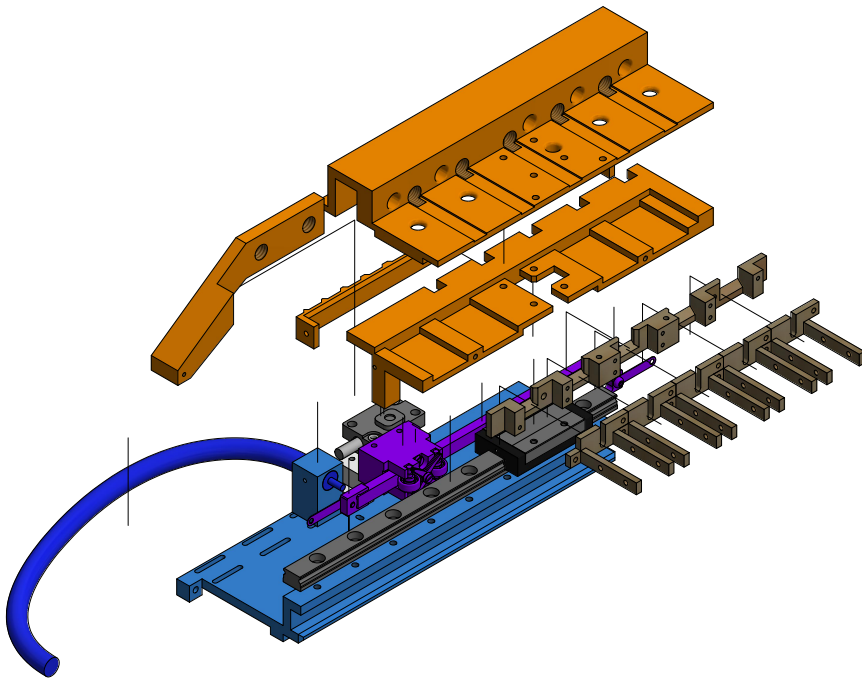


Abb. 2.2: Explosionsansicht der Mechanik des primären Targets. Der Schlitten ist orange eingefärbt, die Befestigung der Motoren über Befestigungsschuh und Adapter dunkelgrau. Angetrieben wird dieser Aufbau vom violett eingefärbten Motor. Zusätzlich lassen sich der Encoder (grau) und der Lichtwellenleiter (dunkelblau) des selbst entwickelten Lagekontrollsystems erkennen.

2.2 Die Piezo-Motoren

Der einzige Motortyp, der unter den experimentellen Bedingungen (Ultrahochvakuum, bis 2 T Magnetfeld, starke Strahlung durch die Nähe zum primären Wechselwirkungspunkt) die notwendige Präzision bei kleinen Abmessungen bereitstellen kann, ist ein Piezomotor. Dieser Motortyp bewegt über die spannungsinduzierte Verformung von Piezokristallen eine Schubstange.



Abb. 2.3: Piezo LEGS[®] Linear 6N mit Metallblättchen am vorderen Ende als Anschlussadapter. [Pie16b] Die Abmessungen des Motorgehäuses von 19,3 mm × 10,8 mm × 22 mm bedingten eine Weiterentwicklung der mechanischen Komponente des primären Targets. ([Sch17])

Im Gegensatz zu den vorangehenden Arbeiten, die mit dem PiezoWave[®] Linear 0.1N WL0104A von PiezoMotor[®] als Target- und mit dem Nanomotion HR1 als Schlittenmotor arbeiteten ([Rau16; Roj16]), setzt diese Arbeit durchgängig auf den Piezo LEGS[®] Linear 6N LL10 Motor (Abb. 2.3); der einzige Unterschied zwischen Target- und Schlittenmotor ist die Länge der Schubstange. Die Änderung des Targetmotors ergibt sich durch den notwendigen Hub von circa 25 mm. [Sch17] Die Ersetzung des Schlittenmotors wurde nötig, um unter einer radialen Ausdehnung von 15 cm zu bleiben. [Sch17] Dies entspricht gerade dem Platz, der durch das Entfernen des MVD im Inneren des PANDA-Detektors frei wird. [The12]

2.2.1 Arbeitsprinzip [Pie17; Pie13a]

Der Piezo LEGS[®] ist ein Motor, dessen Schubstange mittels Reibung bewegt wird. Dies bedeutet aber auch, dass die einzelnen Schritte unterschiedlich lang sein können, insbesondere wenn die Last variiert. Der Hersteller hat hierzu Untersuchungen veröffentlicht, welche in Abb. 2.4 dargestellt sind. Gleichzeitig bedeutet das Reibungsprinzip, dass eine Lagekontrolle durch den Motor alleine nicht möglich ist, sondern mit einem unabhängigen System geleistet werden muss.

Der in Abb. 2.5 dargestellte Zyklus entspricht einem Motorschritt, welcher im Folgenden näher erläutert wird. Zunächst sind alle Beine elektrisch aktiviert. Sie sind

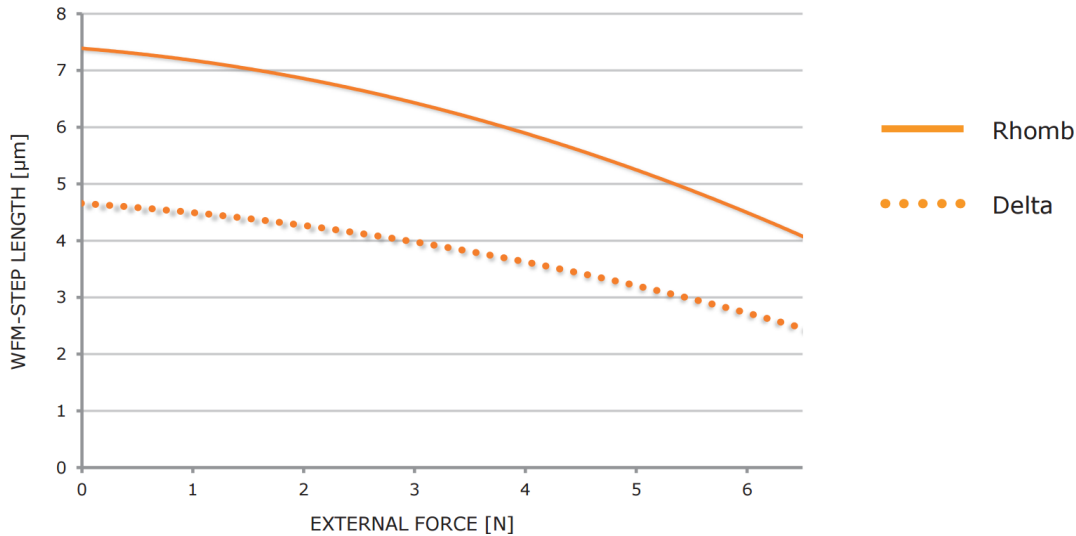


Abb. 2.4: Motorleistung in Abhängigkeit der externen Last für die beiden möglichen Schwingungsverläufe [Pie17]. In dieser Arbeit wird der Verlauf *Delta* verwendet, die Auswahl erfolgt über das Steuergerät.

ausgestreckt und gebeugt. Durch den Kontakt aller vier Beine ist dies eine Position mit maximaler Haltekraft von 7 N (2.5a). Im nächsten Schritt verlieren das zweite und vierte Bein den Kontakt mit der Schubstange und bewegen sich ohne Kontakt nach links, während die anderen Beine sich nach rechts bewegen und dabei die Schubstange mitnehmen (2.5b). Im dritten Teilschritt (2.5c) haben die Beine, die sich eben ohne Kontakt mit der Schubstange nach links bewegten, diesen wieder aufgebaut, während die anderen Beine eingezogen wurden. Die Rolle der Beine hat sich gegenüber 2.5b umgekehrt. Im vierten Teilschritt in 2.5d hat sich das zweite Beinpaar nach rechts bewegt und das erste fängt wieder an sich zu strecken um Kontakt mit der Schubstange herzustellen.

Die zurückgelegte Weglänge nach einem vollen Zyklus beträgt typischerweise 4 µm, wobei der Motor bis zu 2500 Schritte pro Sekunde fahren kann, was einer Geschwindigkeit von 1 cm/s entspricht; lastabhängig kann diese maximale Geschwindigkeit jedoch niedriger sein.

Bei der Installation des Motors muss darauf geachtet werden, dass keine Scherkräfte an der Schubstange auftreten. Dies führt zu schlechterer Leistung des Motors, er kann auch kaputt gehen. Um dies zu verhindern liegt den Motoren ein Metallblatt bei, welches als Adapter zwischen der Schubstange und dem angetriebenen Bauteil fungiert.

Bei Fahrten des Motors darf die Schubstange den Kontakt mit den Beinen nicht verlieren, um den Motor nicht zu beschädigen. Es ist deshalb nötig, einen Endanschlag in die Vakuumkammer zu integrieren. Ein Fahren gegen diesen Anschlag beschädigt den Motor nicht.

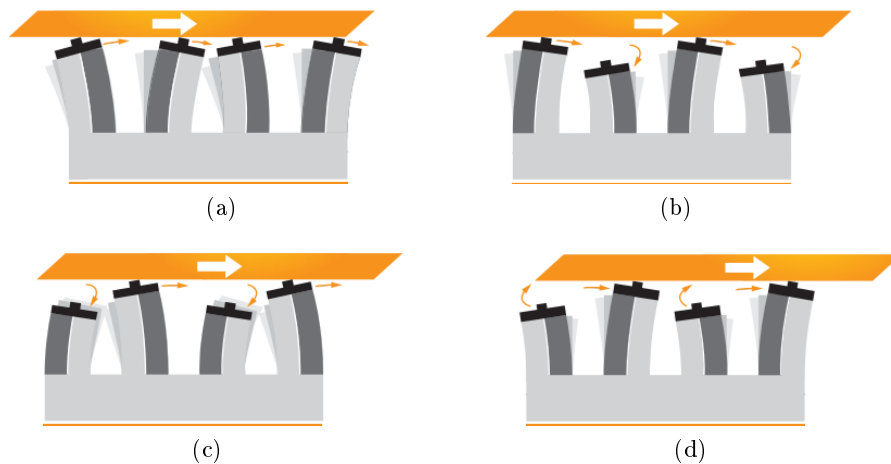


Abb. 2.5: Schema des Fahrprinzips. Erkennbar ist, dass immer mindestens zwei Beine Kontakt haben und jeweils 2 Beine parallel laufen. [Pie17] Die Beine mit Kontakt ziehen durch Reibung die Schubstange (orange) mit und führen damit zur Bewegung des Motors.

2.3 Motor-Steuereinheit

Der Anschluss der Motoren erfolgt über ein fünfadriges Kabel, welches vier Phasen und eine Masseleitung hat. Die Fahrbefehle bekommt der Motor von einem Steuergerät, wobei in der vorliegenden Arbeit der einachsige PMD101 (siehe Abb. 2.6) von PiezoMotor[®] gewählt wurde, welcher über das beiliegende 15 V-Netzteil mit Spannung versorgt wird. Zusätzlich zum Motor-Anschluss bietet der PMD101 einen Sensor-Port, an den ein geeigneter Encoder angeschlossen werden kann, und einen 16-poligen I/O-Port. Die Belegung des I/O-Ports ist in Abb. 2.7 gezeigt. Diese beiden Anschlüsse wurden in der vorliegenden Arbeit nicht verwendet und sind nur der Vollständigkeit wegen erwähnt.

Der PMD101 kann zwei verschiedene Spannungsverläufe für den Motor erzeugen, *Delta* und *Rhomb* (siehe auch Abb. 2.4). In beiden Fällen beträgt die Amplitude $42 V_{pp}$; in Abb. 2.8 ist das jeweils am Motor ankommende Signal dargestellt. Im weiteren Verlauf der Arbeit wurde die Wellenform *Delta* gewählt, da diese eine genauere Positionierung erlaubt. [Pie14] Der Vorteil der Wellenform *Rhomb* wäre, dass der Motor größere Schritte macht und dadurch schneller ist. [Pie14]

Der PMD101 erlaubt prinzipiell das Fahren in zwei Modi: für den closed-loop-Modus muss ein Encoder angeschlossen werden, welcher der Steuereinheit eine Rückmeldung über die gefahrene Strecke liefert; hierbei lassen sich Regelparameter wie zum Beispiel die Beschleunigung des Motors festlegen. Der zweite Modus - open-loop - benötigt keinen angeschlossenen Encoder; es wird dem PMD101 mitgeteilt, wie viele Schritte beziehungsweise Bruchteile eines Schrittes der Motor fahren soll. Die mögliche Unterteilung eines Schrittes ist dabei abhängig von der Fahrgeschwindigkeit und



Abb. 2.6: Die Motorsteuereinheit PMD101, die einzelnen Anschlüsse sind im Text erläutert. [Pie16a]

I/O Port			
Pin	Type	Description	Secondary Use
1	Output	+5 V (max 200 mA)	
2	-	Ground (GND)	
3	Input	Analogue -10...10 V	
4	Input	Analogue 0...5 V	In 2
5	Output	Out 0	SSi SDA
6	Input	In 0	External limit switch R
7	Input	In 1	External limit switch F
8	Output	Out 1	SSi SCK
9	Input	Analogue_run	
10	Input	Dir_x	
11	Input	Step_x	
12	Input	Quadrature Z Index	
13	-	Ground (GND)	
14	Output	+5 V (max 200 mA)	
15	Input	Quadrature Signal B+	
16	Input	Quadrature Signal A+	

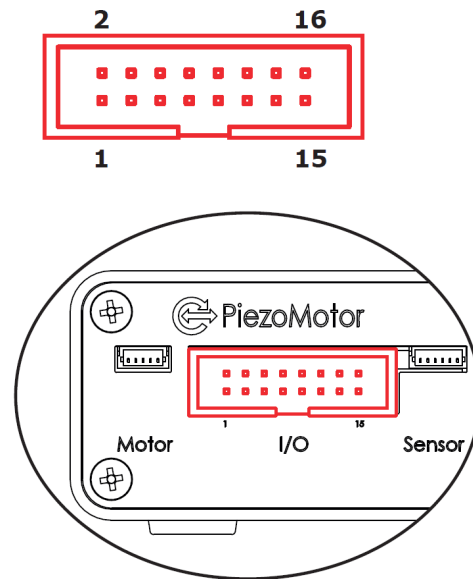


Abb. 2.7: Die I/O-Port Pinbelegung des PMD101, rechts im Bild die Position auf dem Gerät und die Portnummern [Pie14]

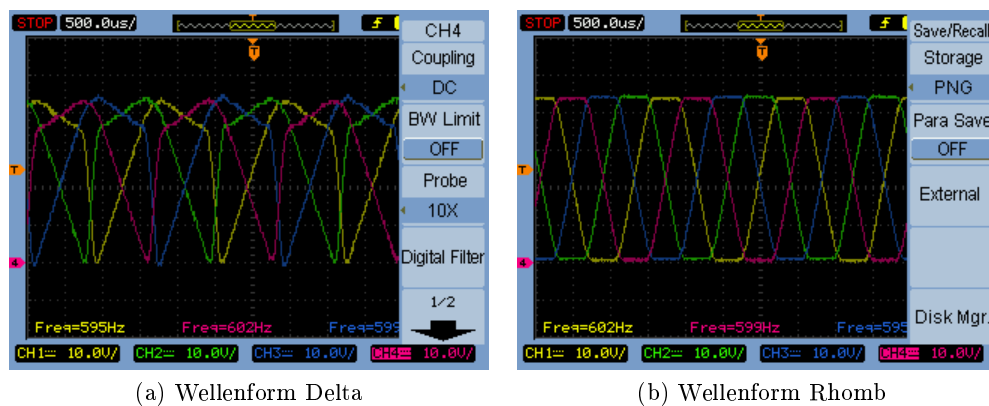


Abb. 2.8: Spannungsverlauf für die Wellenformen Delta und Rhomb am Motor, aufgenommen mit einer Geschwindigkeit von 600 Schritte/s.

kann in bis zu 2048 sogenannte Mikroschritte erfolgen. Mittels der Mikroschritte wird bei Verwendung des PMD101 eine typische Fahrgenauigkeit von $0,002\ \mu\text{m}$ erreicht, sofern ein entsprechend genaues Lagekontrollsystem vorhanden ist.

Die Kommunikation des PMD101 mit dem Host-PC erfolgt seriell über die USB-Schnittstelle, die Steuereinheit beinhaltet einen USB-RS232-Konverter. [Pie13b] Das Kommunikationsprotokoll des PMD101 ist dem Gerätehandbuch [Pie14] entnehmbar.

2.4 Encoder

Zum Testen der Steuerlogik wurde ein M1000V von MicroE Systems verwendet. Dieser Linearencoder vereint eine hohe Präzision von bis zu $78\ \text{nm}$ mit einer hohen Toleranz bezüglich der Ausrichtung. [Mic03] Die geringen äußeren Abmessungen des Encoders erlauben es, diesen direkt mit der geplanten Mechanik des primären Targets zu verwenden. Der Encoder liest mit einer Laserdiode und einer Photodiode Interferenzmuster von dem zugehörigen Glas-Maßstab ab und sendet das Signal an ein Kommunikationsboard. Bei diesem handelt es sich um ein DMC4113 von Galil Motion Control. Das DMC4113 ist ein eigenständiges Bewegungs-Kontrollboard, kann aber auch in Kombination mit einem PC verwendet werden; es wurde zusammen mit dem Encoder bereits für den HR1-Motor gekauft um diesen zu steuern. Neben spezieller Software des Herstellers existiert auch ein EPICS-IOC (siehe Kap. 3.1).

Es ist davon auszugehen, dass die Dioden sowie eventuell weitere im Encoder verbaute Elektronik der Strahlenbelastung im Experiment nicht standhält, so dass ein eigenes Lagekontroll-System entwickelt werden muss.

2.5 Selbstentwickeltes Lagekontrollsystem

Das Lagekontrollsystem muss trotz der Strahlenbelastung und des 2 T-Magnetfelds am Einsatzort fehlerfrei funktionieren. Eine mechanische Lösung würde Durchgänge durch die Vakuumkammer erfordern, welche zu vermeiden sind. Da Kontaktschalter im Vakuum nicht zuverlässig funktionieren (sogenanntes Kontaktlöten), wurde letztlich ein optisches System gewählt. Ein solches System ist der optische Taster des Typs IRS-U-2LA von Tippkemper. Diese Taster bestehen im Wesentlichen aus einer 880 nm-Leuchtdiode und einer auf diese Wellenlänge empfindlichen Photodiode. Das Signal der Leuchtdiode wird in einen Lichtwellenleiter eingekoppelt, am Zielort frei übertragen und in einen zurücklaufenden Lichtwellenleiter eingekoppelt, wobei die Lichtwellenleiter mit bis zu 15 m Länge die Entfernung vom Experiment bis außerhalb des Sperrbereichs überbrücken können. Die Lichtwellenleiter existieren in zwei Varianten: Sie können als ein gemeinsamer Lichtwellenleiter geführt werden, womit eine Reflexion gemessen werden kann, oder die beiden Lichtwellenleiter werden getrennt geführt, womit eine Lichtschranke aufgebaut werden kann. Beide Möglichkeiten werden verwendet, um unterschiedliche Anforderungen zu erfüllen.

Der Reflexion messende Lichtwellenleiter dient der Lagekontrolle des Schlittens und zur Identifikation der Position; die Lichtschranke dagegen soll im vorderen Bereich der Targetkammer parallel zum Strahl geführt werden. Die Position soll dabei so gewählt werden, dass die Schubstangen der Targetmotoren im ausgefahrenen Zustand die Lichtschranke unterbrechen.

Das System ist vom Hersteller für die Anwendung in Hochdruck- oder Schmutzbereichen gedacht, jedoch ist die Anwendung im Vakuum bei Verwendung hierfür geeigneter Glasfasern realisierbar. Die Ausgabe des Lesekopfs ist ein analoges Signal zwischen $(0,05 \pm 0,02)$ V und $(10,50 \pm 0,02)$ V bei einem Strom zwischen $(0,10 \pm 0,04)$ mA und $(21,00 \pm 0,04)$ mA. [Tip09] Der Spannungspegel wird digitalisiert und steht für die weitere elektronische Verarbeitung zur Verfügung.

2.6 BeagleBone Black

Als Host für die verwendeten PMD101 dient ein BeagleBone Black; dies ist ein kostengünstiger Einplatinen-Computer auf Basis eines ARM Cortex-A8-Prozessors. Als Betriebssystem wurde Debian 8.4 von Beagleboard.org in der Version vom 27.09.2015 mit dem Kernel 4.1.8-ti-r18 installiert. Das Board verfügt über einen Ethernet- und einen USB-Anschluss, die insgesamt 6 nötigen PMD101 werden über einen USB-HUB angeschlossen.

Außerdem verfügt der BeagleBone über 92 Allzweck-Ein/Ausgabe-Kontakte (GPIO). Diese können verwendet werden, um bis zu 4 Erweiterungsplatinen - sogenannte Capes - anzuschließen, womit die Fähigkeiten des BeagleBone erweitert werden können. Alternativ können mit diesen auch Logik-Signale eingelesen und ausgegeben werden. Einige der GPIO lassen sich als ADC¹ konfigurieren (siehe Kap. 3.2.4); diese

¹Analog-Digital-Konverter

werden in der vorliegenden Arbeit verwendet, um die Signalpegel des Lichttasters zu digitalisieren. Der Signalpegel kann im Folgenden von der Kontrollsoftware zur Positionserkennung eingelesen werden.

Bisher nicht verwendet könnten die im BeagleBone Black integrierten Echtzeit-Einheiten für zukünftige Revisionen interessant sein. Es könnten zum Beispiel die Signale des Lichttasters in Echtzeit verarbeitet werden und damit zu einer genaueren Positionierung führen.

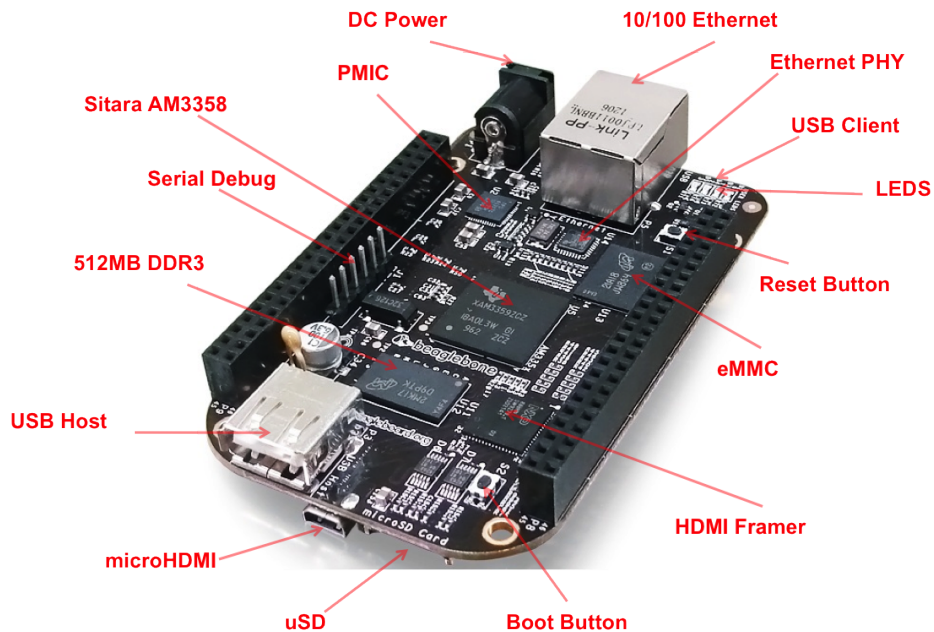


Abb. 2.9: BeagleBone Black, die wesentlichen Komponenten sind markiert. [Bea17]

3 Die Steuerlogik für das primäre Target

Die Steuerung muss zwei grundlegende Dinge sicher bewerkstelligen: den Wechsel zwischen verschiedenen Targets bei möglicher Beschädigung und die präzise Positionierung im Strahl während des Experiments. Hierfür dient die bereits beschriebene Hardware, welche nach entsprechender Vorbereitung (siehe Kap. 3.2) miteinander kommunizieren kann.

Dabei existieren für die primären Targets drei verschiedene Positionen:

- die sichere Position - Target außerhalb des Strahlrohrs
- die Strahlvorbereitungs-Position - das momentan genutzte primäre Target ist durch die Strahlachse hindurch geführt und befindet sich einen Millimeter von der gegenüberliegenden Wand entfernt
- die Messposition - das momentan genutzte primäre Target befindet sich im Halo des Strahls auf der Seite des Sekundärtargets.

Es befinden sich immer vier der primären Targets in sicherer Position, zusätzlich befindet sich das fünfte in dieser Position, wenn ein Targetwechsel nötig ist.

Während einer Messung soll der Abstand zwischen primärem und sekundärem Target minimiert werden ($c\tau(\Xi^-) = 4,91 \text{ cm}$ [Pat+16]). Dazu muss vor der Vorbereitung des Strahls das primäre Target aus der sicheren Position heraus durch Bewegung des entsprechenden Motors um etwa 2,5 cm in die Strahlvorbereitungs-Position gebracht werden. Die 2,5 cm ergeben sich aus dem Durchmesser der Strahlröhre und der Zugabe zum „Parkplatz“ der nicht verwendeten primären Targets.

Wenn der Strahl präpariert ist, muss das Target an die Position gebracht werden, an der die Designluminosität beziehungsweise –wechselwirkungsrate erreicht wird. Da die Anzahl der Strahlteilchen durch Interaktionen mit dem Target abnimmt, muss das Target in Richtung Strahlachse bewegt werden, damit die Reaktionsrate konstant bleibt.

Der Z-Motor dient dazu, bei Bedarf eines Target-Wechsels den Schlitten zu bewegen. Diese Bewegung darf nur ausgeführt werden, wenn die primären Targets sich in der sicheren Position befinden. Die Genauigkeit, mit der die nächste Position angefahren werden soll, ist 0,1 mm. Dies lässt genügend Platz um das primäre Target durch die Aussparung im Strahlrohr (2 mm) in dieses hinein zu führen.

Bei allen Bewegungen muss darauf geachtet werden, dass das sehr fragile primäre Target nicht gegen ein Hindernis fährt, da es schon durch kleine mechanische Belastung brechen könnte. Da kein direktes Positionsfeedback für die Targetmotoren existiert,

tiert, ist es hierfür notwendig, den Hub des Motors in beide Richtungen durch einen geeigneten Endanschlag zu begrenzen. Wird das Target aus dem Strahlrohr gezogen, kann dies der Motorblock leisten, für die andere Richtung muss die Vakuumkammer einen geeigneten Endanschlag bieten. Dieser darf keine Last auf den Halterahmen des Filamenttargets ausüben, sondern muss an der Vorderseite der Schubstange angreifen. Für die Positionierung dazwischen ist der absolute Wert kaum ausschlaggebend, wichtiger ist die Wechselwirkungsrate. Diese ist abhängig von den jeweiligen Strahlparametern - dessen Form und Intensität - und kann während des Experiments mittels der gemessenen Daten des Luminositätsdetektors bestimmt und durch Verfahren des Targets angepasst werden.

Um an die Daten des Luminositätsdetektors zu kommen, muss die gesamte Steuerlogik entweder in EPICS¹ implementiert werden oder eine entsprechende Schnittstelle zur Kommunikation bieten, da EPICS als Kontrollsystem für den PANDA-Detektor gewählt wurde.

Zusätzlich muss beim Erstellen der Steuerlogik schon an eine benutzerfreundliche, möglichst einfache Bedienung mittels einer grafischen Oberfläche gedacht werden.

3.1 EPICS

EPICS [EPI16] ist eine Softwareumgebung, die weltweit zum Entwickeln von verteilten Kontrollsystemen verwendet wird. Diese dezentrale Art des Steuernetzwerkes wird auch in PANDA verwendet. Jeder Subdetektor baut zunächst sein eigenes Steuernetz auf, diese werden dann über Gateway-Rechner miteinander verknüpft. Das Konzept reduziert die Netzwerklast erheblich, da nicht alle Parameter der Subdetektoren für den allgemeinen Betrieb des Detektors von Belang sind und so im entsprechenden Subnetz verbleiben. Für das Hyperkernexperiment ist ein gemeinsames Subnetz aus den beiden Teilen des Targetsystems und dem Germaniumdetektor vorgesehen. Die einzelnen Subnetze von PANDA sind in Abb. 3.1 dargestellt.

Die vorliegende Arbeit verwendet für die Entwicklung der Steuerlogik ebenfalls EPICS. Dafür wurde zunächst auf dem BeagleBone Black EPICS aus den vorkompilierten Paketen² installiert. Dabei wurden die in Tab. 3.1 aufgeführten Versionen verwendet.

Tab. 3.1: Installierte EPICS-Komponenten und deren Version

Name	Paketname	Version
EPICS base	epics-dev	3.14.12.5-4+deb8u2
StreamDevice	stream-dev	2.6c-1+deb8u1
Sequencer	seq-dev	2.2.3-3+deb8u1
Asyn-Treiber	asyn-dev	4.28-1+deb8u1
GPIO-Treiber	devgpio	1.0.4-1+deb8u1

¹Experimental Physics and Industry Control System

²<http://panda-service.gsi.de/repo/>

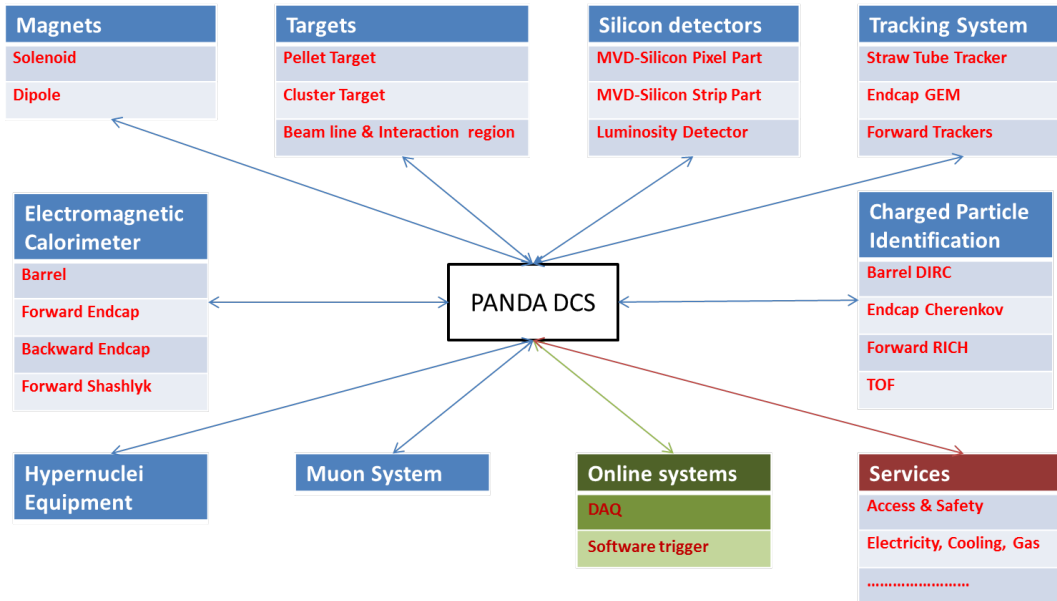


Abb. 3.1: Das \bar{P} ANDA-Detektor-Kontrollsystem und die Aufteilung auf die einzelnen Subsysteme [Tob15]

Die Kommunikation verschiedener Input-/Output-Controller (IOC) erfolgt dabei über das *Channel Access*-Protokoll, welches Teil des *EPICS base*-Pakets ist.

Die einfachste Möglichkeit um einen neuen IOC zu erstellen ist das mitgelieferte Skript *makeBaseApp*, welches beim Ausführen die nötige Ordnerstruktur und Vorlagen erstellt sowie entsprechende Makros erzeugt. Innerhalb dieser Ordnerstruktur befindet sich die Datei `./iocBoot/ioc<iocname>/st.cmd` (siehe CD), welche das Startskript dieses IOC ist. In diesem Skript müssen grundlegende Einstellungen, wie zum Beispiel die Kommunikationsrate angeschlossener Hardware, erfolgen.

Die Steuerung von EPICS aus der IOC-Konsole erfolgt über die beiden Befehle `dbgf <Name>.<Feld>` und `dbpf <Name>.<Feld> <Wert>`, welche eine sogenannte Prozessvariable (PV) der selbstgeschriebenen Datenbank auslesen beziehungsweise schreiben; der Name der PV muss dabei im Netzwerk eindeutig sein. Eine alternative Möglichkeit bieten die Linuxkonsolenbefehle *caput*, *caget* und *camonitor*. Die ersten beiden funktionieren dabei analog zu *dbpg* und *dbgf*; *camonitor* überwacht die PV und gibt bei jeder Änderung den Wert und Zeitpunkt aus. Für die noch folgenden Messungen in Kap. 4 ist dieser Befehl daher essentiell.

Eine PV ist dabei vergleichbar mit einer C-Datenstruktur. Das heißt die PV hat mehrere Attribute (oder Felder). Manche davon sind für alle Typen von PVs gleich, wie beispielsweise das „TIME“-Feld, das den Zeitpunkt des letzten Aufrufes speichert. Andere, wie zum Beispiel das „VAL“-Feld, das den Wert des letzten Aufrufes der PV enthält, unterscheiden sich je nach Art der PV. Außerdem werden Ein- und Ausgabevariablen unterschieden.

Die verschiedenen in dieser Arbeit verwendeten Typen von PVs sind

- Binäres Input & Output (bi bzw. bo)
- String Input & Output (stringin bzw. stringout)
- Analoges Input & Output (ai bzw. ao)
- Berechnung (calcout)
- Long Input & Output (longin bzw. longout).
- Verzweigung (fanout)

Um eine PV zu erzeugen muss ein *record* in der Datenbank angelegt werden. Als Beispiel für eine PV ist in Code 3.1 das Auslesen eines GPIO-PINS gezeigt. Das Schlüsselwort um eine PV zu erzeugen ist *record*, im Anschluss müssen direkt der Typ und der im Netzwerk eindeutige Name der PV genannt werden. Das Feld DTYP nennt den Typ der Kommunikation; im Beispiel ist dies *devgpio*³, eine andere Möglichkeit wäre *stream*⁴. Die nächsten Zeilen sagen aus, dass Pin P8_7⁵ des BeagleBone Black active low⁶ ausgelesen werden soll, sobald auf diesem ein neues Signal anliegt. Zeile 5 gibt an, dass am Schluss des Vorgangs die PV *PANDAHYP:BBB3:Position* aufgerufen wird, während die letzte Zeile den Aufruf der PV beim Starten der Software erledigt. Das Feld *INP* existiert dabei für alle PVs, die Daten erhalten, für sendende PVs lautet der Eintrag *OUT*. Anstatt auf einen I/O Interrupt zu warten, könnte man die PV periodisch ausführen oder passiv setzen, indem ein entsprechender Wert im SCAN-Feld eingetragen wird. Eine passive PV kann manuell oder von einer anderen PV angestoßen, mittels Vorwärts-Link (FLNK-Feld), gerufen werden.

Code 3.1: Auslese des GPIO 8_7

```
1 record( bi, "PANDAHYP:BBB3:SWT1" ){
2   field( DTYP, "devgpio" )
3   field( INP, "@P8_7 L" )
4   field( SCAN, "I/O Intr" )
5   field( FLNK, "PANDAHYP:BBB3:Position" )
6   field( PINI, "YES" )
7 }
```

Die PV-Typen stringin/stringout sowie ai/ao funktionieren analog zu den Typen bi/bo, wobei ein analoges Signal dem Datentyp *double* entspricht und ein string aus 40 Zeichen besteht. Die PV vom Typ *calcout* hat kein direktes Hardware-Interface; stattdessen ermöglicht sie bis zu 12 PVs mathematisch zu verknüpfen und hat weitere,

³devgpio liest oder schreibt auf GPIO-Pins

⁴stream ist ein Support-Interface zur Kommunikation mittels Datenstrom und benötigt Stream-Device

⁵für eine Erklärung der Bezeichner siehe CD

⁶elektrische 0 ist logische 1

in dieser Arbeit jedoch nicht benötigte, Fähigkeiten. Die PV fanout (Verzweigung) schließlich dient dazu nach dem Abarbeiten einer PV nicht nur eine weitere, sondern bis zu sechs PVs zu rufen, welche über die Felder LNK1–LNK6 angegeben werden. Dabei kann über die Felder SELM, SELN und SELL festgelegt werden, welche verbundenen PVs aufgerufen werden. Alle PVs, die so gerufen werden sollen, müssen im SCAN-Feld den Eintrag passiv haben.

Um einen record zu nutzen, muss im Startskript (st.cmd) die .db-Datei, in der er liegt, mit `dbLoadRecords("<Dateiname>")` geladen werden.

Anstatt für jede benötigte Instanz einen eigenen record zu schreiben, ist es möglich die records der Datenbank als Vorlage zu schreiben, indem mit `${X}` eine Variable X erzeugt wird, die aus einer Substitutions-Datei eingelesen wird. Um beim Beispiel zu bleiben, könnte man statt `SWT1` auch `SWT${NUMBER}` und statt `@P8_7` auch `@${PIN}` schreiben, wie es in Code 3.2 dargestellt ist. Die Variablen werden dann aus einer anderen Datei ersetzt, die für das Beispiel in Code 3.3 dargestellt ist. Die erste Zeile gibt dabei an, in welcher Datei die Ersetzungen vorzunehmen sind. Die geschweiften Klammern in Zeile 2 und Zeile 10 gruppieren die in den dazwischen liegenden Zeilen deklarierten Ersetzungen als zur in Zeile 1 genannten Datei gehörig; dies ist notwendig, da mehrere Substitutions-Sets durch Hintereinandersetzen aus einer Datei geladen werden können.

Die eigentlichen Ersetzungen werden mit dem Stichwort *pattern* eingeleitet, wobei in geschweiften Klammern die jeweils zu ersetzenden Variablen folgen (Zeile 3). In den folgenden Zeilen werden - in derselben Reihenfolge und auch jeweils in geschweiften Klammern - die Werte der Variablen genannt.

Zusätzlich muss in diesem Fall statt des Befehls `dbLoadRecords("<Dateiname>")` der Befehl `dbLoadTemplate("<Dateiname>")` verwendet werden, wobei `<Dateiname>` nicht auf das Muster verweist, sondern auf die Datei, in der die Substitutionen gelistet sind.

Code 3.2: Template zur Auslese verschiedener GPIO-PINS

```

1 record( bi, "PANDAHYP:BBB3:SWT${NUMBER}" ){
2     field( DTYP, "devgpio" )
3     field( INP, "@${PIN} L" )
4     field( SCAN, "I/O Intr" )
5     field( FLNK, "PANDAHYP:BBB3:Position" )
6     field( PINI, "YES" )
7 }

```

StreamDevice ist ein allgemeiner EPICS Geräte-Support zur seriellen Kommunikation. Das Modul hat eine Schnittstelle zum Asyn-Treiber, welcher Low-Level-Unterstützung für verschiedene Bus-Systeme - darunter USB - bietet.

Code 3.3: GPIO-Substitutions-Datei

```
1 file "<record-Datei>"
2 {
3   pattern { NUMBER, PIN }
4   { 1, P8_7 }
5   { 2, P8_8 }
6   :
7 }
```

Zur Implementierung der Befehle der Steuergeräte wurde daher StreamDevice gewählt.

3.2 Vorbereitende Programmierung

Es werden zunächst vier notwendige Schritte erläutert, die zum Funktionieren der Steuerlogik unabdingbar sind. Zum einen muss ein StreamDevice-Protokoll geschrieben werden, welches die von EPICS gesendeten Befehle in die Sprache des Motor-Steuergeräts übersetzt. Des Weiteren muss sichergestellt werden, dass die Steuergeräte eindeutig identifiziert werden: Es bringt nichts am Ende erkennen zu können, dass Position A erreicht wurde, und dann wird durch eine falsche Identifikation der Steuergeräte Motor B gefahren. Schließlich muss auch die EPICS-Datenbank geschrieben und der ADC des BeagleBone Black aktiviert werden.

3.2.1 StreamDevice-Protokoll

Der erste Schritt zum Entwickeln der Logik war, den Motor überhaupt mit EPICS steuern zu können. Die vom PMD101 erwarteten, seriellen Befehle⁷ wurden in den StreamDevice-Protokollen⁸ umgesetzt.

Als Beispiel der Umsetzung des StreamDevice-Protokolls ist in Code 3.4 die Umsetzung eines Fahrbefehls gezeigt. Die erste Zeile dient dabei der Identifikation des Protokolls. In der zweiten Zeile wird ein großes *D* gesendet. Unmittelbar daran folgt die Anzahl an Mikroschritten, die der Motor fahren soll. Abhängig vom Vorzeichen fährt der Motor in die eine oder andere Richtung, wobei eine negative Zahl die Schubstange ausfährt.

Die dritte Zeile, welche nur bei Befehlen ohne Antwort implementiert wurde, veranlasst das Programm 50 ms zu warten, wobei die Zeitspanne willkürlich ist und nur dazu dient überlappende Befehle zu verhindern, da dies zu Fehlern während der Ausführung führen kann.

⁷ vollständige List im technischen Handbuch auf CD

⁸ PMD101.proto auf CD

Code 3.4: Senden eines Fahrbefehls über den PMD101

```

1 Drive_D{
2     out "D%d";
3     wait $std_wait;
4 }

```

Wenn die angeschlossene Hardware eine Antwort sendet, wird diese, wie in Code 3.5, Zeile 3 gezeigt, eingelesen und an EPICS weitergegeben.

Code 3.5: Lesen wie viele Mikroschritte der Motor noch zu fahren hat

```

1 Read_D{
2     out "d";
3     in "d %d";
4 }

```

Wie die beiden Beispiele zeigen, ist der PMD101 sensitiv auf Groß-/Kleinschreibung; dabei ist ein Großbuchstabe durchgängig dafür zuständig, einen Befehl zu senden; ein Kleinbuchstabe dagegen liest die entsprechende Einstellung aus.

Umgesetzt wurden neben den beiden bereits gezeigten Befehlen die Möglichkeiten die Geschwindigkeit und die Wellenform zu ändern, diese Einstellungen zu speichern sowie ein alternativer Fahrbefehl, bei dem ein Schritt - unabhängig von der eingestellten Geschwindigkeit - in 2048 Mikroschritte geteilt ist. Um sicherstellen zu können, dass sich bei einer Neubeschaffung eines Steuergeräts die Firmware nicht geändert hat - womit sich die Steuerbefehle ändern könnten - wurde ein Protokoll zum Auslesen der Firmware geschrieben. Zusätzlich wurden Protokolle geschrieben, die für einen angeschlossenen Encoder nötig sind, auch wenn diese nicht benötigt werden.

Damit existieren die StreamDevice-Protokolle, so dass EPICS prinzipiell mit dem PMD101 kommunizieren kann.

3.2.2 Motor-Identifikation

Jedes Gerät, mit dem kommuniziert werden kann, wird unter Linux wie eine Datei behandelt; die Kommunikation erfolgt durch Lese-/Schreibzugriffe auf die Datei.

Abhängig von der Reihenfolge des Anschließens wird für die Steuergeräte eine Datei namens `/dev/ttyUSB#` angelegt, wobei `#` eine laufende Nummer ist, die bei 0 beginnt.

Dies bedeutet auch, dass zum Beispiel nach einem Stromausfall die Geräte nicht unbedingt wieder so angesprochen werden wie zuvor. Damit die Steuerlogik in einem solchen Fall noch richtig funktioniert, muss eine immer gleiche Identifikation sichergestellt sein.

```

primtarget@PandaHyp8883:/dev$ ls -l ttyUSB*
crw-rw---- 1 root dialout 188, 0 Mär 22 13:01 ttyUSB0
crw-rw---- 1 root dialout 188, 1 Mär 22 13:01 ttyUSB1
crw-rw---- 1 root dialout 188, 2 Mär 22 13:01 ttyUSB2
crw-rw---- 1 root dialout 188, 3 Mär 22 13:01 ttyUSB3
crw-rw---- 1 root dialout 188, 4 Mär 22 13:01 ttyUSB4
crw-rw---- 1 root dialout 188, 5 Mär 22 13:01 ttyUSB5
lrwxrwxrwx 1 root root      7 Mär 22 13:01 ttyUSBMotorX1 -> ttyUSB4
lrwxrwxrwx 1 root root      7 Mär 22 13:01 ttyUSBMotorX2 -> ttyUSB2
lrwxrwxrwx 1 root root      7 Mär 22 13:01 ttyUSBMotorX3 -> ttyUSB0
lrwxrwxrwx 1 root root      7 Mär 22 13:01 ttyUSBMotorX4 -> ttyUSB1
lrwxrwxrwx 1 root root      7 Mär 22 13:01 ttyUSBMotorX5 -> ttyUSB3
lrwxrwxrwx 1 root root      7 Mär 22 13:01 ttyUSBMotorZ  -> ttyUSB5
primtarget@PandaHyp8883:/dev$

```

Abb. 3.2: Ergebnis der udev-Regeln für die Motor-Steuergeräte, in gelb die eigentlichen Anschlüsse, in türkis die Verknüpfungen dazu.

Für die Verwaltung der angeschlossenen Geräte ist der Dienst *udev* zuständig; es ist möglich diesem Dienst mittels Regeln mitzuteilen, dass eindeutig identifizierte Geräte über einen symbolischen Link immer gleich angesprochen werden können.

Mittels des Befehls `udevadm info -query=all -attribute-walk -name=/dev/ttyUSB#` können die Eigenschaften der einzelnen Steuergeräte untersucht werden; dabei wird auch die Seriennummer des internen USB-RS232-Konverters ausgegeben. Diese Seriennummer kann zur eindeutigen Identifizierung genutzt werden.

Dafür wird die Datei `99-usb-motor.rules` (siehe CD) im Ordner `/etc/udev/rules.d/` angelegt, die für jedes Steuergerät einen symbolischen Link erzeugt. Ein Beispiel für diese Regeln ist in Code 3.6 gezeigt, die sich unterscheidenden Attribute - die Seriennummer und der symbolische Link - sind farblich hervorgehoben. Wie in Abb. 3.2 zu sehen ist, wird den eigentlichen Anschlüssen (gelbe Zeilen) ein symbolischer Link zugeordnet. Diese sind türkis dargestellt.

Code 3.6: Identifikation des Z-Motors

```

1 SUBSYSTEM=="tty", ATTRS{manufacturer}=="FTDI", ATTRS{product
  ↳ }=="PiezoMotor PMD101", ATTRS{serial}=="A1YUET9I" ,
  ↳ SYMLINK+="ttyUSBMotorZ"

```

3.2.3 Datenbank

Die Kommunikation mit den Steuergeräten erfolgt über den Asyntreiber, dessen Konfiguration direkt im EPICS-Startupskript erfolgt. Dort ist den gerade erzeugten symbolischen Links ein Asynport namens `ttyZ` beziehungsweise `ttyX#` zugeordnet und die Kommunikationsrate eingestellt.

Da die Motorsteuergeräte identisch sind und damit dieselben Befehle verarbeiten, wurden die records zur Motor-Kontrolle als Template angelegt und mit einer Sub-

Code 3.7: PMD101 Substitution

```

1 file "/home/primtarget/target/db/PMD101.db"
2 {
3   pattern{ Motor, Port }
4   { MotorZ, ttyZ }
5   { Motor1, ttyX1 }
6   { Motor2, ttyX2 }
7   { Motor3, ttyX3 }
8   { Motor4, ttyX4 }
9   { Motor5, ttyX5 }
10 }

```

stitutionsliste die einzelnen PVs angelegt. Das Substitutionsmuster ist in Code 3.7 gezeigt.

Die zwei Prozessvariablen, die mit den obigen Beispielen des StreamDevice-Protokolls korrespondieren, sind in Code 3.8 dargestellt. Im Unterschied zum Beispiel aus Kap. 3.1, in welchem der Datentyp *devgpio* war, ist der Datentyp in diesem Fall *stream* (Zeilen 2, 7). In Zeile 3 beziehungsweise 8 wird deklariert, dass die Befehle *Drive_D* beziehungsweise *Read_D* aus der Datei *PMD101.proto* aufgerufen werden. Die Variable *\$Port* wird dabei durch den Wert ersetzt, der dem gerade anzusprechenden Motor entspricht. Der zweite gezeigte record (Zeile 6 und folgende) wird alle 0,1 s ausgelesen und gibt so bei einer Abfrage den aktuellen Wert der noch zu fahrenden Mikroschritte zurück.

Code 3.8: Fahrbefehl in Mikroschritten senden und noch zu fahrende Mikroschritte einlesen

```

1 record( longout , "PANDAHYP:BBB3: ${Motor}: Drive " ){
2   field( DTYP, "stream" )
3   field( OUT, "@PMD101.proto Drive_D ${Port}" )
4 }
5
6 record( longin , "PANDAHYP:BBB3: ${Motor}: Read " ){
7   field( DTYP, "stream" )
8   field( INP, "@PMD101.proto Read_D ${Port}" )
9   field( SCAN, ".1 second" )
10 }

```

Die definierten records für die Motorsteuerung - neben den beiden bereits gezeigten unter anderem records zum Einstellen und Auslesen der Frequenz sowie einer zum Auslesen der Firmware - lassen sich auf der CD in der *PMD101.db* finden.

3.2.4 Aktivierung des ADC

Die GPIOs des BeagleBone Black haben bis zu 8 Modi (siehe Tab. PinHeader in Anhang C oder auf CD). Die einzelnen Modi dienen dazu, unterschiedliche Anwendungsgebiete abzudecken. Nicht alle GPIOs des BeagleBone Black lassen sich ohne weiteres für I/O-Operationen verwenden, da diese zum Teil für verschiedene Funktionen wie HDMI oder Ethernet reserviert sind. Um einen alternativen Modus zu aktivieren, muss ein Device Tree Overlay (DTO) verwendet werden. Der Device Tree ist eine Möglichkeit die Hardware eines Systems zu beschreiben. Um Linux-kompatibel zu sein muss jedes neu auf den Markt gebrachte ARM-System, wie beispielsweise das BeagleBone Black, einen Device Tree bereitstellen. Nachteilig beim Device Tree ist, dass es zunächst nicht möglich war, das System im laufenden Betrieb zu ändern.

Hierfür wurden DTOs entwickelt. DTOs erlauben es beispielsweise auch einen GPIO von *active low* auf *active high* zu setzen sowie einen für Input vorkonfigurierten GPIO als Output zu nutzen.

Um den ADC des BeagleBone Black zu aktivieren, ist es nötig das zugehörige DTO zu aktivieren. Dieses ist zunächst nicht installiert, sondern befindet sich im Projekt `bb-overlays` auf `github.com`⁹. Zusätzlich benötigt man die Software `dtc`.

Nachdem die vorkonfigurierten DTOs heruntergeladen wurden, muss in den entsprechenden Ordner gewechselt werden um dort die Dateien `dtc-overlay.sh` und `install.sh` auszuführen. Nach einem Neustart des Systems stehen die vorkonfigurierten DTOs zur Verwendung bereit.

Um nun das DTO zu verwenden, muss die zugehörige `.dts`-Datei aus dem Ordner `/lib/firmware/` nach `~/bb.org-overlays/src/arm/` verschoben und in `~/bb.org-overlays/` die `install.sh` ausgeführt werden. Nach einem Neustart und Anmeldung als root muss im Ordner `/sys/devices/platform/bone_capemgr/` der Befehl `echo ADC > slots` ausgeführt werden. Mittels `echo -# > slots` im gleichen Ordner lässt sich das in Zeile # definierte DTO wieder deaktivieren.

Um den ADC mit EPICS lesen zu können ist es nötig, die Datei des ADC einzulesen und in ein Format zu übersetzen, welches EPICS versteht. Dies wurde in Code 3.9 (vollständig auf CD) umgesetzt. Außerdem wird der für die Lichttaster benötigte 7:1-Spannungsteiler durch Multiplikation rückgängig gemacht (Zeile 17).

Um eigene DTOs zu erzeugen, muss zunächst die nötige Anzahl an freien GPIOs identifiziert werden. In `/sys/kernel/debug/pinctrl/44e10800.pinmux/pinmux-pins` sind freie GPIOs als *unclaimed* eingetragen. Die Tabelle in Anhang C hilft die notierte Pin-Nummer in die physikalische Adresse und die von außen zugänglichen Pin Header zu übersetzen.

Im Anschluss an diese notwendigen Vorarbeiten konnte die Steuerlogik entwickelt werden.

⁹<https://github.com/RobertCNelson/bb.org-overlays>

Code 3.9: Bereitstellen des ADC für EPICS

```

1 //*****Zeilen ausgelassen*****
2 static long init_record( aiRecord *prec ){
3 //*****Zeilen ausgelassen*****
4 /* setzt filehandle auf /sys/bus/iio/devices/iio:device0:
   ↪ in_voltage */
5 * und kopiert dieses nach prec->dpvt. Dies ist noetig, da
   ↪ ein einlesen des Filehandles aus einem String zu
   ↪ Fehlern mit dem aktiven record fuehrt.
6 */
7
8 /* read function for record instance */
9 static long read_ai( aiRecord *prec ){
10 FILE * filehandle;
11 int value = 0;
12 double voltage = 0.;
13
14 filehandle = fopen( (char*)prec->dpvt, "r" );
15 //*****Zeilen ausgelassen*****
16 /*Read ADC value*/
17 fscanf( filehandle, "%d", &value );
18 /*Calculate Voltage from ADC value. ADC behind 7:1 voltage
   ↪ divider*/
19 voltage = value/4095.*1.8 * 7;
20 /*Write ADC to records value field*/
21 prec->val = voltage;
22 fclose( filehandle );
23 return 2;
24 }
25 //*****Zeilen ausgelassen*****

```

3.3 Automatisierung mit EPICS

EPICS bietet zusätzlich zu den eben erläuterten Software-Teilen einen sogenannten Sequencer, welcher die Steuerung des IOC automatisiert. Dieser wird dann notwendig, wenn die Aufrufe mittels des FLNK-Feldes und der Verzweigungs-PV nicht mehr ausreichen. Die Idee hinter dem Sequencer ist ein endlicher Zustandsautomat, wobei mehrere solcher Automaten parallel aktiv sein können. Die Sprache der Automaten ist *State Notation Language* (SNL); diese besteht aus einem kleinen Teil der Programmiersprache C und Befehlen, welche den Automaten spezifizieren bzw. mit PVs verbinden. Die weiteren Befehle sind:

- *ss*: Schlüsselwort für einen Zustandsautomaten,
- *state*: Schlüsselwort für einen einzelnen Zustand,
- *assign* verbindet Variablen mit einer PV,
- durch *monitor* wird eine Variable geändert, wenn die verbundene PV einen anderen Wert annimmt,
- die Interaktion mit den PVs mittels *pvPut* und *pvGet*.

Der Zustandsautomat bleibt jeweils in einem Zustand, bis eine Bedingung (Schlüsselwort *when*) den Wahrheitswert *true* hat, und geht am Ende jenes Blockes in den dort aufgeführten Zustand über, welcher auch derselbe wie zuvor sein kann. Zusätzlich zu diesen Bedingungen können ein *entry*- und ein *exit*-Block deklariert werden, welche – je nach gewählter Zustandsoption – entweder immer oder nur beim Wechseln aus einem beziehungsweise in einen anderen Zustand sofort abgearbeitet werden.

Bevor eine solche Sequenz aufgerufen werden kann, muss diese jedoch nach C und von dort aus in Maschinensprache übersetzt werden. Hierzu ist es notwendig, die Sequenz *PrimaryTargetControl*, welche in der Datei *PrimaryTargetControl.stt* (siehe CD) geschrieben ist, mittels der Datei *PrimaryTargetControl.dbd* zu registrieren. Der Inhalt dieser *.dbd*-Datei ist in Code 3.10 gezeigt. Werden diese beiden Dateien an entsprechender Stelle im Makefile (siehe CD) eingetragen, so bewirkt ein Aufruf von *make*, dass der SNL-Code nach C und von dort aus nach Assembler übersetzt wird. Um die Sequenz schließlich aufzurufen, kann der Befehl *seq PrimaryTargetControl* in die EPICS-Shell eingegeben, oder als letzte Zeile ins Startup-Skript *st.cmd* geschrieben werden. Als Beispiel für einen Zustand wird in Code 3.11 der Zustand

Code 3.10: Registrieren der Sequenz PrimaryTargetControl

```
1 registrar ( PrimaryTargetControlRegistrar )
```

gezeigt, welcher durchlaufen werden muss, um das Experiment auf einen neuen Strahl vorzubereiten.

Die erste Zeile benennt den Zustand als *BeamFill*, die Zeilen 2-5 sind der *entry*-Block, in dem der verwendete Target-Motor den Befehl erhält die Schubstange um 1 000 000 Mikroschritte auszufahren. Die Auflösung beträgt bei der gewählten Geschwindigkeit von 600 Schritte/s 128 Mikroschritte/Schritt, so dass die tatsächliche Fahrstrecke bei unbelastetem Motor etwa 5 cm beträgt; dies ist größer als die benötigte Strecke von etwa 2,5 cm (sichere Position nach Strahlvorbereitungs-Position) und wurde - falls der Motor doch gegen eine Last arbeiten muss - bewusst gewählt.

In den Zeilen 21-24 ist der Übergang aus dem Zustand Stopped in den Zustand BeamFill deklariert. Während des Übergangs wird nur die Übergangsvariable wieder auf 0 gesetzt (Zeile 22, 23). Der neu erreichte Zustand sendet an den Motor des derzeit verwendeten primären Targets einen Fahrbefehl (*entry*-Block, Zeilen 27-30) und geht nach Abarbeiten des Fahrbefehls wieder in den Zustand Stopped über (Zeilen 32-35). Während dieses Übergangs wird an den HESR kommuniziert, dass die Strahlvorbereitungs-Position erreicht wurde.

Der SNL-Code wird vom Compiler in C-Code umgewandelt. Es ist möglich, alle in C deklarierten Funktionen zu nutzen. Zusätzlich ist es über den sogenannten C-Escape möglich eigene Funktionen zu deklarieren und zu nutzen.

Code 3.11: Ein Zustand der Steuerlogik

```

1
2 program PrimaryTargetControl( ‘ ‘ Sys=PANDAHYP:BBB3 ’ ’)
3 long oDrive [6];
4 assign oDrive [6] to { “{Sys}:MotorZ:Drive”, “{Sys}:Motor1:
   ↪ Drive”, “{Sys}:Motor2:Drive”, “{Sys}:Motor3:Drive”, “{
   ↪ Sys}:Motor4:Drive”, “{Sys}:Motor5:Drive”};
5
6 long mSteps [6];
7 assign mSteps to { “{Sys}:MotorZ:Read_Drive”, “{Sys}:Motor1:
   ↪ Read_Drive”, “{Sys}:Motor2:Read_Drive”, “{Sys}:Motor3:
   ↪ Read_Drive”, “{Sys}:Motor4:Read_Drive”, “{Sys}:Motor5:
   ↪ Read_Drive”};
8 *****Zeilen ausgelassen*****
9 int rBeamFill;
10 assign rBeamFill to ‘ ‘ {Sys}:BeamFill ’ ’;
11 monitor rBeamFill;
12
13 int Ready_for_Beam; //Communicates with HESR
14 assign Ready_for_Beam with ‘ ‘ Signal:BeamReady ’ ’;
15 *****Zeilen ausgelassen*****
16 int found_position;
17 assign found_position to “{Sys}:Position”;
18
19 ss Motors{
20   state Stopped{
21     *****Zeilen ausgelassen*****
22     when(rBeamFill){
23       rBeamFill = 0;
24       pvPut(rBeamFill,SYNC);
25       strcpy(sReport [1], sReport [0]);
26       sprintf(sReport [0], ‘ ‘ Going to Beam Preparation
   ↪ Position ’ ’);
27
28     } state BeamFill
29   } //state Stopped finished
30   state BeamFill{
31     entry{
32       oDrive [found_position] = -1000000;
33       pvPut(oDrive [found_position],SYNC);
34     }
35
36     when( mSteps [found_position] == 0 ){
37       Ready_for_Beam=1;
38       pvPut(Ready_for_Beam);
39       strcpy(sReport [1], sReport [0]);
40       sprintf(sReport [0], ‘ ‘ Ready for Beam Fill ’ ’);
41     } state Stopped
42   } //state BeamFill finished
43 }

```

3.4 Grafische Nutzerschnittstelle

Die Benutzerschnittstelle wurde in *Control System Studio* (CSS) erstellt. CSS ist eine Eclipse-basierte Toolsammlung um verteilte Kontrollsysteme zu überwachen und zu bedienen. Der Sequencer von EPICS und CSS können nicht direkt miteinander kommunizieren, stattdessen muss für diese Kommunikation eine Prozessvariable erzeugt und entsprechend verknüpft werden. Die verwendete CSS-Version (css-panda¹⁰) beinhaltet zusätzlich ein Alarm-Handling sowie die Fähigkeit Daten zu archivieren. Die in dieser Arbeit verwendete Steuerlogik nutzt diese erweiterten Fähigkeiten nicht.

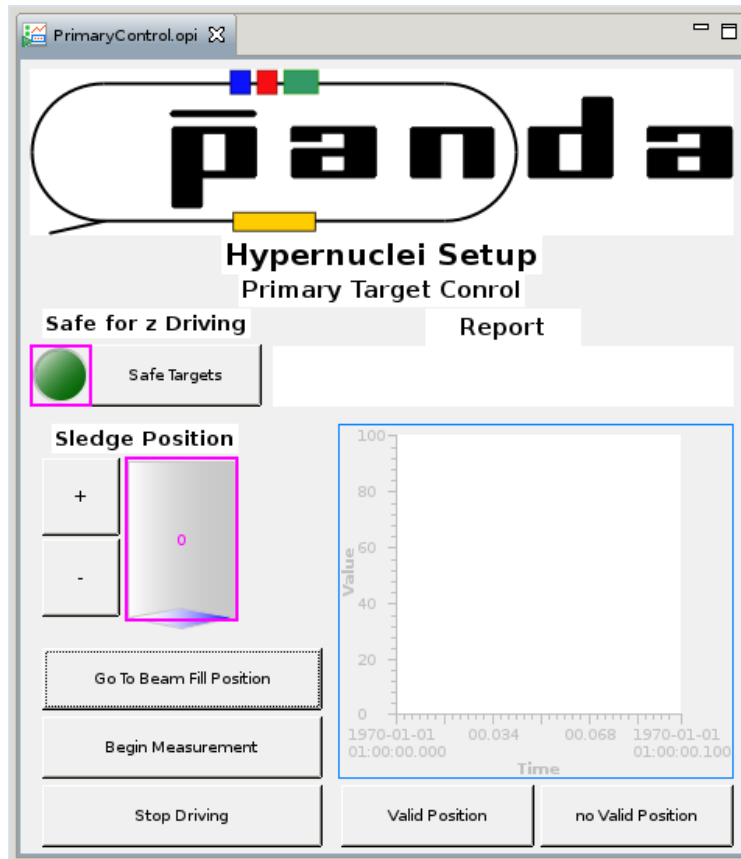


Abb. 3.3: Benutzerschnittstelle zur Steuerung der primären Targets. Das blau gerahmte Anzeigeelement dient zur Darstellung des zeitlichen Verlaufs der ADC-Werte.

Die Schnittstelle beinhaltet zwei Report-Felder, um jeweils die letzten beiden Ausgaben des Sequencers anzuzeigen. Es existiert eine Leuchtanzeige für den Status der primären Targets. Leuchtet die Anzeige auf, sind die primären Targets alle in der sicheren Position. Ein Schalter ermöglicht es, allen Target-Motoren den Befehl zum

¹⁰<https://panda-wiki.gsi.de/foswiki/bin/view/DCS/PANDACSS>

Einziehen der Schubstange zu geben. Es existieren Schaltflächen, um das primäre Target so zu fahren, dass der Strahl vorbereitet werden kann sowie zum Verfahren des Schlittens um eine Position und eine um in den Messzustand überzugehen. Für den Fall, dass ein Fehler auftritt, kann durch den entsprechenden Schalter jederzeit ein Stopp-Befehl an die Motoren gesendet werden. Schließlich sind für die Kontrolle der gefundenen Position durch den Operateur ein XY-Diagramm und zwei Schaltflächen zum Bestätigen oder Verwerfen vorhanden. Die Benutzeroberfläche ist in Abb. 3.3 dargestellt.

3.5 Der Zustandsautomat

In Abb. 3.4 ist das Zustandsdiagramm der erstellten Steuerlogik dargestellt. Die einzelnen Zustände der Steuerlogik werden in den entsprechenden Abschnitten erläutert.

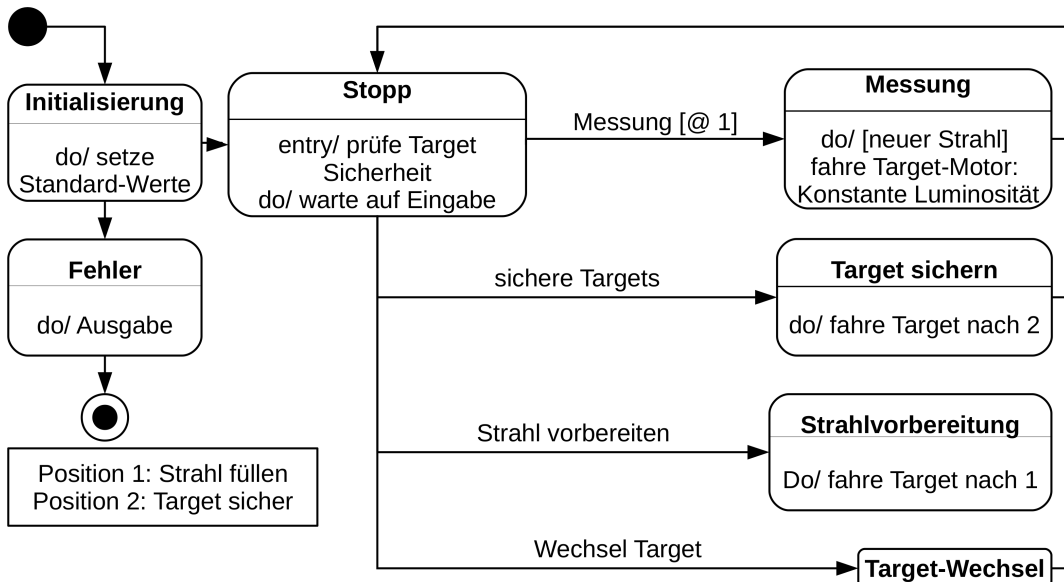


Abb. 3.4: Vereinfachtes Zustandsdiagramm der Steuerlogik. Gemäß UML-Regeln [Hoc14] ist [\langle Bedingung \rangle] eine Bedingung. Jeder Kasten entspricht einem Zustand, die Pfeile stellen die möglichen Übergänge sowie die hierfür notwendigen Befehle dar. Der Zustandsautomat wird in 3.5 erklärt.

3.5.1 Zustand „Initialisierung“

Der erste Zustand (*Initialisierung*) setzt alle ÜbergangsvARIABLEN auf 0 und prüft, ob die Firmware des PMD101 derjenigen entspricht, für die das StreamDevice Protokoll geschrieben wurde - bei einer neuen Firmware könnten sich die Befehle des PMD101

geändert haben. Andere Fehler während der Initialisierung müssten hier ebenfalls abgefangen werden.

Bei einem Fehler während der Initialisierung darf der Sequencer keine Befehle entgegennehmen, sondern muss eine entsprechende Meldung an den Operateur senden. Im Anschluss muss der Fehler geprüft und behoben sowie die Software neu gestartet werden. Treten keine Initialisierungsfehler auf, führt der Zustand in den Zustand *Stopp*.

Da EPICS in seiner Konsole meldet, wenn die zu Variablen hinterlegten PVs nicht existieren, wurde auf eine entsprechende Prüfung verzichtet.

3.5.2 Zustand „Stopp“

Der Zustand *Stopp* verknüpft die anderen Zustände der Steuerlogik miteinander; aus diesem werden die einzelnen Zustände der Logik nach entsprechendem Input des Operateurs über die Nutzerschnittstelle aufgerufen. Der Zustand berichtet jeweils an das GUI, in welchen Zustand übergegangen wird.

3.5.3 Zustand „Messung“

Der Übergang in diesen Zustand erfolgt nur, wenn sich das primäre Target an der Strahlvorbereitungs-Position befindet, da das primäre Target nicht durch den vollen Strahl fahren soll. Außerdem muss ein Signal vom HESR eingegangen sein, dass der Antiprotonenstrahl vorbereitet wurde.

Während einer Messung soll die Wechselwirkungsrate im primären Target konstant gehalten werden. Dies wird im Zustand *Messung* realisiert. Über die gemessene Luminosität \mathcal{L} lässt sich mit der Gleichung

$$\dot{N}(t) = \mathcal{L}(t)\sigma$$

die Wechselwirkungsrate $\dot{N}(t)$ berechnen; $\sigma = 400$ mbarn ist der totale Wirkungsquerschnitt der Reaktion von Antiprotonen mit einem Impuls von 3 GeV/c und Kohlenstoff [Aih+81]. Die so ermittelte Wechselwirkungsrate lässt sich mit der gewünschten Rate ($\dot{N} = 4 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$) vergleichen.

Ist die aus der gemessenen Luminosität berechnete Wechselwirkungsrate kleiner als die gewünschte Rate, so wird das primäre Target in Richtung der Strahlachse gezogen; ist die gemessene Rate um mehr als 5% größer als die gewünschte, wird das Target von der Strahlachse entfernt. Die Differenz zwischen den beiden Fahrbefehlen dient dazu, nicht aufgrund von Fehlern der Luminositätsmessung einen Fahrbefehl zu senden.

Fällt die berechnete Wechselwirkungsrate in den Zwischenbereich, so wird der Targetmotor angehalten; die abnehmende Luminosität senkt die Rate im Laufe der Zeit. Durch diese Steuerung bleibt die Abweichung von gewünschter und berechneter Wechselwirkungsrate immer unter 8,2%.

Nach 2000s Messdauer ist ein Messzyklus beendet; es wird wieder die Position zum Strahlaufbau hergestellt und in den Zustand *Stopp* übergegangen. Der Operateur kann nun entscheiden durch neuen Strahlaufbau und erneuten Übergang in

den Zustand *Messung* dasselbe Target nochmal zu verwenden oder durch Abbau des Reststrahls und Wechsel in den Zustand *Target-Wechsel* ein neues Target auswählen.

Berechnungen zur Positionsänderung bei einem angenommenen gaußförmigen Strahl mit 1 mm Strahldurchmesser zeigen, dass zum Nachführen während der ersten 2000 s eine hochpräzise Steuerung notwendig ist (Fahrstrecke in dieser Zeit: 0,6 mm). Das Ergebnis der Berechnung ist in Abb. 3.5 zu sehen. Eine weitere Verlängerung der Messdauer würde höhere Geschwindigkeiten erfordern, welche fehleranfälliger wären. Zudem verbesserte sich die relative Messdauer nicht wesentlich.

Bei einer Messdauer von 2000s ergibt ein Nachführen des primären Targets einen Luminositäts- und Antiprotonenverlauf wie in Abb. 3.6 zu sehen ist.

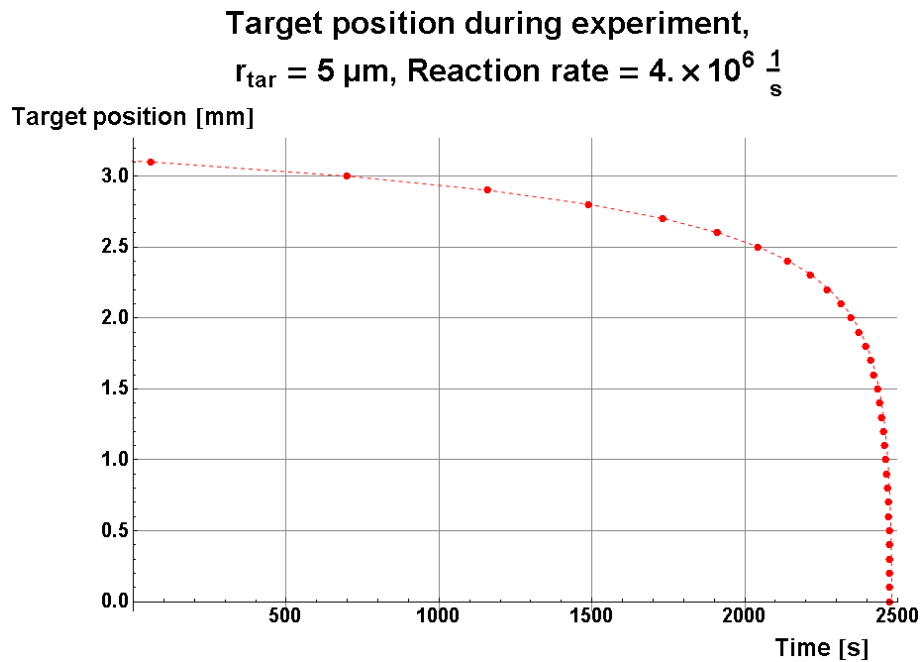


Abb. 3.5: Offset des primären Targets während einer Messung zum Ausgleich der abnehmenden Strahlintensität. Angenommen wird ein Gaußförmiger Strahl mit 1 mm Durchmesser [Ste17].

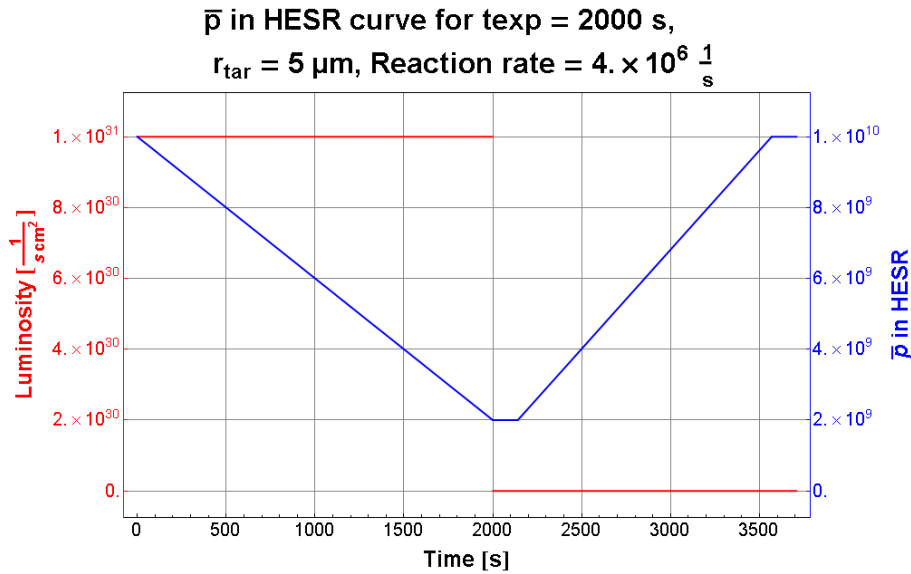


Abb. 3.6: Anzahl Antiprotonen im HESR und Luminosität des HESR gegen die Zeit bei Nachführung des primären Targets, so dass die Luminosität während einer Messdauer von 2000s konstant ist [The16].

3.5.4 Zustand „Target sichern“

Zwar zieht der Target-Wechsel das verwendete Target automatisch aus dem Strahlrohr, jedoch kann es sinnvoll sein, das Target manuell aus diesem zu entfernen. Hierzu wird der entsprechende Fahrbefehl an alle Target-Motoren geschickt. Das Zurückziehen der Targets wird beendet, wenn sich kein Target mehr im Strahlrohr befindet. Hierfür ist ein Sensor notwendig. Die Untersuchung, ob eine Lichtschranke prinzipiell die Target-Sicherheit zuverlässig nachweisen kann, ist in Kap. 4.1 dargestellt.

3.5.5 Zustand „Strahlvorbereitung“

Die Bewegung aus der sicheren Position in die Messposition muss vor Aufbau des Strahls geschehen, da das primäre Target sonst durch den vollen Strahl geführt werden müsste. Dies ist zwar für Diamant oder thermisch hochleitende Carbonfasern (zum Beispiel Dialead K13D2U¹¹) - und damit die vermutlich verwendeten Materialien für das primäre Target - von der Temperatur her unkritisch (siehe Abb. 3.7), jedoch ist unbekannt ob andere physikalische Effekte auftreten.

Da das primäre Target nicht durch den vollen Strahl fahren darf, muss sich dieses vor Aufbau des Strahls bereits auf der Seite des sekundären Targets befinden. Dies wird dadurch erreicht, dass beim Wechsel in diesen Zustand das primäre Target ca 5 cm weit ausgefahren wird. Die nötige Strecke bis zum Endanschlag der Schubstange beträgt etwa 2,5 cm; der zusätzliche Weg dient dazu auch bei geringen Lasten an der

¹¹<https://www.mrc.co.jp/dialead/english/dialead.html>

Schubstange die Position sicher zu erreichen. Wenn dieser Fahrbefehl abgearbeitet ist, wird eine entsprechende Meldung an den HESR abgesetzt, der Operateur hierüber informiert und in den Zustand *Stopp* übergegangen.

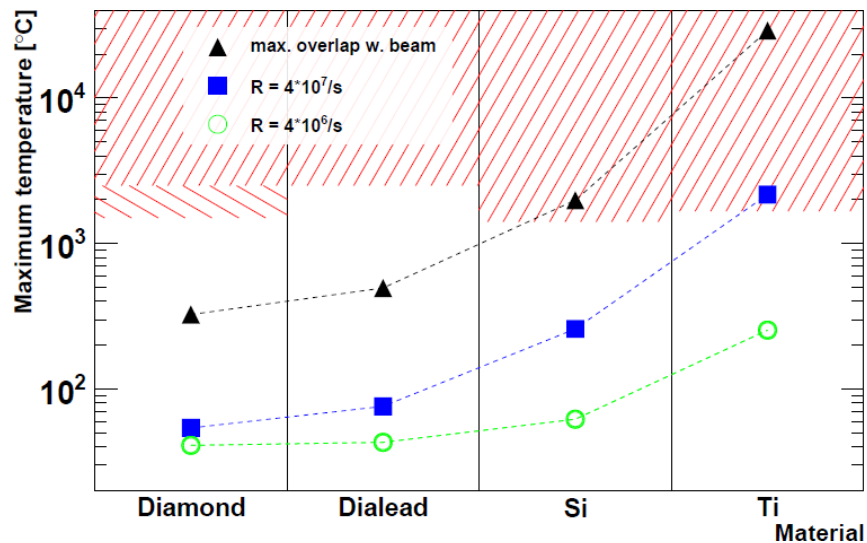


Abb. 3.7: Berechnung der Temperatur auf Basis der Wechselwirkungsrate. Die Temperatur über der Schmelztemperatur ist rot markiert. Für Diamant gilt es zusätzlich die Umwandlung in Graphit zu beachten, welche ebenfalls markiert ist. Bei Dialead handelt es sich um eine thermisch hochleitende Carbonfaser.[Ste17]

3.5.6 Zustand „Target-Wechsel“

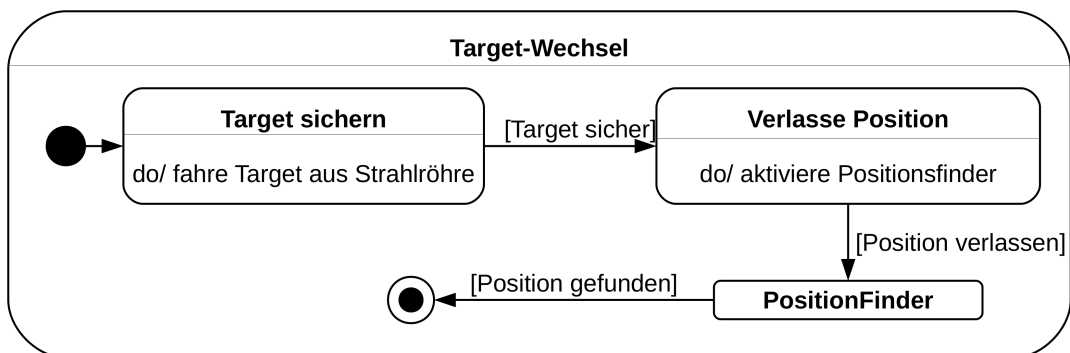


Abb. 3.8: Zustandsdiagramm des Zustands zum Wechsel des primären Targets

Vor einem Targetwechsel müssen die Antiprotonen des Strahls abgeleitet werden. Dies dient dazu, das als nächstes verwendete Target nicht zu beschädigen. Ist das zu-

letzten verwendete primäre Target nicht gesichert, so wird es zuerst aus dem Strahlrohr entfernt, wie in Kap. 3.5.4 dargestellt ist.

Für den eigentlichen Positionswechsel muss die nächste Schlittenposition, 18,8 mm entfernt, hochpräzise erreicht werden, damit der Schlitz innerhalb des Absorbers getroffen wird. Erste Abschätzungen sehen hier eine maximale Abweichung von 0,1 mm von der Sollposition vor. Da die Schrittweite des Motors lastabhängig ist und schon ein leichtes Verkippen des Schlittens die Reibung und damit die Last erkennbar erhöht, kann die Anzahl der hierfür notwendigen Schritte nicht vorhergesagt werden.

Es musste daher eine Möglichkeit entwickelt werden, an einer Target-Position eine Rückmeldung über das Erreichen zu geben. Außerdem muss die angefahrte Position identifiziert werden können.

Identifizierung, dass eine Position erreicht wurde

Hierfür wurde zunächst - in enger Zusammenarbeit mit der mechanischen Entwicklung [Sch17] - davon ausgegangen, dass die Positionsmeldung über Druckschalter realisiert würde. Diese sollten von der Steuerstange in Abb. 3.9 an den Erhebungen ausgelöst werden und über die GPIO digitalisiert werden; die Steuerlogik hätte aus dem Status der drei Schalter die Position berechnet. Beim Zusammenbau der Mechanik mit den Schaltern (siehe Abb. 3.10) zeigte sich, dass der Motor nicht genug Kraft hat einen, geschweige denn mehrere Schalter gleichzeitig auszulösen.



Abb. 3.9: Steuerstange, welche die Schalter jeweils an den Positionen auslöst. Die Erhebungen sind jeweils einen Millimeter hoch und haben Flanken von 45°.

Ein weiteres Problem bei der Verwendung der Schalter wäre das für die Identifikation nötige gleichzeitige Auslösen gewesen, da hierfür eine mechanische Präzision erforderlich ist, die kaum erreichbar ist. Das erste Problem wäre durch flachere Flanken der Steuerstange oder einen kräftigeren Motor lösbar gewesen, die Probleme der mechanischen Präzision wären jedoch geblieben. Da zudem fraglich ist, ob sich Schalter für die Umgebungsbedingungen im Experiment beschaffen lassen (gefundene UHV-Schalter waren magnetisch, nicht-magnetische Schalter nicht für UHV geeignet), wurde beschlossen mit den bereits erläuterten Lichtsensoren ein Lagekontrollsystem zu entwickeln. Anstelle eines Schalters wird der Lichtwellenleiter eines optischen Tastkopfes eingebaut. Dieser dient gleichzeitig als Sender und Empfänger und benutzt die für die Schalter entworfene Steuerstange. Das Signal des Tastkopfes kann analog abgegriffen werden und wird über den ADC des BeagleBone Black digitalisiert, welches von EPICS mit 100 Hz abgetastet wird.

Das typische Signal des ADC beim Überfahren einer Steuerstangen-Erhebung, welches in Abb. 3.11 dargestellt ist, erlaubt es der Steuerlogik zu entscheiden, ob eine

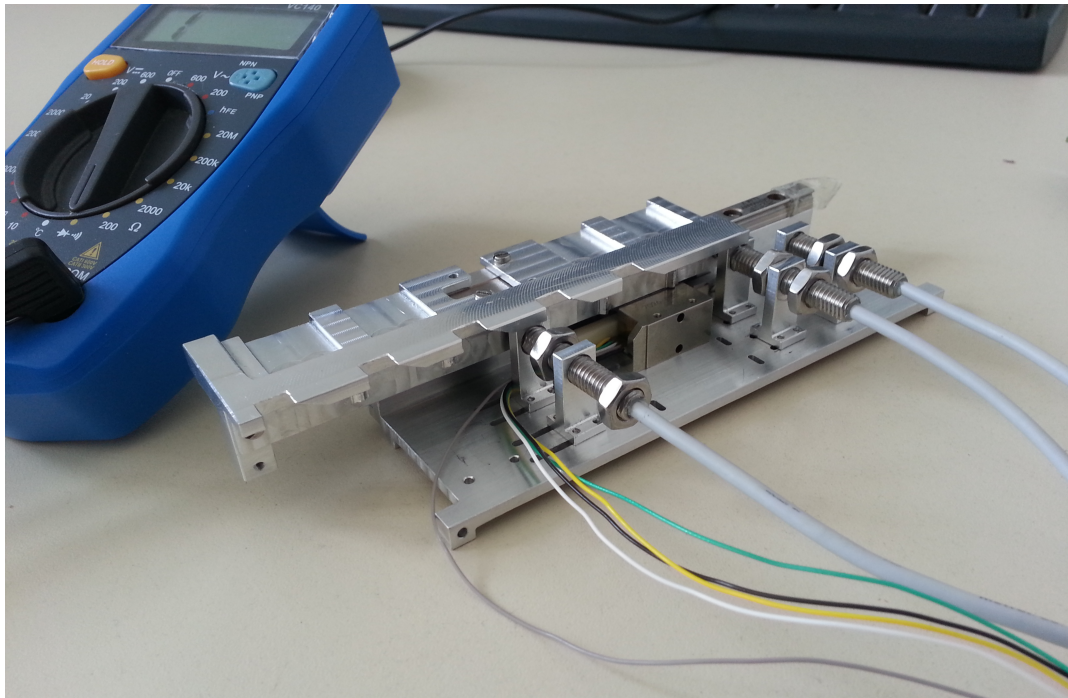


Abb. 3.10: Aufbau zum Test der Schalter; es zeigte sich, dass der Motor nicht genug Kraft hat, um einen Schalter auszulösen. Durch gleichzeitiges Auslösen von bis zu 3 Schaltern hätte die Position binär verschlüsselt an das Host-System übertragen werden können.

gültige Position vorliegt oder nicht. Das anzufahrende Ziel ist der Peak im Inneren der Struktur.

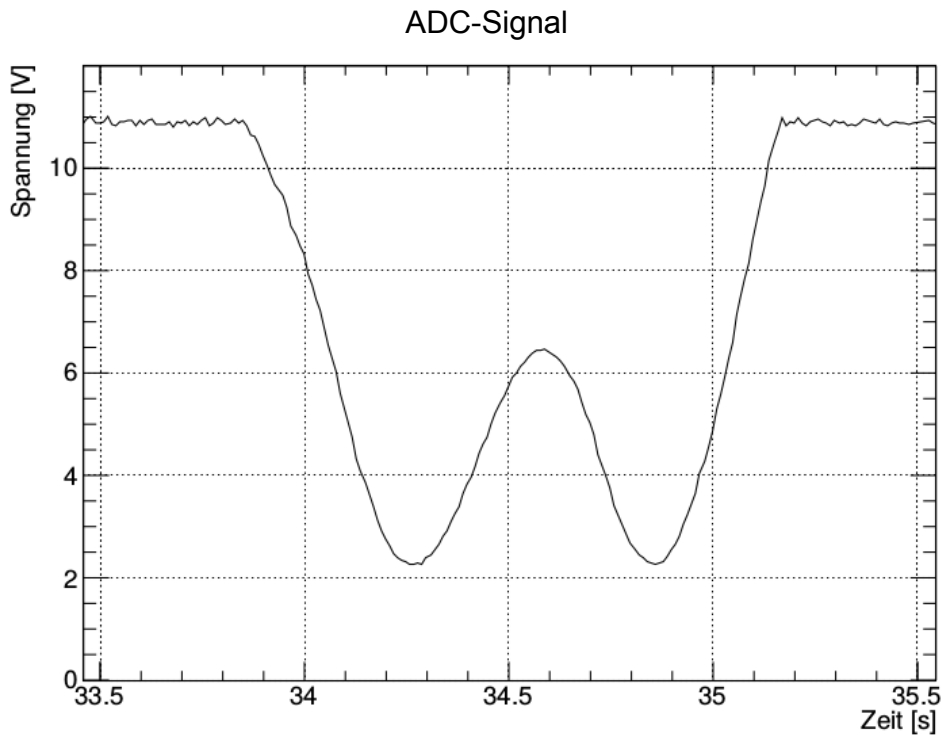


Abb. 3.11: Spannung gegen Zeit des ADC beim Überfahren einer Erhebung der Steuerstange. Eine Erläuterung dieses Signalverlaufes findet sich im Text.

Der Signalverlauf ist durch die Funktionsweise des Sensors erklärbar: Eine Infrarot-Diode sendet einen Strahl aus, welcher an der Oberfläche reflektiert und von einer Photodiode aufgenommen wird. Während der Fahrt des Schlittens trifft das Infrarot-Signal auf die Steuerstange; an den Flanken der Erhebungen wird das Signal vom Tastkopf weg gestreut, auf dem oberen Plateau aber reflektiert. Je nach Breite und Winkel der Erhebung entstehen unterschiedliche Dip-Formen, welche in [Sch17] dargestellt und genauer untersucht sind.

Umsetzung der Positionserkennung in der Software

Während des Fahrens wird zunächst darauf gewartet, dass die Spannung 7,5 V überschreitet. Der mögliche Unterschied zum maximalen Pegel dient dazu, auch bei verminderter Übertragung durch Strahlenschäden noch sicher in diesen Unterzustand zu gelangen. Um das ADC-Rauschen zu reduzieren wird über jeweils 100 Werte gemittelt. Sinkt die Spannung unter 7 V, so kann davon ausgegangen werden, dass die nächste Targetposition in etwa erreicht wurde. Im hierdurch getriggerten Unterzustand werden die gemittelten ADC-Werte gespeichert. Übersteigt die Spannung

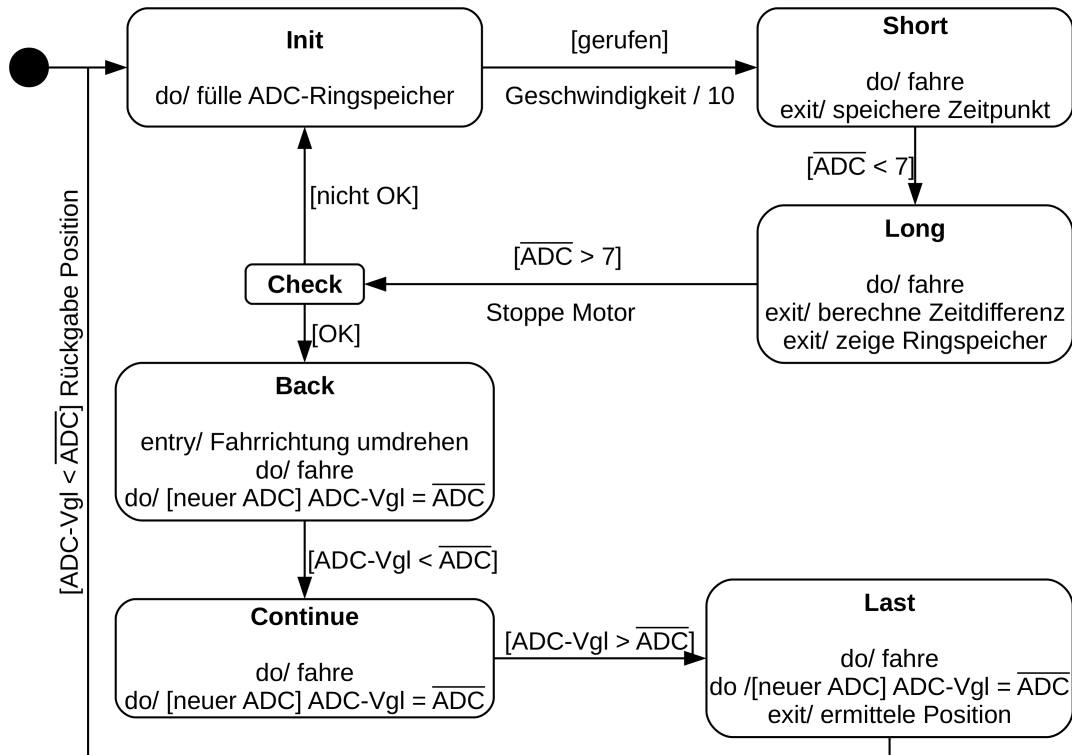


Abb. 3.12: Erkennung der Position in der Software. Die ADC-Werte werden über 100 Werte gemittelt. Bei gemittelten ADC-Werten unter 7 V geht die Software davon aus, dass es sich um eine Signalstruktur handelt, die an einer Position erzeugt wird. Die erzeugte Struktur wird dem Operator zur Verifikation gezeigt, im Anschluss das innere Maximum der Struktur angefahren.

wieder die 7 V-Marke, so werden dem Operator die gespeicherten Werte dargestellt. Dieser muss das Erreichen einer neuen Position bestätigen.

Ist dies der Fall, so wird das Maximum im Inneren der Struktur angefahren. Hierbei muss neben der geforderten Genauigkeit (0,1 mm) die beschränkte Digitalisierungsrate von 100 Hz berücksichtigt werden. In Kombination beschränkt dies die maximale Fahrgeschwindigkeit auf 0,1 mm/s. Gleichzeitig bewirkt diese langsame Fahrgeschwindigkeit, dass Verarbeitungszeiten in der Software nur eine kleine Rolle spielen. Existiert - was spätere Messungen prüfen müssen - eine systematische Abweichung, so kann die Geschwindigkeit weiter reduziert werden.

Schließlich muss die angefahrne Position noch bestimmt werden; hierfür sind mehrere Methoden denkbar. Zum einen könnte über die Breite des Peaks - und damit über die Fahrdauer die Position codiert werden; hierfür ist es jedoch notwendig, dass die Fahrgeschwindigkeit konstant ist, was in Kap. 4.2 untersucht wird. Alternativ könnte man über die Form des Peaks die Position codieren. [Sch17]

Als dritte Möglichkeit bietet sich an, aus einer Schlittenposition am Anschlag der Vakuumkammer die Positionen abzuzählen; hierfür müsste eine Rückmeldung über das Erreichen des Anschlags eingeplant werden.

Prinzipiell wäre es auch möglich die Amplitude als Codierung zu verwenden, dies ist jedoch aufgrund der Alterung der Lichtwellenleiter wahrscheinlich schwierig umzusetzen.

4 Test der Steuersoftware

Nachdem im letzten Kapitel die Steuersoftware erläutert wurde soll diese noch getestet werden.

Im ersten Abschnitt wird untersucht, ob eine Lichtschranke auf Basis der Tippkemper-Sensoren, welche in Kap. 2.5 beschrieben wurden, sicher bestimmen kann, ob sich ein primäres Target im Inneren des Strahlrohrs befindet oder nicht.

Im zweiten Abschnitt wird geprüft, wie gleichmäßig der Motor fährt - und damit ob es möglich ist, die erreichte Schlittenposition über die Breite eines Peaks zu codieren.

4.1 Lichtschranke

Um eine Lichtschranke als Sicherheitsmechanismus für die primären Targets nutzen zu können, muss diese parallel zur Strahlachse im vorderen Bereich der Vakuumkammer platziert werden. Dabei muss der Lichtweg zwischen Sender und Empfänger von der Schubstange des Motors unterbrochen werden. Der Abfall des gemessenen Signals wäre das Zeichen, dass sich ein primäres Target im Strahlrohr befindet.

Um dieses Prinzip zu prüfen, wurde einer der Motoren mit ausgefahrener Antriebsstange - wenn auch noch ohne primäres Target - so zwischen die beiden Lichtwellenleiter gestellt, dass die Antriebsstange die Lichtschranke unterbricht. Die Öffnung der Lichtschranke dabei etwa dem Platz, der im Experiment benötigt wird (siehe Abb. 4.1). Mit Hilfe eines Oszilloskops wurde eine Messung des Spannungspegels

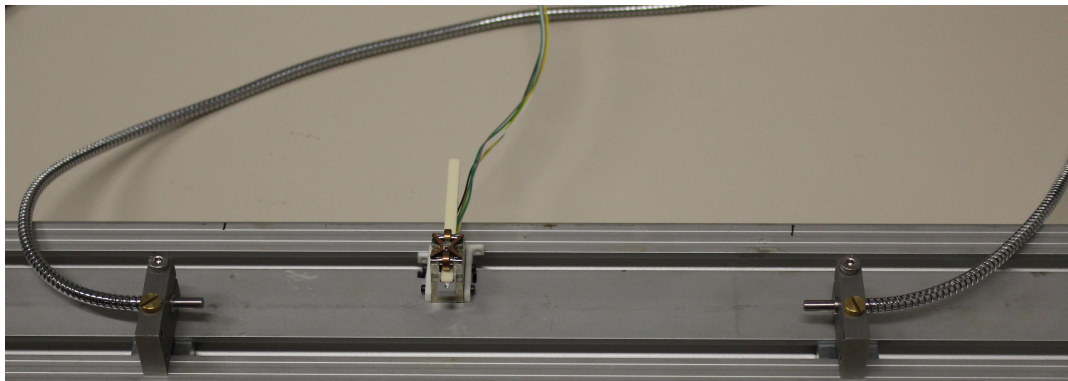


Abb. 4.1: Aufbau zum Test der Lichtschranke, der Abstand der beiden Lichtwellenleiter beträgt etwa 20 cm.

beim Einziehen der Schubstange gemacht, welche in Abb. 4.2 gezeigt ist. Das mittlere Plateau der Messung wird vom Kopf, der an der Schubstange angebracht ist

verursacht. Die Breite des Kopfes beträgt 3,95 mm, woraus sich die Fahrgeschwindigkeit des unbelasteten Motors bei den eingestellten 600 Schritt/s zu 2,63 mm/s ergibt.

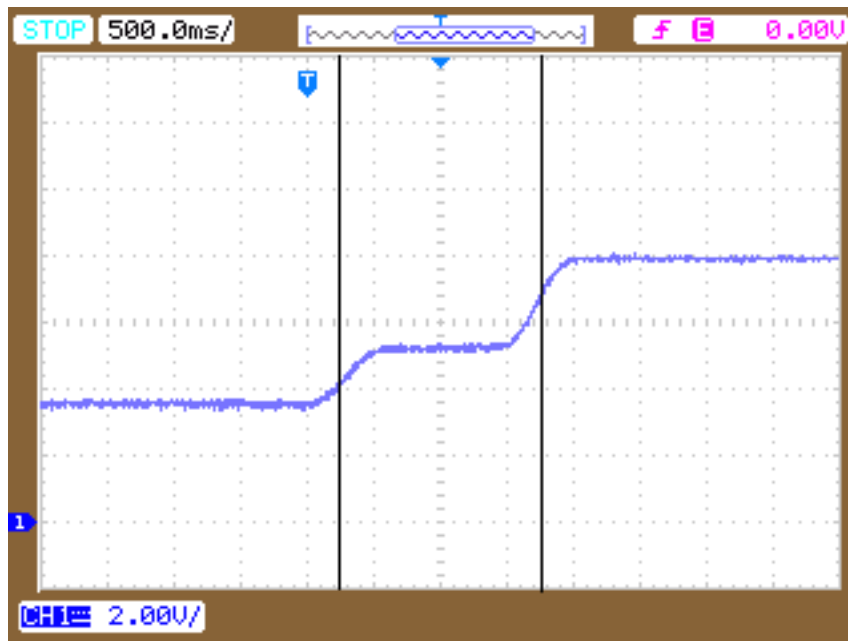


Abb. 4.2: Spannungspegel der Lichtschranke gegen die Zeit beim Herausfahren der Motor-Schubstange. Das mittlere Plateau kommt daher, dass die Schubstange 3 mm hoch, der aufgeklebte Kopf 2,6 mm hoch ist. Die Länge des Kopfes beträgt 3,95 mm, die eingestellte Geschwindigkeit von 600 Schritt/s entspricht damit einer Geschwindigkeit von 2,63 mm/s.

Da der Kopf lediglich 0,4 mm flacher ist als die Schubstange, könnte es - über eine entsprechende Konstruktion des Halterahmens des primären Targetes - möglich sein, eine Information über den momentanen Hub des Motors zu erhalten, so dass man die Funktionsfähigkeit des Motors im Experiment prüfen kann.

Für Abb. 4.3 wurde aus gebogenem Aluminiumblech die 2 cm hohe Vakuumkammer imitiert. Die Messung zeigt, dass der optische Öffnungswinkel des Lichtwellenleiters von 65° [Tip08] und die Reflektion des Lichtes an dem Alublech einen indirekten Lichtweg ermöglicht: Der Bereich in dem die Lichtschranke unterbrochen ist, zeigt gegenüber der vorigen Messung erhöhte Pegel, insbesondere im Bereich des Anschlusskopfes der Schubstange. Der Bereich in dem die Lichtschranke offen ist, ist nicht erhöht, da der verbaute Photosensor in Sättigung geht. Um eine sichere Identifikation zu ermöglichen, sollte die Vakuumkammer von innen mit infrarot-absorbierendem Material beschichtet sein oder ein Kollimator eingesetzt werden.

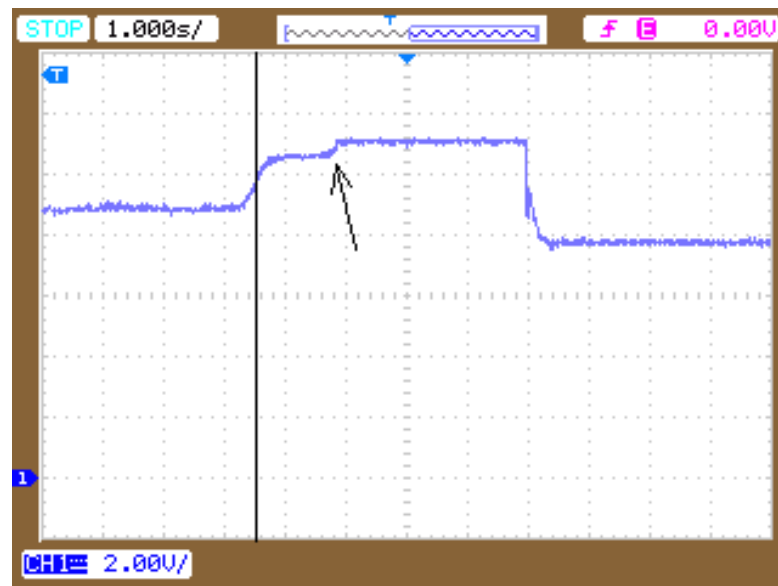


Abb. 4.3: Spannungspegel der Lichtschranke gegen die Zeit beim Herausfahren der Motor-Schubstange, wenn die Vakuumkammer nachgebildet ist. Wird die Lichtschranke nicht von der Steuerstange unterbrochen, so geht das Signal in Sättigung. Diese Stelle ist mit einem Pfeil markiert.

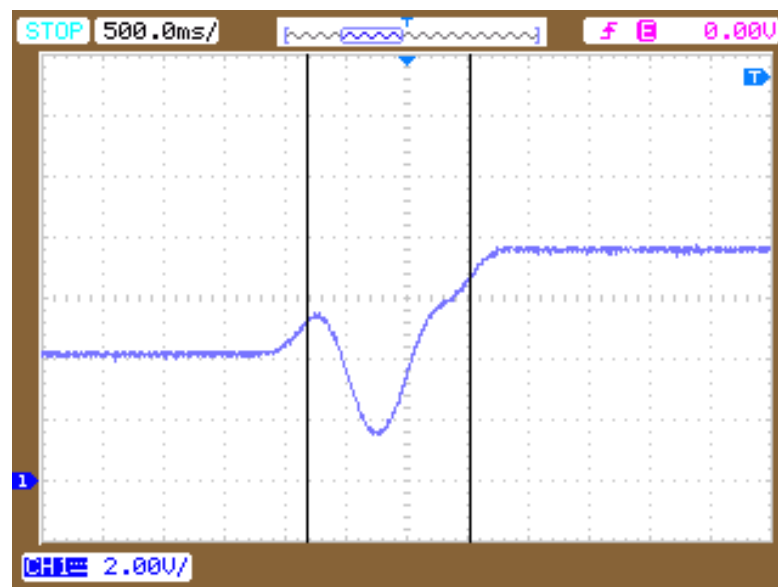


Abb. 4.4: Spannungspegel der Lichtschranke gegen die Zeit (ohne Vakuumkammer) beim Herausfahren der Motor-Schubstange, wenn eine Schraube im Kopf der Schubstange steckt. Die Schraube verdeckt einen größeren Bereich des Lichtwegs, was sich in einem Dip des Signals zeigt.

Schließlich wurde der Einfluss untersucht, den das zusätzliche Material der Befestigung des primären Targets auf die Pegel der Lichtschranke haben könnte. Hierzu wurde eine relativ lange Schraube in den Kopf des Motors geschraubt. Diese verdeckt, wie Abb. 4.4 zeigt einen größeren Bereich des Lichtwegs als die Schubstange alleine, was zu einem Dip genau im Bereich des mittleren Plateaus führt. Es ist also möglich, Strukturen zu erkennen, die eventuell eine genauere Positionierung des primären Targets ermöglichen.

Abschließend lässt sich sagen, dass die Lichtschranke auf Basis der Tippkemper-Sensoren es prinzipiell ermöglicht die sichere Position der primären Targets zu erkennen. Als Problem könnte sich ein eventuelles Altern der Lichtwellenleiter aufgrund der Strahlung herausstellen. Um dieses Problem zu vermeiden, ist es notwendig strahlenharte Fasern zu finden. Vor dem endgültigen Aufbau des Systems ist eine Quantifizierung der Durchlässigkeitsabnahme durch Bestrahlung unerlässlich. Gegebenenfalls muss das System auch dauerhaft aktiv sein, so dass man die Spannung überwachen und eventuell notwendig werdende Maßnahmen ergreifen kann.

4.2 Gleichmäßigkeit des Motors

Um über die Form oder Breite der Signalstruktur der entsprechenden Erhebung identifizieren zu können, welche Position angefahren wurde muss der Motor eine gleichmäßige Geschwindigkeit halten. Um dies zu überprüfen, wurde der Schlitten 24 Stunden lang hin- und hergefahren und dabei die Encoderdaten mit 100 Hz aufgezeichnet.

Die Messung wurde an den Wendestellen aufgeteilt und für jedes entstandene Segment eine lineare Funktion angepasst. Die Steigung des Graphs entspricht der Geschwindigkeit. Die Erwartung, dass sich nur eine Geschwindigkeit ergeben würde, konnte nicht bestätigt werden, stattdessen sieht man dass verschiedene Geschwindigkeiten, welche jeweils als Doppelpeak strukturiert auftreten (Abb. 4.5). Die Untersuchung der zeitlichen Korrelation dieser Durchschnittsgeschwindigkeiten ist in Abb. 4.6 gezeigt. Dabei ist die eine Fahrriichtung des Schlittens blau, die andere rot dargestellt. Offensichtlich kommen die Doppelpeaks aus unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten für die beiden Richtungen. Zunächst nicht erklärt werden können die in Abb. 4.6 deutlich sichtbaren, plötzlichen Geschwindigkeitsänderungen. Während dem Zusammenbau der Mechanik, aber auch während der Messung durch Ausfall des Encoders (der die Wendestellen festlegt) ist der Schlitten von der Schiene herunter geschoben worden. Dadurch verlor die Schiene einen Teil der Kugeln des Lagers. Dies kann jedoch nur einen der beiden Geschwindigkeitssprünge erklären. In den späteren Messungen wurden Endanschläge umgesetzt, die ein solches Herunterfahren verhindern.

Auffällig ist, dass die Geschwindigkeitssprünge immer zu demselben Zeitpunkt aufgetreten sind, wie in Abb. 4.7 gesehen werden kann.

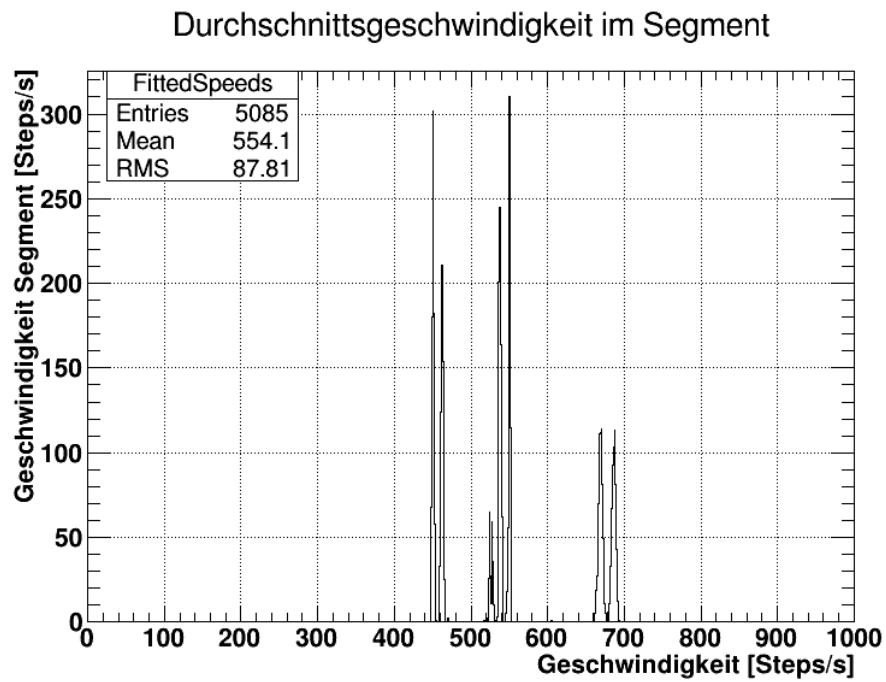


Abb. 4.5: Durchschnittsgeschwindigkeit pro Segment, wie in Abb. 4.6 gezeigt ist, sind die einzelnen Doppelpack-Strukturen durch unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten in die beiden Richtungen entstanden.

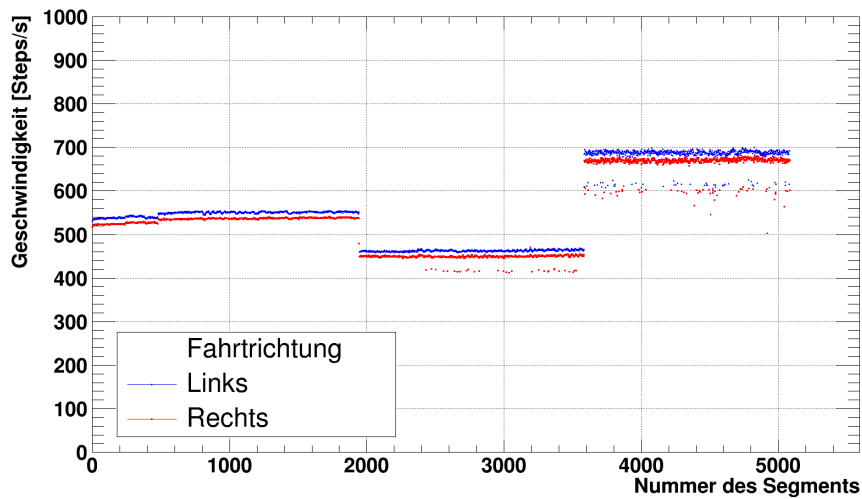


Abb. 4.6: Durchschnittsgeschwindigkeit gegen Segmentnummer bei einer eingestellten Frequenz von 600 Hz

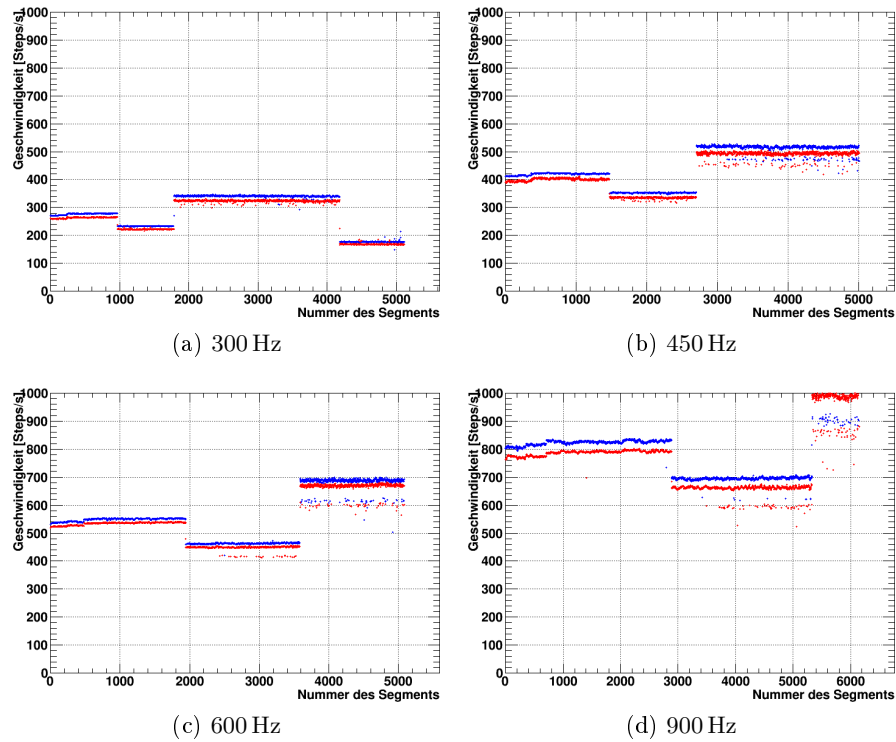


Abb. 4.7: Geschwindigkeit gegen Segmentnummer bei eingestellten Frequenzen von 300 Hz, 450 Hz, 600 Hz und 900 Hz

Da die Geschwindigkeit sich zwischen den Segmenten ändert, wurde zunächst untersucht, ob sich die Geschwindigkeit auch innerhalb eines Segments ändert. Hierzu wurde jedes Segment in acht gleiche Teile unterteilt und in jedem Teil eine eigene Geschwindigkeit angepasst. Das Ergebnis ist als 2D-Histogramm in Abb. 4.8 dargestellt. Auf der X-Achse ist die über das ganze Segment angepasste Geschwindigkeit, auf der Y-Achse die an die erzeugten Subsegmente angepasste Geschwindigkeit aufgetragen. Die Abbildung zeigt, dass die Geschwindigkeit über ein Segment im wesentlichen konstant bleibt.

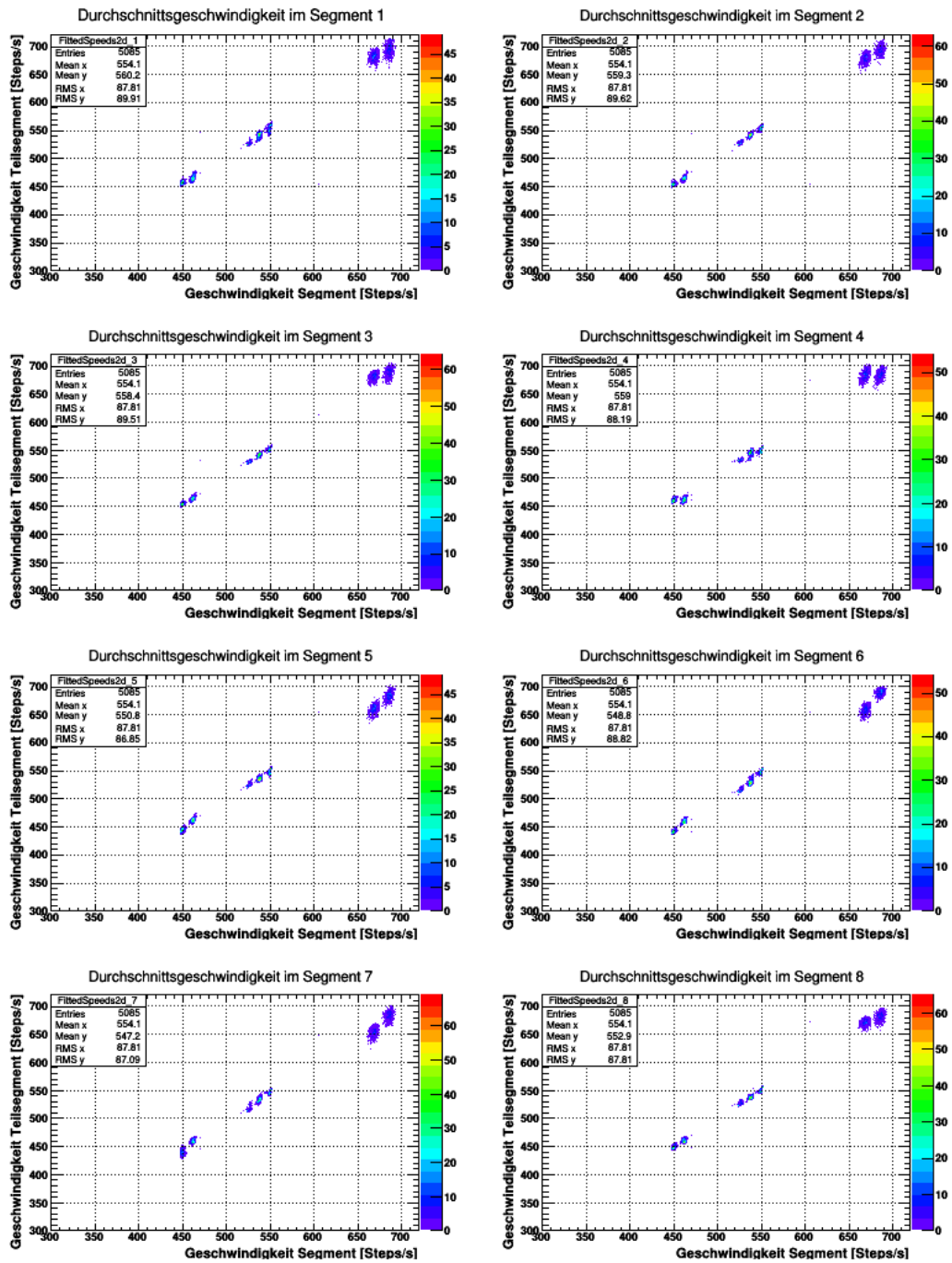


Abb. 4.8: Segmentgeschwindigkeit gegen die Geschwindigkeit im Subsegment, jeweils an die Messdaten angepasst.

Um auszuschließen, dass die Geschwindigkeitssprünge am Motorsteuergerät liegen, wurde ein Oszilloskop zur Aufzeichnung mit Tastköpfen parallel zum Motor angeschlossen. Die Frequenz wurde mit einem Computer über 24 h aufgezeichnet und ist - bis auf einzelne Werte, die durch Fehler bei der Messung des Oszilloskops erklärbar sind, konstant, wie 4.9a zeigt. Zwischendurch war es nötig, die Mechanik neu zu verschrauben, die verwendete Software zur Aufnahme gestattet es jedoch nicht die Messung zu unterbrechen. Dies erklärt die beiden Bereiche bei etwa 68 000 s und 77 000 s Messzeit, in denen die aufgezeichnete Frequenz 0 Hz ist, die Messung aber nicht unterbrochen wurde: Nach der verbesserten Verschraubung war eine neue Kalibrierung der Wendepunkte der Fahrsoftware nötig.

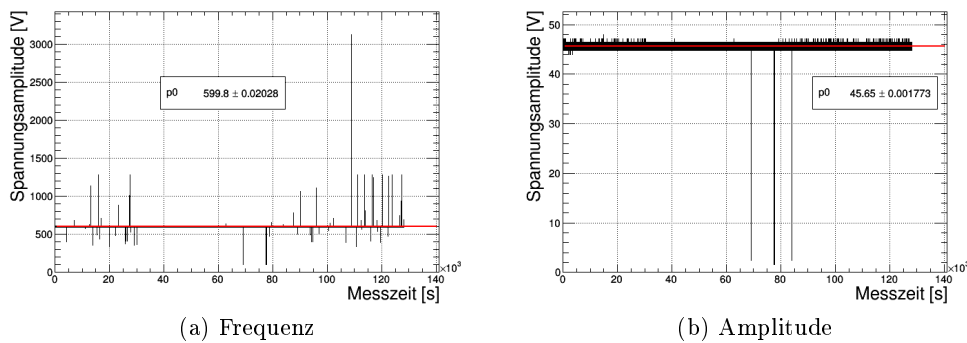


Abb. 4.9: Frequenz und Spannung des PMD101, die zwei Bereiche in denen die Frequenz 0 Hz beträgt, sind durch neue Verschraubung und Justage bei laufender Messung verursacht. Die einzelnen Ausreißer sind auf Fehler in der Messung durch das Oszilloskop zurückzuführen.

Ebenso wurde die Amplitude der Spannung über 24 h aufgezeichnet. Diese zeigt im wesentlichen dasselbe - die Amplitude lag durchgängig bei 42 V, wie 4.9b zeigt.

Da sowohl Frequenz als auch Amplitude der Spannung konstant sind, kann der PMD101 als Grund für die drei verschiedenen Geschwindigkeiten ausgeschlossen werden.

Wie in [Sch17] dargestellt ist, ergeben sich die drei gemessenen Geschwindigkeiten auch wenn - anstatt des Encoder-Signals - die Halbwertsbreite der Signale vom selbstentwickelten Lagekontrollsystem verwendet werden, wie Abb. 4.10 zeigt.

Um einen Einfluss der Mechanik auszuschließen, wurde der Aufbau mit zusätzlichen Schrauben besser fixiert, wobei insbesondere darauf geachtet wurde, dass die Motorachse und die Schlittenachse parallel liegen. Zusätzlich wurde die Schiene, welche den Schlittenaufbau trägt mit der Bodenplatte verklebt. Leider war zu diesem Zeitpunkt am Schlittenmotor nach einer Fahrstrecke von 2,5 km eines der Widerlager der Motorbeine gebrochen (siehe Abb. 4.11). Eine Neubeschaffung des Motors war durch die Lieferzeit von 3 Monaten nicht mehr möglich. Zwar ist die Fahrstrecke im Experiment mit $< 0,5$ m deutlich geringer, dennoch muss bei der nächsten Version

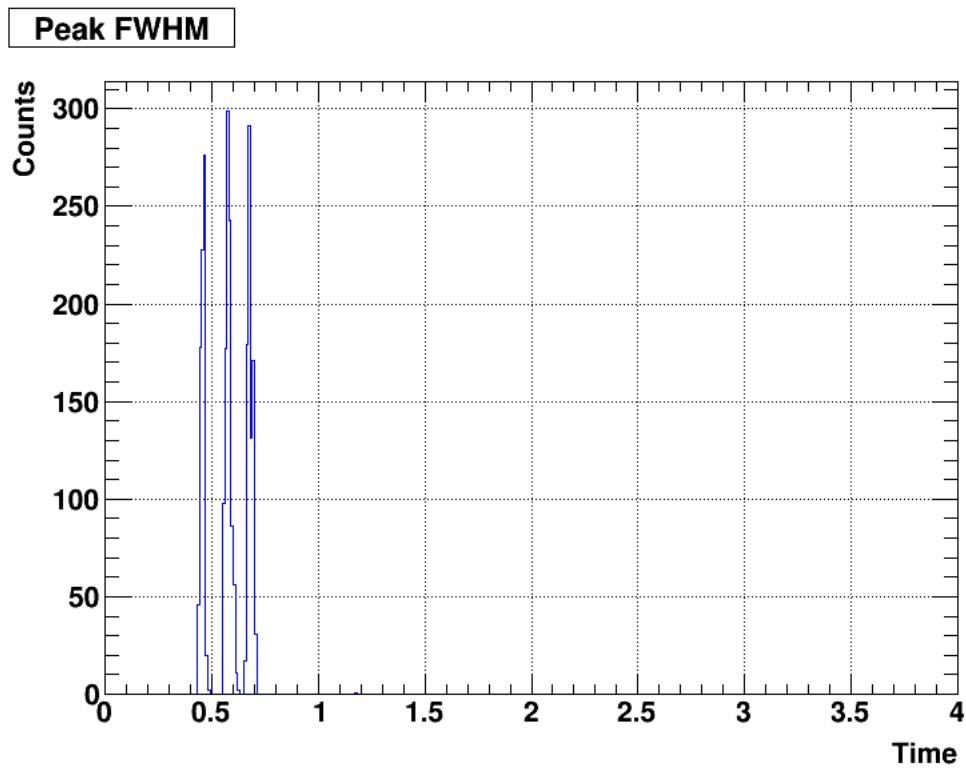


Abb. 4.10: Histogramm der FWHM aus den Messungen des selbstentwickelten Lagekontrollsystems. Die drei Peaks bei drei verschiedenen Zeiten für dieselbe Erhebung zeigen, dass die gemessene Schlittengeschwindigkeit während dieser Messung schwankt.[Sch17]

der Mechanik darauf geachtet werden, dass der Z-Motor auf der Bodenplatte steht; dies verhindert zwar die Scherkräfte nicht; sie treten dann jedoch eher in horizontaler Richtung auf. Dies ist für den Motor weniger kritisch ist.[Pie13a]

Die Messung wurde trotz dem gebrochenen Motorlager wiederholt, dabei wurde vermutet, dass der Motor bei beidseitiger Einspannung der Schubstange noch gleichmäßig fahren würde - die Anschlussadapter zur Entkopplung der Vibrationen im Motor sollten zusätzlich die Funktion der Widerlager übernehmen.

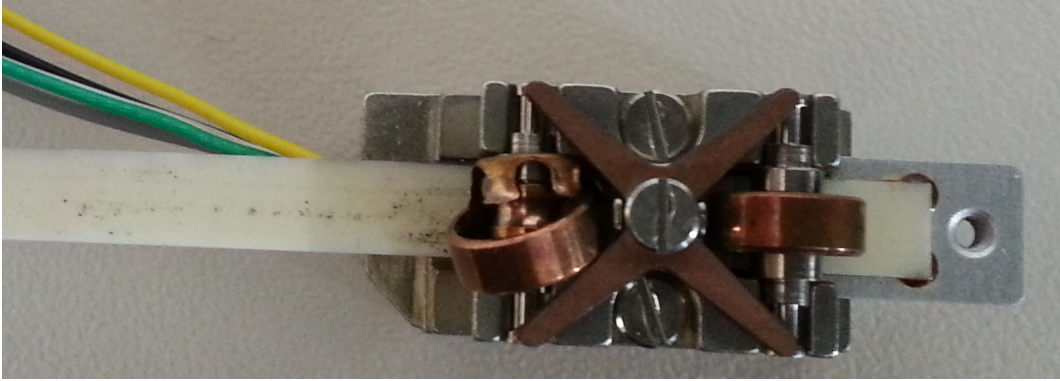


Abb. 4.11: Gebrochenes Widerlager nach 2,53km Fahrstrecke. Aus Mangel an Ersatz wurde der Motor für weitere Messungen genutzt.

Das Ergebnis der Messung (Abb. 4.12) zeigt, dass die Geschwindigkeit dieselbe dreifache Struktur aufweist. Zusätzlich wurden die Segmente wieder in 8 Subsegmente geteilt und wie zuvor Geschwindigkeiten an die Subsegmente angepasst (Abb. 4.13). Wie in der Abb. zu sehen ist, ist die Fahrgeschwindigkeit im mittleren Bereich der Strecke noch linear, in den äußeren Bereichen ergeben sich jedoch Abweichungen. Dies zeigt deutlich, dass beide Widerlager für eine konstante Geschwindigkeit und somit verlässliche Positionsidentifikation über gemessene Zeiten notwendig sind. Die beidseitige Einspannung konnte das kaputte Lager nur im Mittelteil der Fahrstrecke ersetzen. In den Außenbereichen scheint es zu stärkeren Scherkräften zu kommen, die nicht konstant ausgeglichen beziehungsweise sogar durch die Einspannung ausgelöst werden.

Der Grund hinter den drei Peaks ist noch unklar. Da die Geschwindigkeitssprünge systematisch auftreten und nicht statistisch ist die Mechanik nicht als einziges verantwortlich. Gleiches gilt für die Elektronik, da ein Fehler dieser nicht zu immer derselben Zeit auftreten würde. Ausschließen als Fehlerquelle lässt sich das Steuergerät: sowohl Frequenz als auch Amplitude wurden geprüft und sind jeweils konstant. Um eine Positionsidentifikation über die Zeiten zu ermöglichen sind daher weitere Untersuchungen nötig.

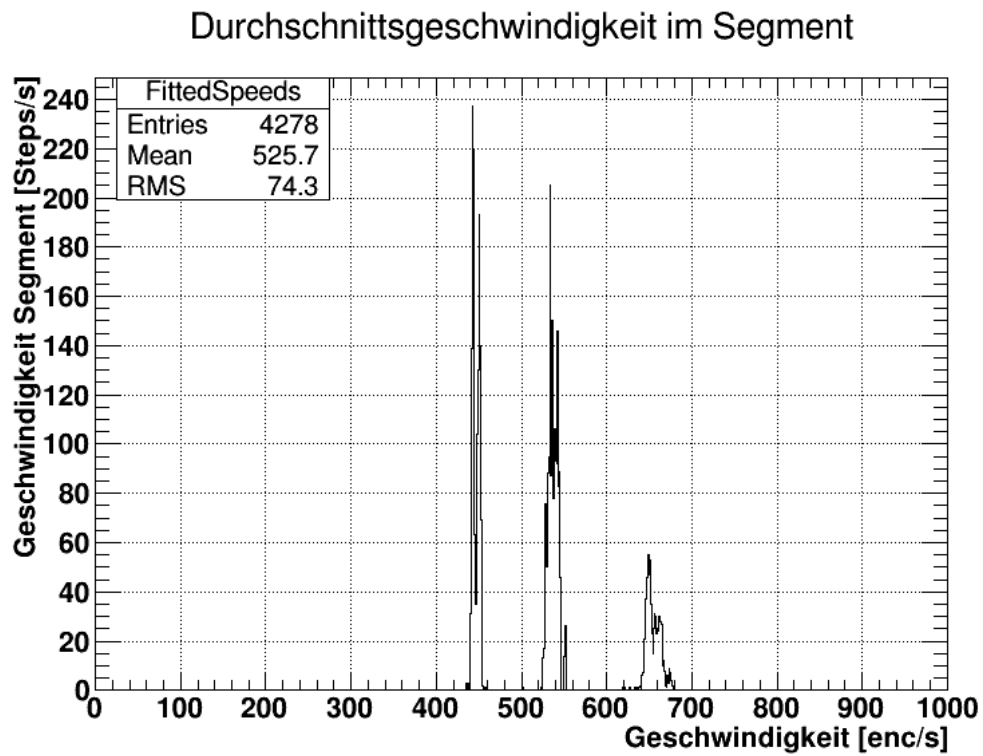


Abb. 4.12: Durchschnittsgeschwindigkeit pro Segment bei beschädigtem Motor. Sichtbar ist, dass drei verschiedene Fahrgeschwindigkeiten gemessen wurden und diese eine Doppelpeak-Struktur aufweisen.

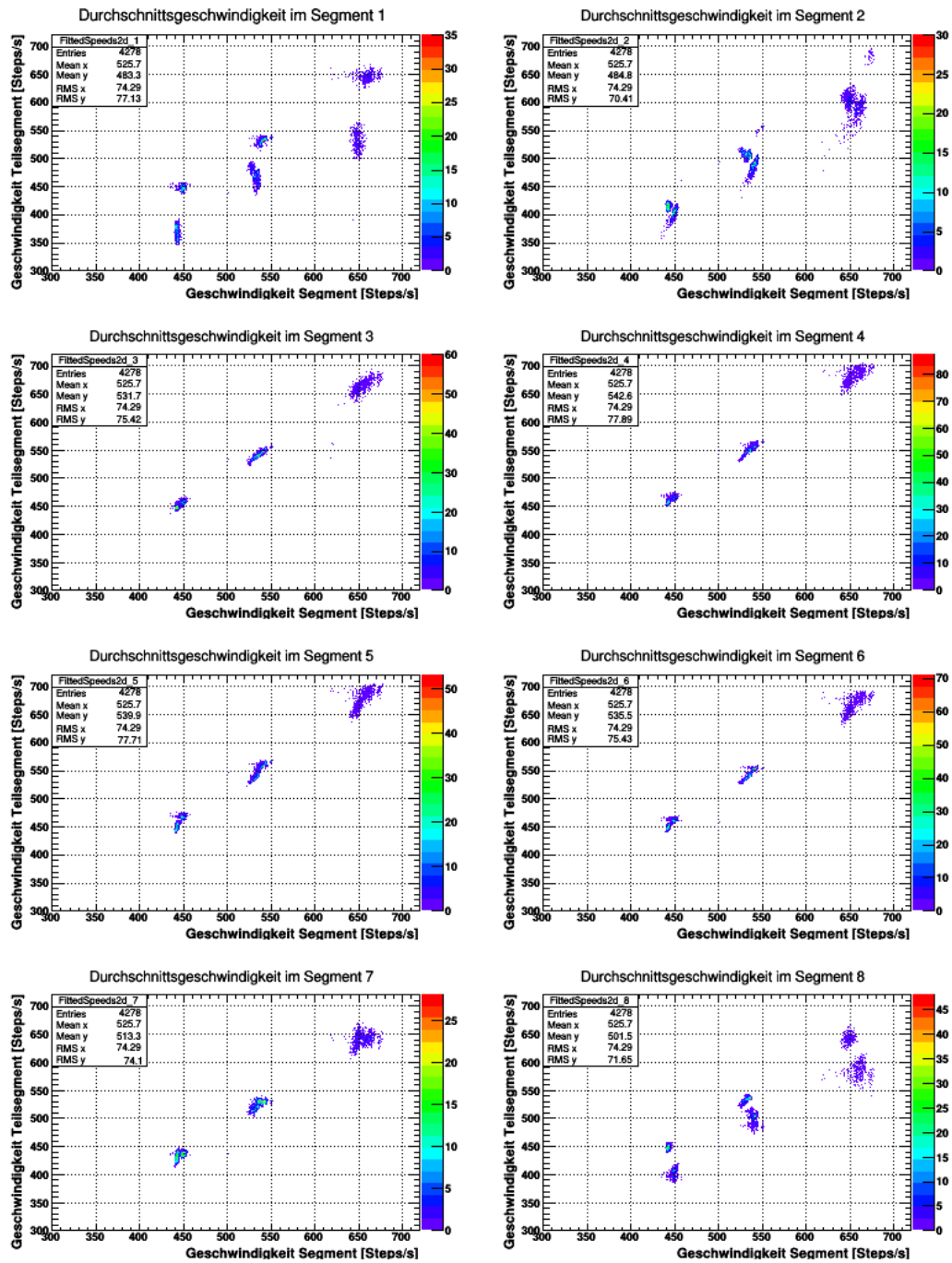


Abb. 4.13: Segmentgeschwindigkeit gegen die Geschwindigkeit in einem Subsegment, jeweils an die Messdaten angepasst für die Messung mit kaputtem Motor

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Arbeit beschreibt die Steuerlogik des primären Targets des \bar{P} ANDA-Hyperkern-experiments. Diese erfüllt die gestellten Aufgaben. Verschiedene Targetpositionen können erfolgreich angefahren und prinzipiell auch identifiziert werden. Die präsentierte Lösung der Identifikation über die Breite der Signalstruktur erfordert eine konstante Geschwindigkeit, die beim momentanen Prototypen noch nicht gegeben ist. Eine verbesserte Mechanik mit stehendem Antriebsmotor und die Messung mit einem System für schnelle Regelsysteme werden Verbesserungen bringen. Als von jeglichem mechanischen Einfluss unabhängige Lösung kann auf das Abzählen der Targetpositionen aus einer Anschlagposition zurückgegriffen werden.

Die Lichtschranke als Sicherungssystem für die primären Targets funktioniert. Es lässt sich klar zwischen ausgefahrenem und eingefahrenem Motor unterscheiden. Zusätzlich ist es möglich, Strukturen aufzulösen und damit eine genauere Ortsinformation senkrecht zur Strahlachse zu erhalten. Im Test wurde der Motorzustand (ein- oder ausgefahren) über absolute Signalhöhen bestimmt. Da letztlich nur der binäre Zustand interessant ist, ist es möglich durch Bezugnahme auf den Startwert der Messung über relative Signalhöhen eine entsprechende Entscheidung zu treffen. Zusätzlich kann mit diesem System eine Sicherheitssperre realisiert werden, wenn der Z-Motor bei unterbrochener Lichtschranke spannungsfrei geschaltet wird. Für die endgültige Wahl des Lichtwellenleiters der Lichtschranke muss noch getestet werden, welche Faser möglichst wenig durch Strahlenschäden altert und gleichzeitig die benötigten Biegeradien bietet.

Für den späteren Experimentbetrieb wird es notwendig sein, vom Operateur Rückmeldung über das Erreichen einer neuen Schlittenposition anzufordern. Hierfür soll dem Operateur der Signalverlauf des Positionssensors angezeigt werden. Die Entscheidung über das Erreichen einer gültigen Position wird dann manuell getroffen um mögliche Software-Fehler auszuschließen. Für diese manuelle Bestätigung wurden Grundlagen gelegt, für die endgültige Implementierung muss die Signalform des Lagekontrollsystems bekannt sein.

A Bibliographie

- [Abb+16] B. P. Abbott u. a. „Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger“. In: *Phys. Rev. Lett.* 116 (6 Feb. 2016), S. 061102. DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.116.061102>.
- [Ahn+01] J. K. Ahn u. a. „Production of ${}^4_{\Lambda\Lambda}H$ Hypernuclei“. In: *Phys. Rev. Lett.* 87 (13 Sep. 2001), S. 132504. DOI: 10.1103/PhysRevLett.87.132504. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.87.132504>.
- [Aih+81] H. Aihara u. a. „Absorption cross sections for antiprotons on carbon, aluminum and copper at 485 and 597 MeV/c“. In: *Nuclear Physics A* 360.2 (1981), S. 291–296. ISSN: 0375-9474. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0375-9474\(81\)90147-0](http://dx.doi.org/10.1016/0375-9474(81)90147-0). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0375947481901470>.
- [Bea17] BeagleBoard.org Foundation. *BeagleBone 101*. 2017. URL: <http://beagleboard.org/support/bone101> (besucht am 17.02.2017).
- [BFG99] C. J. Batty, E. Friedman und A. Gal. „Experiments with Ξ^- atoms“. In: *Phys. Rev. C* 59 (1 Jan. 1999), S. 295–304. DOI: 10.1103/PhysRevC.59.295. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.59.295>.
- [Ble10] Sebastian Bleser. „Eigenschaften von Silizium-Streifendetektoren in direktem Kontakt mit Absorbermaterial für das sekundäre Target bei PANDA“. Diplomarbeit. Johannes Gutenberg-Universität Mainz: Institut für Kernphysik, 2010.
- [Dem+10] P. B. Demorest u. a. „A two-solar-mass neutron star measured using Shapiro delay“. In: *Nature* 467.7319 (Okt. 2010), S. 1081–1083. ISSN: 0028-0836. DOI: 10.1038/nature09466. URL: <http://dx.doi.org/10.1038/nature09466>.
- [DSW10] H. Dapo, B.-J. Schaefer und J. Wambach. „Appearance of hyperons in neutron stars“. In: *Phys. Rev. C* 81 (3 März 2010), S. 035803. DOI: 10.1103/PhysRevC.81.035803. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.81.035803>.
- [EPI16] EPICS collaboration. *Experimental Physics and Industrial Control System*. 2016. URL: www.aps.anl.gov/epics/index.php (besucht am 17.02.2017).
- [Ern+17] W. Erni u. a. *Technical Design Report for the PANDA Luminosity Detector*. Techn. Ber. GSI, 2017. Im Erscheinen.

- [GG09] FAIR GmbH und GSI. / *MSV* / *Green Paper, The Modularized Start Version : FAIR - Facility for Antiproton and Ion Research*. Darmstadt: FAIR, 2009, 19p. URL: <http://repository.gsi.de/record/54094>.
- [Hoc14] Hochschule Darmstadt, Fachbereich Informatik. *UML Zustandsdiagramm*. 3. Juni 2014. URL: <https://www.fbi.h-da.de/labore/case/uml/zustandsdiagramm.html>.
- [Ich+00] A. Ichikawa u. a. „Study of double-strangeness nuclei with hybrid-emulsion method (KEK-PS E373)“. In: *Nuclear Physics A* 670.1 (2000), S. 289–292. ISSN: 0375-9474. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0375-9474\(00\)00115-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0375-9474(00)00115-9). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375947400001159>.
- [ion17] ion42. *FAIR: Teilchen für die Forschung*. 2017. URL: <https://www.bmbf.de/de/fair-teilchen-fuer-die-forschung-3313.html> (besucht am 20.01.2017).
- [Mic03] MicroE Systems. *Mercury™ 1000V: Vacuum Rated Analog Encoder*. 2003.
- [NY14] K. Nakazawa und J. Yoshida. „Double- Λ hypernuclei at J-PARC-E07 experiment“. In: *Proceedings, 7th International Symposium on Chiral Symmetry in Hadrons and Nuclei (CHIRAL 13): Beijing, China, October 27-30, 2013*. 2014, S. 132–136. DOI: 10.1142/9789814618229_0025.
- [Pat+16] C. Patrignani u. a. „Review of Particle Physics“. In: *Chin. Phys.* C40.10 (2016), S. 100001. DOI: 10.1088/1674-1137/40/10/100001.
- [Pie13a] PiezoMotor. *Installation Guidelines for Piezo Piezo LEGS®*. 7. Feb. 2013. URL: http://www.piezomotor.com/app/content/uploads/150099_Installation_Guidelines_for_Piezo_LEGS.pdf (besucht am 28.10.2016).
- [Pie13b] PiezoMotor. *PiezoMotor Microstep Driver 101*. 2013. URL: http://www.piezomotor.com/app/content/uploads/150080_PMD101.pdf (besucht am 30.03.2017).
- [Pie14] PiezoMotor. *Microstep Driver 101 Technical Manual*. Version 02. 11. Apr. 2014. URL: http://www.piezomotor.com/app/content/uploads/150086_PMD101_TechnicalManual.pdf (besucht am 28.10.2016).
- [Pie16a] PiezoMotor. *Microstepping Driver 101*. 2016. URL: www.piezomotor.com/products/drivers/pmd101/ (besucht am 30.01.2017).
- [Pie16b] PiezoMotor. *Piezo Piezo LEGS® Linear 6N*. 27. Jan. 2016. URL: www.piezomotor.com/products/linear/1110/ (besucht am 30.01.2017).
- [Pie17] PiezoMotor. *Piezo LEGS® 6N Data Sheet*. 20. März 2017. URL: http://www.piezomotor.com/app/content/uploads/150010_LL10.pdf (besucht am 20.03.2017).

- [Psa08] Dimitrios Psaltis. „Probes and Tests of Strong-Field Gravity with Observations in the Electromagnetic Spectrum“. In: *Living Reviews in Relativity* 11.1 (2008), S. 9. ISSN: 1433-8351. DOI: 10.12942/lrr-2008-9. URL: <http://dx.doi.org/10.12942/lrr-2008-9>.
- [Rau16] Nicolas Rausch. „Slowcontrol for the primary target of the $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ hypernuclear experiment“. Bachelorarbeit. Johannes Gutenberg-Universität Mainz: Institut für Kernphysik, 2016.
- [Roj16] Marta Martínez Rojo. „Design, construction and test of the primary target system for $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ “. Masterarbeit. Johannes Gutenberg-Universität Mainz: Institut für Kernphysik, 2016.
- [San10] Alicia Sanchez Lorente. „Feasibility study of performing high precision gamma spectroscopy of $\Lambda\Lambda$ hypernuclei in the $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ experiment“. Diss. Johannes Gutenberg-Universität Mainz: Institut für Kernphysik, 2010.
- [Sch17] Falk Schupp. „Entwicklung einer Methode zur strahlenharten Positionierung für das primäre Hyperkerntarget an $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ “. Diplomarbeit. Johannes Gutenberg-Universität Mainz: Institut für Kernphysik, 2017. Im Erscheinen.
- [Ste17] Marcell Steinen. „The germanium detector array for the hypernuclear experiment at PANDA “. Diss. Johannes Gutenberg-Universität Mainz: Institut für Kernphysik, 2017. Im Erscheinen.
- [Tak+01] H. Takahashi u. a. „Observation of a ${}^6_{\Lambda\Lambda}\text{He}$ Double Hypernucleus“. In: *Phys. Rev. Lett.* 87 (21 Nov. 2001), S. 212502. DOI: 10.1103/PhysRevLett.87.212502. URL: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.87.212502>.
- [The12] The $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ Collaboration. *Technical Design Report for the: $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ Micro Vertex Detector*. Techn. Ber. GSI, Jan. 2012.
- [The16] The $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ Collaboration. „Study of doubly strange systems using stored antiprotons“. In: *Nuclear Physics A* 954 (2016), S. 323–340.
- [Tip08] Tippkemper. *Lichtleiter MS-xxxx-2-L-1GD*. 2008. URL: https://www.tippkemper-matrix.de/uploads/media/MAT-MS-xxxx-2-L-1GD-2GD_d6_01.pdf.
- [Tip09] Tippkemper. *Optoelektronische Analog-Sensoren IRS/IRN/IRD-2LA, Bauform M30*. 22. Juli 2009. URL: https://www.tippkemper-matrix.de/uploads/media/irsnd_analog_2L_gd_d10.pdf (besucht am 17.02.2017).
- [Tob15] Tobias Triffterer. *$\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ Detector Control System*. 30. Nov. 2015. URL: <https://panda-wiki.gsi.de/foswiki/bin/view/DCS/WebHome>.

B Abbildungsverzeichnis

1.1	Einordnung verschiedener Experimente zu $\Lambda\Lambda$ -Hyperkernen	2
1.2	Das NAGARA-Ereignis	3
1.3	Überblick über GSI & FAIR	5
1.4	Schnitt durch den $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Detektor	6
1.5	Schema der Erzeugung eines $\Lambda\Lambda$ -Hyperkerns	8
1.6	Einfangwahrscheinlichkeit gegen Impuls eines Ξ^-	9
1.7	Ein Teil des Germanium-Detektors	11
1.8	Aufbau des Hyperkernexperiments im Inneren des $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Detektors	11
2.1	Schnittbild der Vakuumkammer	12
2.2	Explosionsansicht der Mechanik	13
2.3	Piezo LEGS [®] Linear 6N	14
2.4	Motorleistung in Abhängigkeit der externen Last	15
2.5	Schema des Fahrprinzips	16
2.6	Die Steuereinheit	17
2.7	Die I/O-Port Pinbelegung des PMD101	17
2.8	Spannungsverlauf für die Wellenformen Delta und Rhomb am Motor	18
2.9	BeagleBone Black	20
3.1	Das $\bar{\text{P}}\text{ANDA}$ -Detektor-Kontrollsystem	23
3.2	Ergebnis der udev-Regeln für die Motor-Steuergeräte	28
3.3	Benutzerschnittstelle	35
3.4	Zustandsdiagramm der Steuerlogik	36
3.5	Offset des primären Targets	38
3.6	Anzahl Antiprotonen im HESR und Luminosität gegen die Zeit	39
3.7	Berechnung der Temperatur auf Basis der Wechselwirkungsrate	40
3.8	Target-Wechsel-Logik	40
3.9	Steuerstange, welche die Schalter jeweils an den Positionen auslöst	41
3.10	Aufbau zum Test der Schalter	42
3.11	Spannung gegen Zeit des ADC	43
3.12	Positionserkennung in Software	44
4.1	Aufbau zum Test der Lichtschranke	46
4.2	Spannungspegel der Lichtschranke gegen die Zeit	47
4.3	Spannungspegel der Lichtschranke gegen die Zeit in Vakuumkammer	48
4.4	Spannungspegel der Lichtschranke gegen die Zeit, Schraube im Motor-Kopf	48
4.5	Durchschnittsgeschwindigkeit pro Segment	50

4.6	Durchschnittsgeschwindigkeit, 600 Hz	50
4.7	Durchschnittsgeschwindigkeit, verschiedene Frequenzen	51
4.8	Segmentgeschwindigkeit gegen Subsegmentgeschwindigkeit	52
4.9	Frequenz und Amplitudue des PMD101	53
4.10	Histogramm FWHM	54
4.11	Gebrochenes Widerlager nach 2,5 3km Fahrstrecke. Aus Mangel an Er- satz wurde der Motor für weitere Messungen genutzt.	55
4.12	Durchschnittsgeschwindigkeit pro Segment bei beschädigtem Motor. Sichtbar ist, dass drei verschiedene Fahrgeschwindigkeiten gemessen wurden und diese eine Doppelpeak-Struktur aufweisen.	56
4.13	Segmentgeschwindigkeit gegen Subsegmentgeschwindigkeit, kaputter Motor	57

C Handbücher



- **Nanometer resolution**
- **Closed loop regulation**
- **Open loop mode**
- **General I/O**

The PMD101 is a 1-axis driver for use with Piezo LEGS motors from PiezoMotor. It is one of the more advanced drivers in the product range giving the Piezo LEGS motors resolution down in the nanometer/microradian range. Driving the motors in closed loop is possible when reading back position from an positional sensor. The PMD101 supports quadrature encoders, and serial SSI sensors. Issuing a single command will guide the motor to the exact encoder count, taking in to account the parameter settings for ramping behavior.

Functional principle

The driver controls the Piezo LEGS motor by feeding waveform signals which elongates and bends each of the piezo drive legs. The waveforms are specially designed to make the drive legs perform a precise walking motion. The motion of the drive legs is transferred via friction contact to a linear rod or to a rotary disc.

For each waveform cycle the Piezo LEGS motor will take one full step, by definition called a *waveform-step* (wfm-step). The wfm-step length is load dependant but in the range of a few micrometers for a linear Piezo LEGS motor. Rotary Piezo LEGS motors have their drive legs working on the perimeter of a drive disc. The wfm-step angle depends on the diameter of the rotary motor but is usually less than one milliradian.

The generated signal waveform is made up of a large number of voltage target points in time. Each small voltage change will move the motor only by a fraction of a wfm-step, defined as a *microstep*. The PMD101 driver gives a maximum resolution of 2048 microsteps per full wfm-step. One microstep with highest resolution settings equals ~ 2 nanometer ($0.002 \mu\text{m}$) of linear motion, or ~ 0.5 microradian of angular motion.

Working with the driver

The PMD101 communicates with the host (PC) via USB. Communication with the driver is through a protocol language (ASCII commands). The user can run in closed loop target mode, or in open loop mode, with full access to set resolution, step frequency (speed) etc. Positional sensors are used to keep track of the precise position of the Piezo LEGS motors. The driver can read limit switches and reset at index. Ramping parameters are set to prevent overshooting when closing in on target in closed loop operation. The PMD101 is a full featured driver for demanding applications.

Ordering information

Driver

PMD101	1-axis microstep driver for Piezo LEGS motors
--------	-----------------------------------------------

PiezoMotor Microstep Driver 101

Technical Specification		
Type	PMD101	Note
Number of Axis	1	
Electrical Phases per Axis	4	
Signal Voltage Range	0-45 V	
Max Resolution	2048 μ steps / wfm-step	example LT20 motor at no load: one wfm-step \approx 5 μ m one μ step \approx 2.4 nm
Open Loop Operation	Yes	
Closed Loop Operation	Yes	
Number of Sensor Axis	1	
Supported Sensors	Quadrature Analogue Serial	with index (ABZ) SSi
Quadrature Counting Frequency	5 MHz	
General I/O	3 in 2 out	only 1 input pin available when using 2 limit switches
I/O Port Features	Step direction interface, Analog run	
Host Communication	RS232 (via USB)	hardware implemented USB-to-RS232, commands are sent in plain ASCII format
Host Connector	USB	
Motor Connector	JST BM05B-SRSS-TB	
Sensor Connector	JST BM06B-SRSS-TB	
I/O Port Connector	2 x 8 pin header	for 16 pole IDC plug
Power Supply	12-24 V DC	15 V (1200 mA) AC-DC adaptor included
Dimensions	103 x 65 x 30.4 mm	

150080-03

Visit our website for application examples,
CAD files, videos and more...

www.piezomotor.com



PiezoMotor Uppsala AB
Stålgatan 14
SE-754 50 Uppsala, Sweden

Telephone: +46 18 489 5000
Fax: +46 18 489 5001

info@piezomotor.com
www.piezomotor.com



Optoelektronische Analog-Sensoren IRS/IRN/IRD-2LA

IRN-2LA/AI-GD



II 3G Ex nA IIB T4
II 3D Ex tD A22 IP67 T135°C

Bauform M30

- Mit analogem Signalausgang, Spannung oder Strom
- Geeignet zum Anschluss von Lichtleitern
- Geeignet zur optischen Abstandserfassung
- Zur Trübungserkennung von Flüssigkeiten
- Zur Positionserfassung
- Typ IRD geeignet zum Einsatz in den Ex Zonen 1+20/21
- Typ IRN geeignet zum Einsatz in den Ex Zonen 2+22

IRD-2LA/AI-GD

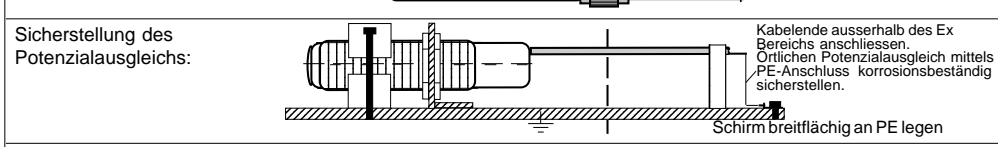
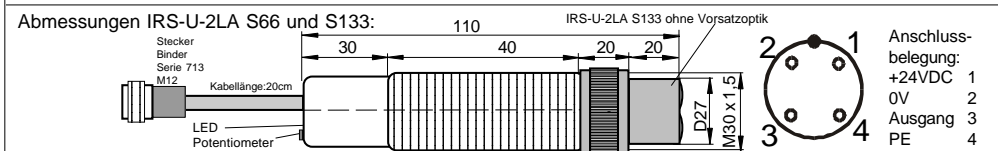
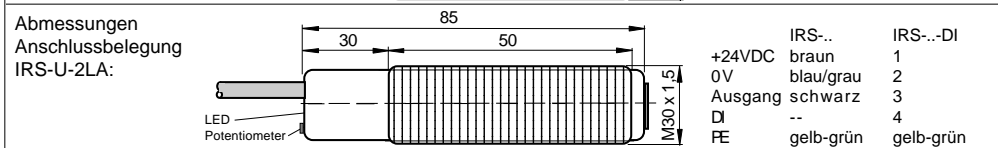
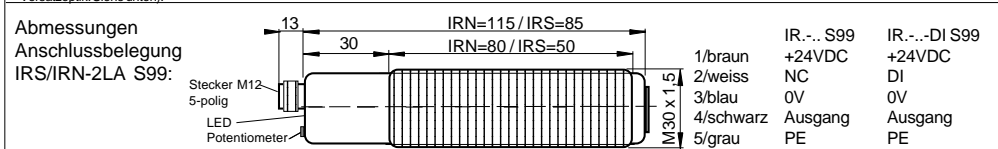
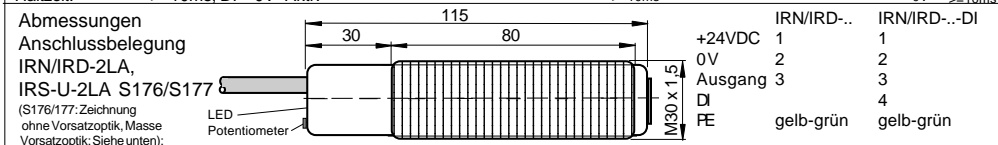
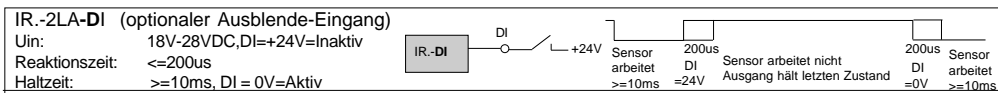


0158

II 2G Ex d IIC T6
II 1/2D Ex tD A20/21 IP67 T90°C

Technische Daten	Typ V-Out	Typ I-Out	IRS-U-2LA IRS-U-2LAI	IRN-2LA-GD IRN-2LAI-GD	IRD-2LA-GD IRD-2LAI-GD
Zündschutzart Gas, nach 94/9/EG			keine	II 3G Ex nA IIB T4	II 2G Ex d IIC T6
Zündschutzart Staub, nach 94/9/EG			keine	II 3D Ex tD A22 IP67 T135°C	II 1/2D Ex tD A20/21 IP67 T90°C
Einsatz in Ex Zonen			keine	2, 22	1, 2, 20/21, 22
Signalhub, Spannungsausgang			0.05VDC - 10.5VDC (Welligkeit < 20mV)		
Signalhub, Stromausgang			0.1mA - 21mA (Welligkeit < 40uA), (4mA - 20mA optional)		
Arbeitsbereich, (einstellbar)	V-Out			5VDC/20cm	
(auf weisses Papier 80g, 20cm x 30cm)	I-Out			10mA/20cm	
Lichtquelle				Infrarot 880nm	
Optischer Öffnungswinkel				ca. 12°	
Max. Bestrahlungsstärke				4.5mW/mm²	
Reaktionsgeschwindigkeit				5ms (IR-2LA S155: 1.5ms)	
Versorgungsspannung				24 VDC (20 bis 28VDC)	
Stromaufnahme				max. 60mA	
Max. Leistungsaufnahme				1.4W	
Spannungs-Ausgang, IR. (-U)-2LA				PNP, Ausgangsimpedanz ca. 250Ω, RL: 2kΩ bis 1MΩ	
Strom-Ausgang, IR. (-U)-2LAI				NPN, Ausgangsimpedanz ca. 500Ω, RL: 0Ω bis 100Ω	
Eingang, nur Typen IR...DI (Disable Eingang)				PNP kompatibel, Ri 10kΩ	
Gehäuse				M30, Ms 58 vernickelt	
Schutzart nach EN 60529			IP 54	IP 67	IP 67
Beständigkeit gegen Vibration und Schock			Vibration: 30g bei 20Hz bis 2kHz. Schock: 50g in jeder Richtung (X, Y, Z)		
Arbeitstemperaturbereich			-20°C < TA < +60°C	-20°C < TA < +50°C	-20°C < TA < +50°C
Arbeitstemperaturbereich, IRS-U-2LA S176			-20°C < TA < +80°C	--	--
Arbeitstemperaturbereich, IRS-U-2LA S177			-20°C < TA < +100°C	--	--
Anschlusskabel, IRN und IRD			3+PE x 0,5mm², geschirmt, TPE, ölbeständig, Länge: 3m		
Anschlusskabel Typen IR...DI			4+PE x 0,5mm², geschirmt, TPE, ölbeständig, Länge: 3m		
Anschlusskabel, IRS			3+PE x 0,5mm², PVC, Länge: 3m		
Anschluss IRN...S99			Lumberg, M12 Stiftstecker, Typ RSF 5-polig		
Zubehör, alle Typen			- 2 Muttern M30 (oder auf Anfrage 1 Klemmschelle)		
Zubehör, IRN/IRD...GD			- 1x Ersatzschraube mit Dichtung zur Potentiometerabdichtung		
Zubehör, IRN...GD S99			- 1x Sicherungsvorrichtung gegen unbeabsichtigtes Lösen des Steckers, aus Kunststoff (im Beipack)		
			- 1x Warnschild "Nicht unter Spannung trennen" (im Beipack)		
Optionen			- IR...DI (mit Ausblende-Eingang (Disable)) - IRS/IRN/IRD-2L-X: Ausgangsfunktion durch Schaltsinn durch Polarität der Versorgungsspannung invertierbar - Kabellänge bis maximal 100m - IRS/IRN...S99: Stecker M12: Lumberg RSF5 - IRS-U-2LA S66: Stecker Binder 713/4-polig, an Kabel 200mm, vormontierte Vorsatzoptik DL30, Reichweite bei 5V am Ausgang = 75cm - IRS/IRN/IRD-2LA-I4 S137: Reduzierte Leistung zur Füllstandsmessung mit dem Lichtleiter Typ SKM-2000-2-T-FG und dem Quarzglasstastkopf QPR-6/320 - IRS-U-2LA S176: TA = -20°C bis +80°C, vormontierte Vorsatzoptik DL30, Reichweite bei 5V am Ausgang = 75cm - IRS-U-2LA S177: TA = -20°C bis +100°C, vormontierte Vorsatzoptik DL30, Reichweite bei 5V am Ausgang = 75cm - IR...A-I4: Sensoren mit Stromausgang 4 - 20mA - IRN-2LAI-GD S110: Mit Vorsatzoptik DL30 und Planreflektor - IRS-U-2LA S133: Stecker Binder 713/4-polig, an Kabel 200mm - IRS-U/IRN/IRD-2LA S155: Reaktionsgeschwindigkeit = 1.5ms		
ATEX Kennzeichnungen am Sensor:					
CE0158			Hersteller mit Anschrift	Produktionsdatum: Ziffern 4 bis 7 der Seriennummer	
Gerätetyp: IRD...:			II 2G Ex d IIC T6, II 1/2D Ex tD A20/21 IP67 T90°C	Zertifikatsnummer: DMT 99 ATEX E 056	
Gerätetyp: IRN...:			II 3G Ex nA IIB T4, II 3D Ex tD A22 IP67 T135°C	Herstellerdeklaration nach 94/9/EG, Tech File Nr: AN-MAT-08-EX-E056	
TA: -20°C < TA < +50°C			Elektrische Daten gemäss Tabelle		
Funktion und LED-Anzeige			LS mit LWL Lichtstrecke frei Taster Taster mit LWL Reflexion, LED leuchtet analog zur Intensität des diffus reflektierten Lichts und damit dem Ausgangshub	LS mit LWL Lichtstrecke unterbrochen Taster Taster mit LWL kein Licht erkannt, LED leuchtet nicht	
Ausgangsanschluss			PNP=OFF R 250Ω Out IRS/IRD...A V-Out 0.05-10.5VDC 0V	+20-28VDC R 500Ω A 0.1-21mA (4-20mA) Out IRS/IRD...A-I I-Out 0V	
Ausgangsdiagramm (erfasst auf weisses Papier, 80g, 20cmx30cm) Potentiometer auf Minimal- und Maximalstellung					

IRSND_ANALOG_2L_GD_010.2009-07-22/HB



Betriebsanleitung / EG-Konformitätserklärung:

Montagevorschrift

Ex-Schutz:
 Die gültigen Regeln und Einrichtungsrichtlinien bezüglich Ex-Schutz müssen zwingend eingehalten werden (En 60079-14). Der örtliche Potenzialausgleich ist korrosionsbeständig und dauerhaft sicher zu stellen. Der Schutzleiter (PE-Anschluss) ist fest mit dem Gehäuse verbunden. Die maximal zulässige Eingangsspannung U_m = 30VDC darf nicht überschritten werden. Ausser Originalteilen, dürfen keine zusätzlichen, den Lichtstrahl fokussierende Einrichtungen, zur Anwendung gelangen. Die Kabel müssen so verlegt bzw. geschützt werden, dass sie nicht beschädigt werden können. Das Kabelende muss innerhalb des Ex Bereichs in bescheinigten Ex Dosen oder ausserhalb des Ex Bereichs aufgelegt werden. Muss das Potentiometer eingestellt werden, muss nach der Betätigung des Potentiometers, die Staubschutzschraube, mit unbeschädigtem Dichting, wieder eingeschraubt werden. In den Zonen 20/21 und 22 dürfen die Sensoren nicht ohne Staubschutzverschraubung betrieben werden. Verlorengelagerte Verschraubungen oder defekte Dichtringe müssen ersetzt werden.
Typ: IRD-2LA/AI-GD darf in den Ex Zonen 1 und 2 zur Anwendung gelangen.
Typ: IRN-2LA/AI-GD darf nur in den Zonen 2 und 22 zur Anwendung gelangen.
Typ: IRN-2LA/AI-GD S99 darf nur in den Zonen 2 und 22 zur Anwendung gelangen. Der Stecker darf nur angeschlossen oder gelöst werden, wenn das Anschlusskabel nicht unter Spannung steht. Anlässlich der Installation des Gerätes, muss die beiliegende Trennsicherung montiert und das beiliegende Warnschild "Nicht unter Spannung trennen!" auf die Kabeldose am Anschlusskabel aufgeklebt werden. Nur Anschlusskabel Lumberg RKT5 5-298/xx (gerade) RKTW/RKWT5 5-298/xx (gewinkelt), 5-polig dürfen zur Anwendung gelangen. Ist die Kabeldose nicht am Stecker angeschlossen, muss die Schutzkappe auf den Stecker aufgesetzt werden.

Allgemeine Montagevorschriften:
 Die Anschlussbelegung ist unbedingt einzuhalten. Bei Verkürzung oder Verlängerung des Anschlusskabels ist der Schirm kurz anzuschliessen bzw. zu verbinden (Innerhalb des Ex Bereichs in bescheinigten Ex Dosen). Die Abschirmung ist breitflächig mit Schutzterde (PE) zu verbinden. Die Sensorkabel dürfen nicht parallel zu Hochspannungs- und Starkstromkabeln verlegt werden. Die Grenzwerte müssen eingehalten werden.

Funktion
 Der Analogsensor IRS/IRD-A liefert, abhängig von der Menge des diffus reflektierten Lichts, ein analoges Ausgangssignal von 0-10 VDC oder 0-20mA (optional 4-20mA). Damit können Abstandserfassungen auf definierte Reflektionsflächen realisiert werden. Mit angeschlossenem Lichtleiter (Funktion als Lichtschranke) dient der Sensor auch der Trübungserkennung von Flüssigkeiten. Mittels dem Potentiometer kann der Sensor optimal an die Messbedingungen angepasst werden.

Optionaler Ausblende-Eingang, Typenreihe "DI":
 Der Disable-Eingang DI dient der schnellen Deaktivierung des Sensors. Werden mehrere Sensoren oder deren Lichtleiter nahe zusammen angeordnet, können sie sich gegenseitig beeinflussen. Mit dem DI-Eingang können die Sensoren schnell aus- und wieder eingeschaltet werden. Die Reaktionszeit beträgt 200µs. Während der Deaktivierung (DI=+24V) hält der Ausgang den zuletzt erkannten Zustand. Liegt der Eingang DI auf 0V oder ist er nicht angeschlossen, arbeitet der Sensor. Die Aktivierungszeit (DI=0V) muss min. 10ms betragen.

Reichweite
 Die nominale Reichweite wird auf weisses Papier A4, 80g bestimmt, bei der der Ausgang 5V / 10mA annimmt. Die Reichweite wird durch die Farbe, die Oberflächenbeschaffenheit und die Form des Messobjekts beeinflusst.

Lichtleiter
 Zusammen mit einem Lichtleiter aus unserem vielseitigen Programm kann der Sensor für die verschiedensten Funktionen, auch als Lichtschranke, verwendet werden.

Wartung
 Der Sensor ist wartungsfrei. Bei einer Verschmutzung sind die Lichtdurchlässe, bzw. der Lichtleiter sorgfältig zu reinigen. Es dürfen keine aggressiven Medien verwendet werden. Reparaturen dürfen nur durch den Hersteller ausgeführt werden.

Sicherheitshinweise
 Wird bei den Geräten IRN-.. S99, die Stecker-Trennsicherung entfernt und das Anschlusskabel angeschlossen oder entfernt, wenn es unter Spannung steht besteht Zündgefahr. Wird das Kabel mit angezogener Buchse nicht am Sensor angeschlossen und die Staubschutzschraube nicht aufgeschraubt und befindet sich das Gerät in einer staubgefährdeten Umgebung, kann die Ablagerung von brennbarem Staub nicht ausgeschlossen werden. Diese Ablagerungen können beim nachträglichen Anschliessen in bestromtem Zustand zu einer Zündung führen. Die Näherungsschalter IRS/IRN/IRD dürfen nicht für den Unfallschutz zur Anwendung gelangen. Im Störfall, kann der Ausgang jeden beliebigen Zustand annehmen. Bei Montage, Betrieb und Unterhalt sind die relevanten EU und nationalen Vorschriften und Richtlinien, besonders bezüglich Explosionschutz zwingend einzuhalten. Unter anderem sind dies: ATEX118a, EX-RL(BGR104), ElExV, TrbF, TRD, UVV, BetrSichV(ATEX137), Einzel-RL 1999/92/EG.

Die Sensoren entsprechen folgenden Bestimmungen:
 EN 60079-0:2004, EN 60079-1:2004, EN 60079-15:2006-05, EN 60079-28:2007, EN 60241-0:2004, EN 61241-1:2004; EN 60529:2000, EN 60950-1:2006; EN 61000-4-2 to EN 61000-4-6, EN 61000-6-1/-2, EN 61000-6-4; Ex Schutz: 94/9/EG (ATEX 100a)

Maschinenrichtlinie: 2006/46/EG. RoHS: 2002/95/EG. Niederspannungsrichtlinie: 73/23/EWG, 93/68/EWG. EMV: 89/336/EWG, 91/263/EWG, 92/31/EWG, 93/68/EWG

Allgemeines
 Änderungen bleiben vorbehalten. Die Näherungsschalter sind so umweltfreundlich wie möglich gebaut. Sie enthalten keine umweltschädlichen Substanzen und weder Silikon noch silikonhaltige Beimengungen. Irreparabel oder nicht mehr gebrauchte Geräte müssen nach den gültigen Vorschriften entsorgt werden.

CE Konformitätserklärung
 Typ IRD-..: EG Baumusterprüfung. Nr: DMT 99 ATEX E 056
 Typ IRN-..: Herstellerdeklaration nach 94/9/EG. Tech File Nr: AN-MAT-08-EX-E056. ATEX Bescheinigung Typ Produktion von Ex Produkten nach der Richtlinie 94/9/EG Bescheinigung Nr.: BVS 03 ATEX ZQS / E118. Die Übereinstimmung der Geräte mit den genannten Richtlinien, Normen und der EU-Baumusterprüfung, sowie die Einhaltung des Qualitätssicherungssystems ISO 9001:2008, mit dem ATEX-Modul "Produktion", bestätigt:
 Hans Bracher, Matrix Elektronik AG

IRSND_ANALOG_2L_GD_d10-2009-07-22JHB

Matrix Elektronik AG (Manufacturer)
 Kirchweg 24 CH-5420 Ehrendingen
 Tel.: +41 56 20400-20
 info@matrix-elektronik.com

Tippekemper - Matrix GmbH
 Meegener Str. 43 D-51491 Overath
 Tel.: +49 2206 9566-0
 info@tippekemper-matrix.com



Lichtleiter MS-xxxx-2-L-1GD / MS-xxxx-2-L-2GD / MS-xxxx-2-L

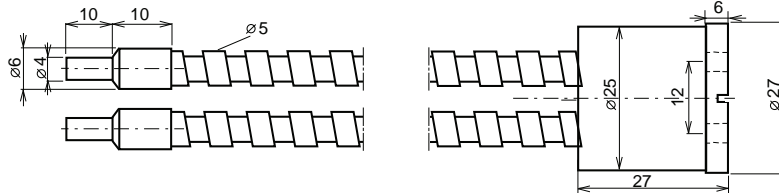


II 1 GD IIB T135°C (T4)
oder
II 2 GD IIB T135°C (T4)

- Lichtleiter mit Messing-Schutzmantel für Lichtschränken-Funktion
- MS-....-2-L-1GD: Einsatz in den Ex Zonen 0, 1, 2, 20, 21, 22
- MS-....-2-L-2GD: Einsatz in den Ex Zonen 1, 2, 21, 22
- MS-....-2-L: Zum Einsatz ausserhalb von Ex Zonen bis TA=+200°C

Typ	MS-xxxx-2-L-1GD	MS-xxxx-2-L-2GD	MS-xxxx-2-L
Technische Daten	Einsatz in Ex Zonen	Einsatz in Ex Zonen	Nicht für Ex Zonen
Längen, Standard	MS-xxxx-2-L(-G/D) (xxxx=Länge in mm, 1000, 2000)		
Zündschutz: EN 13463-1:2002: Nicht-elektrische Geräte für den Einsatz in Ex Zonen	ja	ja	nein
Einsatz in Ex Zonen	0, 1, 2, 20, 21, 22	1, 2, 21, 22	--
Ex Kennzeichnung	II 1GD IIB T135°C (T4)	II 2GD IIB T135°C (T4)	--
Anforderung an angeschlossene Sensoren	Bescheinigt nach DMT 99 ATEX E056		keine
Max. zul. optische Eingangsleistung	<=35mW	<=35mW	nicht begrenzt
Max. mögliche Bestrahlungsstärke	<= 5mW/mm²	<= 5mW/mm²	nicht begrenzt
Aktiver Faserbündeldurchmesser	2 mm		
Aktiver Faserbündelquerschnitt	Sender = 3.14mm² / Empfänger = 3.14mm²		
Transmission, durchschnittlich	50-70%, bei 880nm		
Optischer Öffnungswinkel	ca. 65°, bei 880nm		
Einzelfaserdurchmesser	50µm		
Minimaler Biegeradius	50mm (Einzelbiegung)		
Zulässiger Temperaturbereich TA	0°C < TA < +120°C		-20°C < TA < +200°C
Schutzart nach EN 60529	IP 68		
Material, Adapter	Edelstahl, V2A		
Material, Tastköpfe	Edelstahl, V2A		
Material, Schutzmantel	Messing, verchromt		
Zubehör, im Beipack	2 x Schrumpfschlauch	--	
Mitbescheinigtes Zubehör	- Optische Tastköpfe, Bezeichnung OT-VA (Material: Ms vernickelt)		
ATEX Kennzeichnung der Lichtleiter	CE 0158 Hersteller mit Anschrift Typenbezeichnung: MS-...-1GD II 1 GD IIB T135°C(T4) Typenbezeichnung: MS-...-2GD II 2 GD IIB T135°C(T4) Bescheinigungsnummer: BVS 03 ATEX H 047 X Tech. File Ref.: AN-MAT-04-EX-LWL:2004 TA: 0°C < TA < +120°C Baujahr: Ziffern 4 bis 7 der Fertigungsnummer		

Abmessungen:



Betriebsanleitung / EG-Konformitätserklärung:

Montagevorschrift
 Die Lichtleiter der Serie MS-....-1GD dürfen in den Ex Zonen 0, 1, 2, 20, 21, 22 zur Anwendung gelangen.
 Die Lichtleiter der Serie MS-....-2GD dürfen in den Ex Zonen 1, 2, 21, 22 zur Anwendung gelangen.
 Der Lichtleiter darf nur mit ATEX bescheinigten Sensoren DMT 99 ATEX E056 mit maximal 35mW optischer Ausgangsleistung betrieben werden. Der Lichtleiter muss über den angeschlossenen, ATEX bescheinigten Sensor, dauerhaft und korrosionsbeständig geerdet werden. Die gültigen Regeln und Einrichtungsanweisungen bezüglich Ex-Schutz müssen zwingend eingehalten werden. Die maximal zulässige optische Eingangsleistung des Lichtleiters darf nicht überschritten werden. Ausser Originalteilen, dürfen keine fokussierenden optischen Einrichtungen zur Anwendung gelangen. Der Lichtleiter muss so montiert werden, dass er nicht beschädigt wird und keine Reibungswärme entstehen kann. Werden Lichtleiter und zugehöriger Sensor nicht in der gleichen Ex Zone betrieben, muss der Übergang zwischen den Zonen vorschriftsgemäss sichergestellt werden. Mittels den beigelegten Schrumpf-Kabeltüllen (nur Typ MS-....-1GD) kann die geforderte Dichtigkeit erreicht werden.

Funktion
 Die Lichtleiter dienen der optischen Signalübertragung in explosionsgefährlichen Umgebungen und können mit bescheinigten Tippkemper-Matrix Sensoren mit 500 bis 950nm Lichtwellenlänge betrieben werden. Der erreichbare Transmissionsgrad ist auch abhängig von der Anzahl Biegungen und deren Radien.

Wartung
 Die Lichtleiter sind wartungsfrei. Die optischen Lichtdurchlässe müssen sauber und fettfrei gehalten werden. Durch unzulässig kleine Biegeradien, können der Schutzschlauch oder die Faserbündel beschädigt werden. Reparaturen dürfen nur durch den Hersteller ausgeführt werden.

Allgemeines
 Änderungen bleiben vorbehalten. Der Lichtleiter ist so umweltfreundlich wie möglich gebaut und enthält kein Silikon oder silikonhaltige Beimengungen. Irreparable oder nicht mehr gebrauchte Lichtleiter müssen nach den gültigen Vorschriften entsorgt werden.

Sicherheitshinweise
 Bei Montage, Betrieb und Unterhalt sind die relevanten Vorschriften und Richtlinien, besonders bezüglich Explosionsschutz zwingend einzuhalten. Unter anderem sind dies: ATEX 118a, EX-RL (BGR104), BetrSichV, Einzel-RL 1999/92/EG.
 Die Lichtleiter entsprechen folgenden Bestimmungen:
 - EN 13463-1:2002, EN 13463-1 Berichtigung 1:2003
 - IEC 60079-28 Ed.1.0 CDV; EN 60529:2000
 - Ex-Schutz, 94/9/EG (ATEX 100a)
 - Maschinenrichtlinie, 98/37/EG
 - RoHS, 2002/95/EG
 - Tech. File Ref.: AN-MAT-04-EX-LWL:2004

CE Konformitätserklärung
 MS-.-1GD: EU Baumuster- Prüfbescheinigung BVS 03 ATEX H 047 X
 MS-.-2GD: Herstellerdeklaration nach 94/9/EG.
 Tech. File Ref.: AN-MAT-04-EX-LWL:2004
 ATEX Bescheinigung Typ Produktion von Ex Produkten nach der Richtlinie 94/9/EG. Bescheinigung Nr.: BVS 03 ATEX ZQS / E118
 Die Übereinstimmung der Lichtleiter mit den genannten Richtlinien, Normen und der EU-Baumusterprüfung, sowie die Einhaltung des Qualitätssicherungssystems ISO 9001:2000, mit dem ATEX-Modul "Produktion", bestätigt:
 Hans Bracher, Matrix Elektronik AG

MAT_MS_xxxx_2_L_1GD_2GD_d6/2008-07-21/HB

Tippkemper - Matrix GmbH
 Meegener Str. 43 D-51491 Overath
 Tel.: +49 2206 9566-0 Fax -19
 info@tippkemper-matrix.com

Matrix Elektronik AG (Manufacturer)
 Kirchweg 24 CH-5420 Ehrendingen
 Tel.: +41 56 20400-20 Fax -29
 info@matrix-elektronik.com

Beaglebone Black P8 Header

Head_pin	SPINS	ADDR/OFFSET	GPIO NO.	Name	Mode7	Mode6	Mode5	Mode4	Mode3	Mode2	Mode1	Mode0	PIN	Notes
P8_01				DGND										Ground
P8_02				DGND										Ground
P8_03	6	0x818/018	38	GPIO1_6	gpio1[6]						mmc1_dat6	gpmc_ad6	R9	Used on Board (Group: pinmux_emmc2_pins)
P8_04	7	0x81c/01c	39	GPIO1_7	gpio1[7]						mmc1_dat7	gpmc_ad7	T9	Used on Board (Group: pinmux_emmc2_pins)
P8_05	2	0x808/008	34	GPIO1_2	gpio1[2]						mmc1_dat2	gpmc_ad2	R8	Used on Board (Group: pinmux_emmc2_pins)
P8_06	3	0x80c/00c	35	GPIO1_3	gpio1[3]						mmc1_dat3	gpmc_ad3	T8	Used on Board (Group: pinmux_emmc2_pins)
P8_07	36	0x890/090	66	TIMER4	gpio2[2]					timer4		gpmc_advn_ale	R7	
P8_08	37	0x894/094	67	TIMER7	gpio2[3]					timer7		gpmc_oen_ren	T7	
P8_09	39	0x89c/09c	69	TIMER5	gpio2[5]					timer5		gpmc_be0n_cle	T6	
P8_10	38	0x898/098	68	TIMER6	gpio2[4]					timer6		gpmc_wen	U6	
P8_11	13	0x834/034	45	GPIO1_13	gpio1[13]	pr1_pru0_pru_r30_15		eQEP2B_in	mmc2_dat1	mmc1_dat5	lcd_data18	gpmc_ad13	R12	
P8_12	12	0x830/030	44	GPIO1_12	gpio1[12]	pr1_pru0_pru_r30_14		EQEP2A_IN	MMC2_DAT0	MMC1_DAT4	LCD_DATA19	GPMC_AD12	T12	
P8_13	9	0x824/024	23	EHRPWM2B	gpio2[23]			ehrpwm2B	mmc2_dat5	mmc1_dat1	lcd_data22	gpmc_ad9	T10	
P8_14	10	0x828/028	26	GPIO0_26	gpio0[26]			ehrpwm2_tripzone_in	mmc2_dat6	mmc1_dat2	lcd_data21	gpmc_ad10	T11	
P8_15	15	0x83c/03c	47	GPIO1_15	gpio1[15]	pr1_pru0_pru_r31_15		eQEP2_strobe	mmc2_dat3	mmc1_dat7	lcd_data16	gpmc_ad15	U13	
P8_16	14	0x838/038	46	GPIO1_14	gpio1[14]	pr1_pru0_pru_r31_14		eQEP2_index	mmc2_dat2	mmc1_dat6	lcd_data17	gpmc_ad14	V13	
P8_17	11	0x82c/02c	27	GPIO0_27	gpio0[27]			ehrpwm0_syncno	mmc2_dat7	mmc1_dat3	lcd_data20	gpmc_ad11	U12	
P8_18	35	0x88c/08c	65	GPIO2_1	gpio2[1]		mcasp0_fsr		mmc2_clk	gpmc_wait1	lcd_memory_clk	gpmc_clk_mux0	V12	
P8_19	8	0x820/020	22	EHRPWM2A	gpio0[22]			ehrpwm2A	mmc2_dat4	mmc1_dat0	lcd_data23	gpmc_ad8	U10	
P8_20	33	0x884/084	63	GPIO1_31	gpio1[31]	pr1_pru1_pru_r31_13	pr1_pru1_pru_r30_13			mmc1_cmd	gpmc_be1n	gpmc_csn2	V9	Used on Board (Group: pinmux_emmc2_pins)
P8_21	32	0x880/080	62	GPIO1_30	gpio1[30]	pr1_pru1_pru_r31_12	pr1_pru1_pru_r30_12			mmc1_clk	gpmc_clk	gpmc_csn1	U9	Used on Board (Group: pinmux_emmc2_pins)
P8_22	5	0x814/014	37	GPIO1_5	gpio1[5]						mmc1_dat5	gpmc_ad5	V8	Used on Board (Group: pinmux_emmc2_pins)
P8_23	4	0x810/010	36	GPIO1_4	gpio1[4]						mmc1_dat4	gpmc_ad4	U8	Used on Board (Group: pinmux_emmc2_pins)
P8_24	1	0x804/004	33	GPIO1_1	gpio1[1]						mmc1_dat1	gpmc_ad1	V7	Used on Board (Group: pinmux_emmc2_pins)
P8_25	0	0x800/000	32	GPIO1_0	gpio1[0]						mmc1_dat0	gpmc_ad0	U7	Used on Board (Group: pinmux_emmc2_pins)
P8_26	31	0x87c/07c	61	GPIO1_29	gpio1[29]							gpmc_csn0	V6	
P8_27	56	0x8e0/0e0	86	GPIO2_22	gpio2[22]	pr1_pru1_pru_r31_8	pr1_pru1_pru_r30_8				gpmc_a8	lcd_vsync	U5	Allocated (Group: nxp_hdmi_bonelt_pins)
P8_28	58	0x8e8/0e8	88	GPIO2_24	gpio2[24]	pr1_pru1_pru_r31_10	pr1_pru1_pru_r30_10				gpmc_a10	lcd_pclk	V5	Allocated (Group: nxp_hdmi_bonelt_pins)
P8_29	57	0x8e4/0e4	87	GPIO2_23	gpio2[23]	pr1_pru1_pru_r31_9	pr1_pru1_pru_r30_9				gpmc_a9	lcd_hsync	R5	Allocated (Group: nxp_hdmi_bonelt_pins)
P8_30	59	0x8ec/0ec	89	GPIO2_25	gpio2[25]						gpmc_a11	lcd_ac_bias_en	R6	Allocated (Group: nxp_hdmi_bonelt_pins)
P8_31	54	0x8d8/0d8	10	UART5_CTSN	gpio0[10]	uart5_ctsn		uart5_rxd	mcasp0_axr1	eQEP1_index	gpmc_a18	lcd_data14	V4	Allocated (Group: nxp_hdmi_bonelt_pins)
P8_32	55	0x8dc/0dc	11	UART5_RTSN	gpio0[11]	uart5_rtsn		mcasp0_axr3	mcasp0_ahclkx	eQEP1_strobe	gpmc_a19	lcd_data15	T5	Allocated (Group: nxp_hdmi_bonelt_pins)
P8_33	53	0x8d4/0d4	9	UART4_RTSN	gpio0[9]	uart4_rtsn		mcasp0_axr3	mcasp0_fsr	eQEP1B_in	gpmc_a17	lcd_data13	V3	Allocated (Group: nxp_hdmi_bonelt_pins)
P8_34	51	0x8cc/0cc	81	UART3_RTSN	gpio2[17]	uart3_rtsn		mcasp0_axr2	mcasp0_ahclr	ehrpwm1B	gpmc_a15	lcd_data11	U4	Allocated (Group: nxp_hdmi_bonelt_pins)
P8_35	52	0x8d0/0d0	8	UART4_CTSN	gpio0[8]	uart4_ctsn		mcasp0_axr2	mcasp0_aclkr	eQEP1A_in	gpmc_a16	lcd_data12	V2	Allocated (Group: nxp_hdmi_bonelt_pins)
P8_36	50	0x8c8/0c8	80	UART3_CTSN	gpio2[16]	uart3_ctsn			mcasp0_axr0	ehrpwm1A	gpmc_a14	lcd_data10	U3	Allocated (Group: nxp_hdmi_bonelt_pins)
P8_37	48	0x8c0/0c0	78	UART5_TXD	gpio2[14]	uart2_ctsn		uart5_txd	mcasp0_aclkx	ehrpwm1_tripzone_in	gpmc_a12	lcd_data8	U1	Allocated (Group: nxp_hdmi_bonelt_pins)
P8_38	49	0x8c4/0c4	79	UART5_RXD	gpio2[15]	uart2_rtsn		uart5_rxd	mcasp0_fsx	ehrpwm0_syncno	gpmc_a13	lcd_data9	U2	Allocated (Group: nxp_hdmi_bonelt_pins)
P8_39	46	0x8b8/0b8	76	GPIO2_12	gpio2[12]	pr1_pru1_pru_r31_6	pr1_pru1_pru_r30_6			eQEP2_index	gpmc_a6	lcd_data6	T3	Allocated (Group: nxp_hdmi_bonelt_pins)
P8_40	47	0x8bc/0bc	77	GPIO2_13	gpio2[13]	pr1_pru1_pru_r31_7	pr1_pru1_pru_r30_7	pr1_edio_data_out7		eQEP2_strobe	gpmc_a7	lcd_data7	T4	Allocated (Group: nxp_hdmi_bonelt_pins)
P8_41	44	0x8b0/0b0	74	GPIO2_10	gpio2[10]	pr1_pru1_pru_r31_4	pr1_pru1_pru_r30_4			eQEP2A_in	gpmc_a4	lcd_data4	T1	Allocated (Group: nxp_hdmi_bonelt_pins)
P8_42	45	0x8b4/0b4	75	GPIO2_11	gpio2[11]	pr1_pru1_pru_r31_5	pr1_pru1_pru_r30_5			eQEP2B_in	gpmc_a5	lcd_data5	T2	Allocated (Group: nxp_hdmi_bonelt_pins)
P8_43	42	0x8a8/0a8	72	GPIO2_8	gpio2[8]	pr1_pru1_pru_r31_2	pr1_pru1_pru_r30_2			ehrpwm2_tripzone_in	gpmc_a2	lcd_data2	R3	Allocated (Group: nxp_hdmi_bonelt_pins)
P8_44	43	0x8ac/0ac	73	GPIO2_9	gpio2[9]	pr1_pru1_pru_r31_3	pr1_pru1_pru_r30_3			ehrpwm0_syncno	gpmc_a3	lcd_data3	R4	Allocated (Group: nxp_hdmi_bonelt_pins)
P8_45	40	0x8a0/0a0	70	GPIO2_6	gpio2[6]	pr1_pru1_pru_r31_0	pr1_pru1_pru_r30_0			ehrpwm2A	gpmc_a0	lcd_data0	R1	Allocated (Group: nxp_hdmi_bonelt_pins)
P8_46	41	0x8a4/0a4	71	GPIO2_7	gpio2[7]	pr1_pru1_pru_r31_1	pr1_pru1_pru_r30_1			ehrpwm2B	gpmc_a1	lcd_data1	R2	Allocated (Group: nxp_hdmi_bonelt_pins)
P9 Header	cat SPINS	ADDR + 44e10000	GPIO NO. (Mode 7)	Name	Mode 7	Mode 6	Mode 5	Mode 4	Mode 3	Mode 2	Mode 1	Mode 0	CPU PIN	Updates Available at www.derekmolloy.ie
		Offset from: 44e10800												

User LEDs	SPINS	ADDR	GPIO NO.	Name
USR0	21	0x854/054	53	GPIO1_21
USR1	22	0x858/058	86	GPIO1_22
USR2	23	0x85c/05c	87	GPIO1_23
USR3	24	0x860/060	88	GPIO1_24

GPIO Settings				
Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2,1,0
Slew Control	Receiver Active	Pullup/Pulldown	Enable Pullup/down	Mux Mode
0 Fast	0 Disable	0 Pulldown select	0 Enabled	000 Mode 0 to
1 Slow	1 Enable	1 Pullup select	1 Disabled	111 Mode 7

e.g. OUTPUT GPIO(mode7) 0x07 pulldown, 0x17 pullup, 0x?f no pullup/down
e.g. INPUT GPIO(mode7) 0x27 pulldown, 0x37 pullup, 0x?f no pullup/down

Beaglebone Black P9 Header

Head_pin	\$PINS	ADDR/OFFSET	Name	GPIO NO.	Mode7	Mode6	Mode5	Mode4	Mode3	Mode2	Mode1	Mode0	PIN	Notes
P9_01			GND											Ground
P9_02			GND											Ground
P9_03			DC 3.3V											250mA Max Current
P9_04			DC 3.3V											250mA Max Current
P9_05			VDD 5V											1A Max Current (only if DC jack powered)
P9_06			VDD 5V											1A Max Current (only if DC jack powered)
P9_07			SYS 5V											250mA Max Current
P9_08			SYS 5V											250mA Max Current
P9_09			PWR_BUTTON											Has a 5V Level (pulled up by TPS65217C)
P9_10			SYS_RESETn									RESET_OUT	A10	
P9_11	28	0x870/070	UART4_RXD	30	gpio0[30]	uart4_rxd_mux2		mmc1_sdc	rmii2_crs_dv	gpmc_csn4	mii2_crs	gpmc_wait0	T17	NB: GPIOs limit current to 4-6mA output
P9_12	30	0x878/078	GPIO1_28	60	gpio1[28]	mcasp0_aclkr_mux3		gpmc_dir	mmc2_dat3	gpmc_csn6	mii2_col	gpmc_be1n	U18	and approx. 8mA on input.
P9_13	29	0x874/074	UART4_TXD	31	gpio0[31]	uart4_txd_mux2		mmc2_sdc	rmii2_rxerr	gpmc_csn5	mii2_rxerr	gpmc_wpn	U17	
P9_14	18	0x848/048	EHRPWM1A	50	gpio1[18]	ehrpwm1A_mux1		gpmc_a18	mmc2_dat1	rgmii2_td3	mii2_txd3	gpmc_a2	U14	
P9_15	16	0x840/040	GPIO1_16	48	gpio1[16]	ehrpwm1_tripzone_input		gpmc_a16	mii2_txen	rmii2_tctl	gmi2_ben	gpmc_a0	R13	
P9_16	19	0x84c/04c	EHRPWM1B	51	gpio1[19]	ehrpwm1B_mux1		gpmc_a19	mmc2_dat2	rgmii2_td2	mii2_txd2	gpmc_a3	T14	
P9_17	87	0x95c/15c	I2C1_SCL	5	gpio0[5]			pr1_uart0_txd	ehrpwm0_synci	I2C1_SCL	mmc2_sdpw	spi0_cs0	A16	
P9_18	86	0x958/158	I2C1_SDA	4	gpio0[4]			pr1_uart0_rxd	ehrpwm0_tripzone	I2C1_SDA	mmc1_sdpw	spi0_d1	B16	
P9_19	95	0x97c/17c	I2C2_SCL	13	gpio0[13]		pr1_uart0_rts_n	spi1_cs1	I2C2_SCL	dcan0_rx	timer5	uart1_rtsn	D17	Allocated (Group: pinmux_i2c2_pins)
P9_20	94	0x978/178	I2C2_SDA	12	gpio0[12]		pr1_uart0_cts_n	spi1_cs0	I2C2_SDA	dcan0_tx	timer6	uart1_ctsn	D18	Allocated (Group: pinmux_i2c2_pins)
P9_21	85	0x954/154	UART2_TXD	3	gpio0[3]	EMU3_mux1		pr1_uart0_rts_n	ehrpwm0B	I2C2_SCL	uart2_txd	spi0_d0	B17	
P9_22	84	0x950/150	UART2_RXD	2	gpio0[2]	EMU2_mux1		pr1_uart0_cts_n	ehrpwm0A	I2C2_SDA	uart2_rxd	spi0_sclk	A17	
P9_23	17	0x844/044	GPIO1_17	49	gpio1[17]	ehrpwm0_synco		mmc2_dat0	rgmii2_rxdv	gmi2_rxdv	gpmc_a1	V14		
P9_24	97	0x984/184	UART1_TXD	15	gpio0[15]	pr1_pr_u0_pru_r31_16	pr1_uart0_txd		I2C1_SCL	dcan1_rx	mmc2_sdpw	uart1_txd	D15	
P9_25	107	0x9ac/1ac	GPIO3_21	117	gpio3[21]	pr1_pr_u0_pru_r31_7	pr1_pr_u0_pru_r30_7	EMU4_mux2	mcasp1_axr1	mcasp0_axr3	eQEPO_strobe	mcasp0_ahclkx	A14	Allocated (Group: mcasp0_pins)
P9_26	96	0x980/180	UART1_RXD	14	gpio0[14]	pr1_pr_u0_pru_r31_16	pr1_uart0_rxd		I2C1_SDA	dcan1_tx	mmc1_sdpw	uart1_rxd	D16	
P9_27	105	0x9a4/1a4	GPIO3_19	115	gpio3[19]	pr1_pr_u0_pru_r31_5	pr1_pr_u0_pru_r30_5	EMU2_mux2	mcasp1_fsx	mcasp0_axr2	eQEPOB_in	mcasp0_fsr	C13	
P9_28	103	0x99c/19c	SPI1_CS0	113	gpio3[17]	pr1_pr_u0_pru_r31_3	pr1_pr_u0_pru_r30_3	eCAP2_in_PWM2_out	spi1_cs0	mcasp0_axr2	ehrpwm0_synci	mcasp0_ahclk	C12	Allocated (Group: mcasp0_pins)
P9_29	101	0x994/194	SPI1_D0	111	gpio3[15]	pr1_pr_u0_pru_r31_1	pr1_pr_u0_pru_r30_1	mmc1_sdc_mux1	spi1_d0		ehrpwm0B	mcasp0_fsx	B13	Allocated (Group: mcasp0_pins)
P9_30	102	0x998/198	SPI1_D1	112	gpio3[16]	pr1_pr_u0_pru_r31_2	pr1_pr_u0_pru_r30_2	mmc2_sdc_mux1	spi1_d1		ehrpwm0_tripzone	mcasp0_axr0	D12	Allocated? Mcasp0_pins? Check...
P9_31	100	0x990/190	SPI1_SCLK	110	gpio3[14]	pr1_pr_u0_pru_r31_0	pr1_pr_u0_pru_r30_0	mmc0_sdc_mux1	spi1_sclk		ehrpwm0A	mcasp0_aclkr	A13	Allocated (Group: mcasp0_pins)
P9_32			VADC											Voltage Reference for ADC (NB: 1.8V)
P9_33			AIN4											C8 NB: 1.8V tolerant
P9_34			AGND											Ground for ADC
P9_35			AIN6											A8 NB: 1.8V tolerant
P9_36			AINS											B8 NB: 1.8V tolerant
P9_37			AIN2											B7 NB: 1.8V tolerant
P9_38			AIN3											A7 NB: 1.8V tolerant
P9_39			AIN0											B6 NB: 1.8V tolerant
P9_40			AIN1											C7 NB: 1.8V tolerant
P9_41A	109	0x9b4/1b4	CLKOUT2	20	gpio0[20]	EMU3_mux0	pr1_pr_u0_pru_r31_16	timer7_mux1	clkout2	tc1kin		xdma_event_intr1	D14	Both signals are connected to P21 of P11
P9_41B		0x9a8/1a8	GPIO3_20	116	gpio3[20]	pr1_pr_u0_pru_r31_6	pr1_pr_u0_pru_r30_6	emu3	Mcasp1_axr0		eQEPO_index	mcasp0_axr1	D13	Both signals are connected to P21 of P11
P9_42A	89	0x964/164	GPIO0_7	7	gpio0[7]	xdma_event_intr2	mmc0_sdpw	spi1_sclk	pr1_ecap0_ecap_capin_apwm_o	spi1_cs1	uart3_txd	eCAP0_in_PWM0_out	C18	Both signals are connected to P22 of P11
P9_42B		0x9a0/1a0	GPIO3_18	114	gpio3[18]	pr1_pr_u0_pru_r31_4	pr1_pr_u0_pru_r30_4		Mcasp1_aclkr	Mcasp0_axr2	eQEPOA_in	Mcasp0_aclkr	B12	Allocated (Group: mcasp0_pins)
P9_43			GND											- See Pg.50 of the SRM
P9_44			GND											Ground
P9_45			GND											Ground
P9_46			GND											Ground

P9 Header cat \$PINS ADDR + Name GPIO NO. Mode 7 Mode 1 Mode 0 CPU Notes
 Allocated 44e10000 Offset from: 44e10800

GPIO Settings			
Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3
Slew Control	Receiver Active	Pullup/Pulldown	Enable Pullup/Pulldown
0 Fast	0 Disable	0 Pulldown select	0 Enabled
1 Slow	1 Enable	1 Pullup select	1 Disabled
			Mux Mode 000 Mode 0 to 111 Mode 7

e.g. OUTPUT GPIO(mode7) 0x07 pulldown, 0x17 pullup, 0x?F no pullup/down
 e.g. INPUT GPIO(mode7) 0x27 pulldown, 0x37 pullup, 0x?F no pullup/down

Please e-mail me directly at:
derek@derekmolloy.ie
 if you notice a mistake
 Thanks Frank for the PRU work!

Danksagung

Abschließend möchte ich mich bei allen bedanken, die mich beim Schreiben der Diplomarbeit unterstützt haben.

Mein Dank geht an Professor Josef Pochodzalla, der mir das Schreiben der Diplomarbeit in seiner Forschungsgruppe ermöglicht hat und dabei immer ein offenes Ohr für Fragen hatte. In den regelmäßigen Arbeitsgruppenmeetings gab er Anregungen zum weiteren Vorgehen.

Ebenso möchte ich mich bei Professor Patrick Achenbach für die Erstellung des Zweitgutachtens bedanken.

Bei Dr. Alicia Sanchez Lorente möchte ich mich für die Unterstützung bei theoretischen Fragen bedanken.

Besonderer Dank geht an Dr. Florian Feldbauer für die Bereitstellung wesentlicher Teile der ADC-Leseroutine und für seine Hilfe bezüglich EPICS.

Dank aussprechen möchte ich auch Sebastian Bleser und Marcell Steinen für ihre Geduld zur Beantwortung von allen Fragen zu PANDA und Root sowie die Hinweise zur Formatierung der Arbeit.

Bei Falk Schupp möchte ich mich für die gute Kooperation während der Bearbeitung unserer Arbeiten bedanken. Insbesondere möchte ich mich dafür bedanken, dass er seine Skripte zur Segmentierung der Messdaten zur Verfügung gestellt hat.

Ich möchte mich außerdem bei denjenigen bedanken, die die Arbeit Korrektur gelesen haben.

Schließlich möchte ich mich bei meiner Familie für die Unterstützung während des Studiums bedanken.