

Untersuchungen zur Positionskalibrierung mit einem neuartigen piezoelektrischen Instrument für KM3NeT

Masterarbeit aus der Physik

vorgelegt von
Bernhard Scherl
17. September 2014

Erlangen Centre for Astroparticle Physics
Physikalisches Institut 1
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg



Betreuer: Prof. Dr. Ulrich Katz

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Neutrinos und ihre Detektion	7
2.1	Neutrinos	7
2.2	Optische Detektion	7
2.3	Akustische Detektion	8
3	Neutrinodektoren im Mittelmeer	10
3.1	Das ANTARES-Neutrino-teleskop	10
3.2	Das KM3NeT-Neutrino-teleskop	10
3.3	Das optische KM3NeT-Modul in ANTARES	13
4	Positionierung	16
4.1	Motivation	16
4.2	Pingerzyklus	16
4.3	Triangulation	19
5	Analyse der akustischen PPM-DOM-Daten	21
5.1	Datenstruktur	21
5.2	Zeitumrechnung	21
5.3	Runstart	22
5.4	Datennahmelücken	22
5.5	Acoustic ROOT Format	22
5.6	Von den Rohdaten zum ARF	23
5.7	Clipping	24
5.8	Darstellungsartefakte	24
5.9	Störsignale der Hydrophone	26
6	Methoden der Ankunftszeitbestimmung	28
6.1	Fehlerbetrachtung	28
6.2	Schwellenwertmethode	28
6.3	Kreuzkorrelation	29
6.4	Hilbert-Transformation	31
6.5	Methodenvergleich	32
6.5.1	Verwendete Runs	32
6.5.2	Anzahl erkannter Pinger	32
6.5.3	Positionierungsergebnisse mit Minuit	35
6.5.4	Positionierungsfehler aus Minuit	36
6.5.5	Positionsschwankungen innerhalb eines Runs	37
6.5.6	Ergebnis	39
7	Zeitoffset-Fit	40
7.1	Verwendete Runs	40

7.2	Vorgehensweise	40
7.3	Durchschnittlicher Zeitoffset	40
7.4	Positionierung mit gemitteltem Zeitoffset	41
7.5	Vergleich zwischen gemitteltem und mitgefittetem Offset	41
8	Weitere Analysen	44
8.1	Abhängigkeit der Amplitude vom Einfallswinkel	44
8.2	Geometrische Effekte	44
8.3	Abhängigkeit von der Anzahl der Pinger	46
9	Zusammenfassung und Ausblick	48
A	Graphische Darstellung der Positionierungsergebnisse	51

1 Einleitung

Bereits vor vielen Jahrtausenden waren die Menschen von den Erscheinungen des nächtlichen Himmels fasziniert. Mit bloßem Auge versuchten sie, Systematiken in dem, was sie am Himmel erkennen konnten, zu finden und nützliche Anwendungen – wie zum Beispiel die Navigation auf Schiffen auf dem offenen Meer – zu ermöglichen. Sie entwickelten große Teleskope, um den Himmel besser beobachten zu können und bauten Sternwarten, um diese Teleskope und andere Instrumente, die zur Beobachtung nötig waren, gemeinsam nutzen zu können.

Die Errungenschaften dieser Beobachtungen reichten schon früh bis weit in das tägliche Leben: Vor dem Bau von Atomuhren oblag es den Astronomen in ihren Sternwarten, die exakte Uhrzeit für einen Ort zu bestimmen. Dies geschah über die Kenntnis, wann ein Stern an welchem Ort zu beobachten sein sollte. Diese Zeit wurde dann telegraphisch an die Nutzer – wie zum Beispiel Häfen – weitergegeben.

Im zwanzigsten Jahrhundert machte die Astronomie große Fortschritte. Einerseits war nun Raumfahrt möglich. Erstmals hat ein Mensch den Mond betreten. Doch auch relativ nahe am Boden wurden große Fortschritte erzielt: Man erinnert sich an Dinge wie die Entdeckung der kosmischen Höhenstrahlung durch Victor Hess Anfang des 20. Jahrhunderts oder das zufällige Entdecken der kosmischen Hintergrundstrahlung durch Mitarbeiter einer Telekommunikationsfirma. Speziell in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde durch die Fortschritte in der Elektronik und Computertechnik viel Fortschritt in der Forschung ermöglicht. Endlich konnte man unvorstellbare Datenberge in kürzester Zeit verarbeiten. Beide Disziplinen – die Raumfahrt und die Computertechnik zusammen – ermöglichten Dinge wie den Bau von Kommunikationssatelliten, so dass selbst die Menschen in den abgelegensten Gebieten der Erde heute miteinander kommunizieren können, als wären sie nur wenige Straßen voneinander entfernt. Auch dies wäre ohne Mithilfe der Astronomie und Physik niemals möglich gewesen.

Heute sind auch Livebilder in sehr guter Qualität von Raumstationen wie der International Space Station ISS möglich. Gerade diese Greifbarkeit des Weltalls führt dazu, dass die Begeisterung dafür nach wie vor anhält und immer wieder neue Wissenschaftler seine Rätsel lösen wollen. Was nun vor über 100 Jahren mit den Ballonflügen von Victor Hess begann, gipfelt heute in riesigen Experimenten zur Detektion von Teilchen aus dem Weltall. Den Neutrinos als Boten wird dabei eine besondere Rolle zugesprochen – einerseits lassen sie sich nicht ablenken wie geladene Teilchen, so dass aus der Einfallsrichtung die Herkunftsrichtung geschlossen werden kann, andererseits haben sie einen sehr geringen Wirkungsquerschnitt, so dass sie sehr selten unterwegs mit anderen Teilchen reagieren, die dann wiederum abgelenkt werden können oder gar nicht mehr auf der Erde ankommen.

Durch die Detektion von kosmischen Neutrinos erhofft man sich nun Hinweise auf die genaue Beschaffenheit des Weltalls. Durch Fortschritte in der Detektor- und Computertechnik wird eine immer bessere Detektion von Neutrinos möglich. Jedoch sind dafür – wie bereits erwähnt – riesige Experimente nötig, die in der Regel in internationaler Zusammenarbeit entstehen.

Jedes kleinste Bauteil in diesen Experimenten ist allerdings von äußerster Wichtigkeit. So auch ein piezoelektrisches Instrument, das für einen zukünftigen Großdetektor zur Detektion kosmischer Neutrinos im Mittelmeer entwickelt wurde und dessen Eigenschaften und Fähigkeiten ich in dieser Arbeit genauer untersuchen werde.

Zu diesem Zwecke werde ich zunächst einige physikalische Grundlagen von Neutrinos und ihrer Detektion erklären. Anschließend werde ich verschiedene aktuelle und zukünftige Neutrinode-

tektoren im Mittelmeer vorstellen. Ich werde weiterhin erklären, wozu man das piezoelektrische Instrument benötigt und welche physikalischen Grundlagen dahinter stecken. Dann werde ich auf die charakteristischen Eigenschaften der Daten, die dieses Instrument liefert, eingehen und verschiedene Techniken aus der Signalverarbeitung erproben und vergleichen. Zum Ende meiner Arbeit werde ich noch einige andere Tests am Instrument durchführen und deren Einfluss auf die Nützlichkeit des Instruments erläutern.

2 Neutrinos und ihre Detektion

2.1 Neutrinos

Neutrinos sind nahezu masselose Elementarteilchen. Zu jedem geladenen Lepton (Elektron, Myon oder Tau) existieren ein Neutrino mit dem entsprechenden Flavour sowie jeweils ein passendes Antineutrino.

Neutrinos werden auch nach ihrem Herkunftsort unterschieden, im Wesentlichen kann man unterscheiden:

- **Solare und atmosphärische Neutrinos:** Diese Neutrinos entstehen z.B. in der Erdatmosphäre oder dem Erdinneren, sind also irdischen Ursprungs. Diese sollen hier nicht weiter betrachtet werden.
- **Kosmische Neutrinos:** Diese entstehen außerhalb des Sonnensystems. Sie sind damit nicht irdischen Ursprungs und haben eine deutlich höhere Energie als solare und atmosphärische Neutrinos. Aus ihnen können Informationen über Begebenheiten im Universum gewonnen werden, weswegen wir uns im Folgenden mit diesen beschäftigen wollen.

Aufgrund ihres geringen Wirkungsquerschnittes sind Neutrinos nur mit großem Aufwand zu detektieren. Riesige Detektoren – wie z.B. ANTARES¹ und KM3NeT² – sind erforderlich, um die Chance auf einige wenige detektierte Ereignisse zu haben.

Die Detektion von Neutrinos basiert auf der Reaktion mit einem Nukleon aus einem Detektormaterial. Es gibt Experimente mit großen Tanks, die jedoch nur für hohe Neutrinoflüsse, wie sie z.B. in der Sonne, der Atmosphäre oder in Kernkraftwerken erzeugt werden, geeignet sind. Für die bereits oben genannten Experimente ANTARES und KM3NeT – um die es im weiteren Verlauf dieser Arbeit gehen soll – wurde das Wasser des Mittelmeeres als preisgünstiges und leicht verfügbares Detektormaterial gewählt.

In diesem Wasser können die Neutrinos eines Flavours l nun mit einem Nukleon N wie folgt reagieren:

$$\nu_l + N \rightarrow l^- + X \quad (2.1)$$

Hierbei entstehen ein Lepton l (passend zum Flavour des Neutrinos) und weitere Reaktionsprodukte X aus der Spaltung des Nukleons N .

Vor allem das geladene Lepton l und die aus den Spaltprodukten X entstehenden hadronischen Schauer können nun – im Gegensatz zum Neutrino an sich – detektiert werden.

Im Folgenden werde ich auf zwei Detektionsmethoden – eine erprobte und bewährte sowie eine neuartige, sich noch in der Entwicklung und Erprobung befindliche – eingehen und die Relevanz dieser Masterarbeit für beide Methoden veranschaulichen.

2.2 Optische Detektion

Die optische Detektion, wie sie bereits u.a. in ANTARES angewendet wird (und auch in KM3NeT angewendet werden soll), basiert auf dem Cherenkoeffekt. Dabei sondern geladene

¹<http://antares.in2p3.fr>

²<http://www.km3net.org>

Teilchen, wenn sie sich in einem Medium mit einer Geschwindigkeit bewegen, die die Lichtgeschwindigkeit in diesem Medium übersteigt, Licht (Cherenkovlicht) mit einem Frequenzspektrum ab. das im ultravioletten bis bläulichen Bereich sein Intensitätsmaximum hat.

Neutrinos sind zwar ungeladen, das in Gleichung 2.1 entstandene Lepton jedoch geladen. Auch weitere der entstehenden Teilchen im Schauer können geladen sein. Das Cherenkovlicht dieser Teilchen wird in einem Kegel um die Bewegungsachse abgestrahlt, dessen Winkel im Mittelmeer bei etwa 42° liegt. Bei den entstehenden Teilchenschauern entsteht auch Cherenkovlicht, das sich abhängig von Schauerenergie und Winkel zur Schauerachse parametrisieren lässt, womit auch eine Rekonstruktion der ursprünglichen Neutrinoflugrichtung und -energie möglich ist (siehe z.B. HARTMANN [Har06]).

2.3 Akustische Detektion

Eine andere (und bisher noch in der Erprobung befindliche) Möglichkeit der Neutrinodetektion ist die akustische Detektion. Ein Medium erhitzt sich, wenn Energie in einer Teilchenkaskade frei wird. Durch die dabei eintretende Ausdehnung wird eine Druckwelle (die also eine Schallwelle ist) erzeugt, die sich dann im Medium (in unserem Fall Wasser) ausbreitet. Die Ausbreitung erfolgt scheibenförmig („pancake“). [Ask+79]

Die Druckwelle löst einen bipolaren Puls aus, der unter Annahme einer gaußförmigen Energiedichte durch

$$p = -p_0 \cdot \frac{t - t_0}{\tau} \exp\left(\frac{-(t - t_0)^2}{2\tau^2}\right) \quad (2.2)$$

beschrieben werden kann (siehe z.B. NEFF [Nef13, S. 43]). Hierbei sind t_0 der Zeitpunkt des Nulldurchgangs und τ die Zeitkonstante des Signals. p_0 ist die Anfangsamplitude des Drucks und t die aktuelle Zeit. Ein solcher bipolarer Puls mit der Zeitkonstante von $20 \mu\text{s}$ und einer Anfangsamplitude von 5 mPa ist in Abb. 2.1 dargestellt.

Da man die Richtung und Energie des ursprünglichen Neutrinos aus der Ausbreitungsrichtung und -energie dieser Druckwelle gewinnen kann, ist eine möglichst exakte Ankunftszeitenbestimmung für diese Druckwelle notwendig und das Thema meiner Arbeit. Eine präzise Ankunftszeitenbestimmung ist auch besonders wichtig für die Positionskalibrierung in Neutrinodetektoren, die ich in Kapitel 4 beschreiben werde und die auch für die optische Detektion benötigt wird.

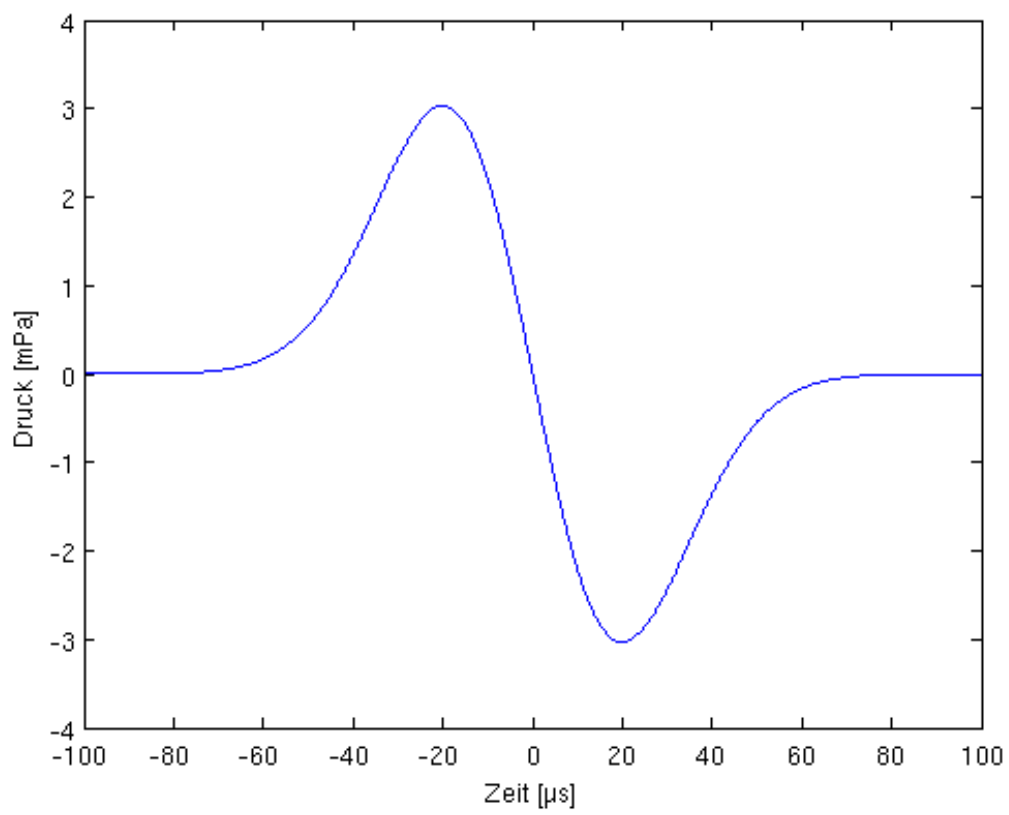


Abbildung 2.1: Bipolarer Puls gemäß Gleichung 2.2

3 Neutrinodektoren im Mittelmeer

3.1 Das ANTARES-Neutriniteleskop

ANTARES ist ein Neutriniteleskop im Mittelmeer, das etwa 40 km südöstlich von Toulon (Frankreich) in ca. 2400m Tiefe installiert ist. Neben der optischen Neutrinodektion dient es außerdem der Erprobung der akustischen Detektionstechnik. Dazu sind 6 akustische Stockwerke installiert worden, in denen verschiedene Arten von Schallsensoren erprobt werden. Die akustischen Stockwerke dienen u.a. dazu, die Detektionsmethode zu testen und den Untergrund langfristig zu bestimmen.[J A+10]

Der Grundaufbau des ANTARES-Detektors (mit den für diese Arbeit relevanten akustischen Stockwerken) ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Dort sind die 12 Lines (plus eine Instrumentation Line IL) zu sehen, die auf dem Meeresboden verankert sind (an diesen Ankern befinden sich auch die akustischen Transmitter, die der Positionierung dienen) und durch Bojen straff gehalten werden. Die Lines selbst sind flexible Kabel, die in bestimmten Abständen mit sogenannten Stockwerken ausgestattet sind (in der Zeichnung durch Punkte dargestellt). Die meisten Stockwerke dienen der optischen Neutrinodektion, die rot eingezeichneten Stockwerke jedoch der Erprobung der akustischen Detektion von Neutrinos. Dabei sind (wie in der Zeichnung zu sehen ist) 3 verschiedene Stockwerkstypen im Einsatz.

Die Hydrophone der Akustik dienen u.a. auch anderen wissenschaftlichen Disziplinen wie der Meeresbiologie als Datenquelle. In diesem Rahmen ist auch ein Livestream der Daten unter <http://www.listentothedeep.org> abrufbar.

3.2 Das KM3NeT-Neutriniteleskop

KM3NeT ist der ANTARES-Nachfolger. Er wird voraussichtlich aus 3 Untereinheiten an verschiedenen Standorten aufgebaut: KM3NeT-Fr bei Toulon (Frankreich), KM3NeT-It bei Porto Palo di Capo Passero, Sizilien (Italien) und KM3NeT-Gr bei Pylos, Peloponnes (Griechenland)[KM314c]. Eine mögliche Realisierung einer solchen Untereinheit ist künstlerisch in Abbildung 3.2 dargestellt.

KM3NeT wird zehntausende Detektionsmodule (DOMs, Digital Optical Modules, siehe Abschnitt 3.3) enthalten, die zu Detektionseinheiten (vertikale Kabel mit einer Höhe von etwa einem Kilometer) verbunden sind. Diese werden in einer Tiefe von 2500 bis 5000 m verankert. Dies wird in einer Weise geschehen, dass mehrere Kubikkilometer Volumen instrumentiert sind. Über Glasfaser werden die gewonnenen Daten an die Küste geleitet.[KM314b]

Die Detektionseinheiten (DUs) werden sich voraussichtlich auf die drei Standorte so aufteilen, dass je Standort 115 DUs installiert werden. Diese werden jeweils 18 DOMs umfassen und durchschnittlich 90 m voneinander entfernt sein. Das unterste DOM wird sich 100 m über der Meeresoberfläche befinden, ab diesem beträgt der vertikale Abstand zum nächsten DOM jeweils 36 m. Die DOMs werden mechanisch an zwei Drahtseilen befestigt, ein elektro-optisches Kabel dient zur Datenübertragung und Stromversorgung.[KM314a]

Der erste Prototyp eines solchen Detektionsmoduls wurde am 16. April 2013 als Teil der ANTARES-Instrumentation-Line in etwa 2400 m Tiefe ausgebracht[KM314d]. Die akustischen Daten dieses Prototyps werde ich in dieser Arbeit näher untersuchen und verschiedene Techni-

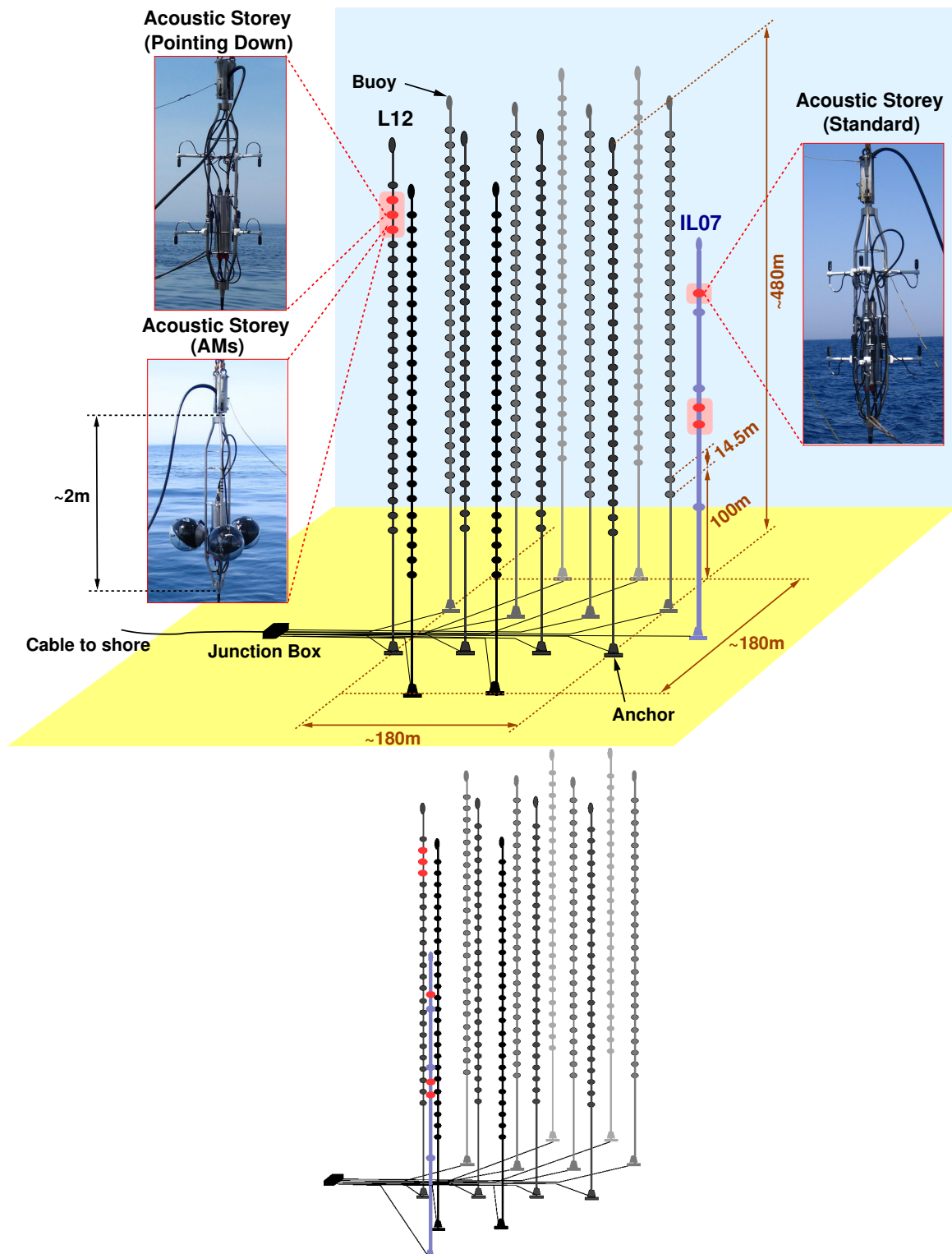


Abbildung 3.1: Skizze des ANTARES-Aufbaus[ANT11] – unten: Neue Position der Instrumentation Line (blau)

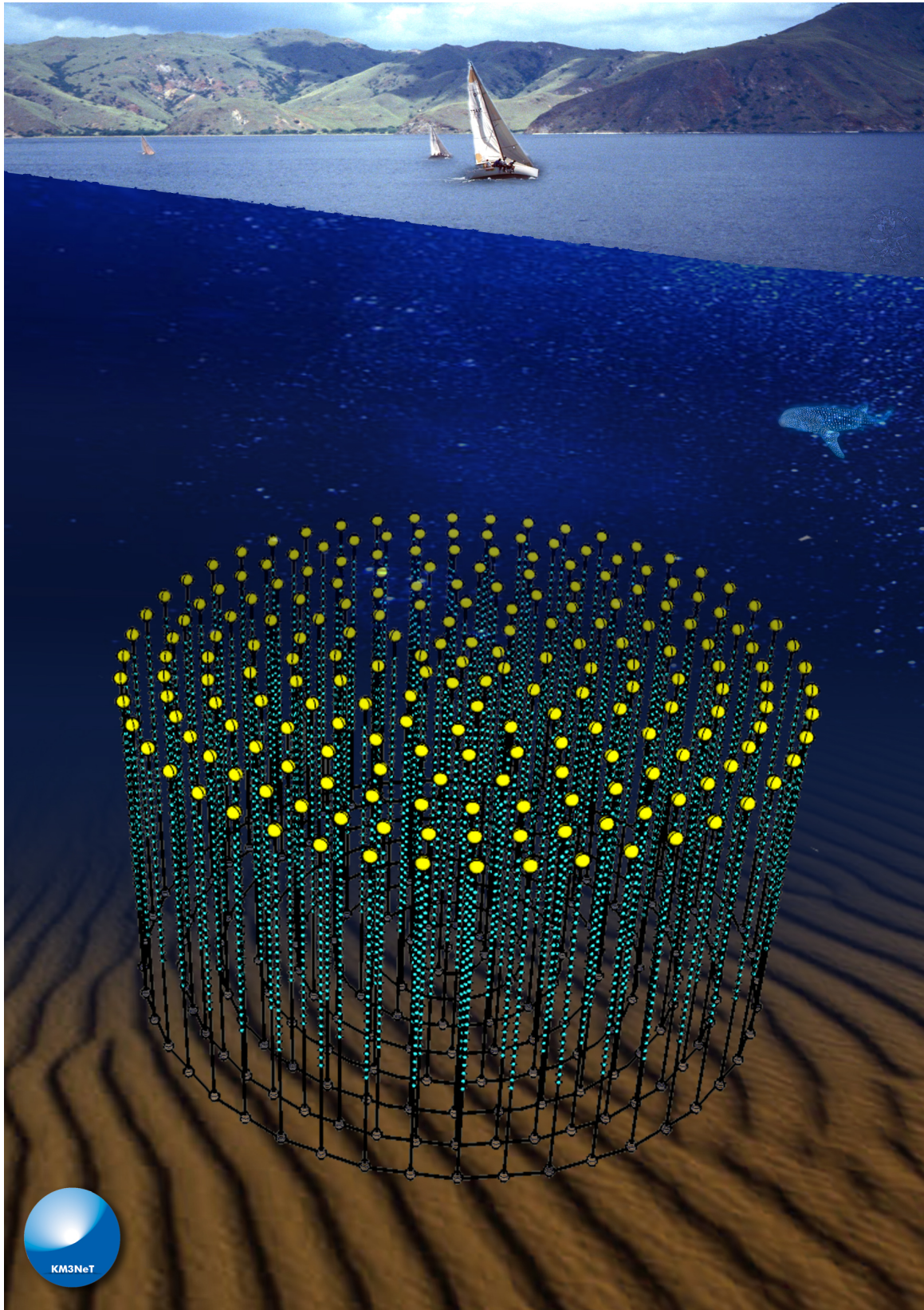


Abbildung 3.2: Künstlerische Ansicht einer möglichen Realisierung einer KM3NeT-Einheit[Col14a]



Abbildung 3.3: Das PPM-DOM von unten[Col14a]

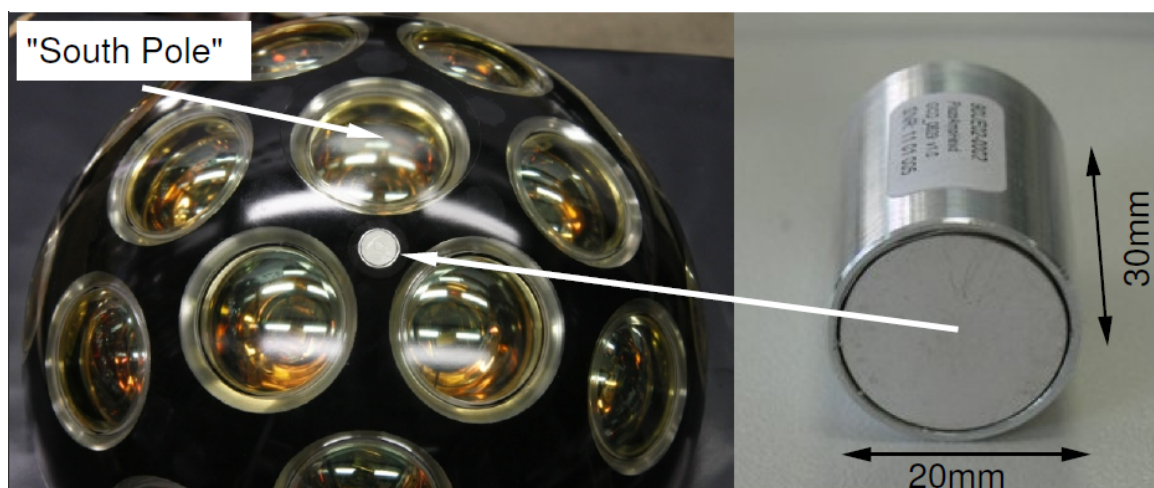


Abbildung 3.4: Der Piezosensor des PPM-DOM[Col14a]

ken zur Positionsrekonstruktion darauf anwenden.

3.3 Das optische KM3NeT-Modul in ANTARES

Das PPM-DOM (**P**reproduction **M**odel - **D**igital **O**ptical **M**odule) ist – wie der Name sagt – ein Vorserienmodell der Detektionseinheit von KM3NeT (des DOM). Dieses besteht aus 31 3-Zoll-Photomultipliern (PMTs), die sich in einer druckdichten 17-Zoll-Glaskugel befinden. 19 dieser 31 PMTs befinden sich in der unteren Halbkugel, die restlichen 12 in der oberen. Weiterhin

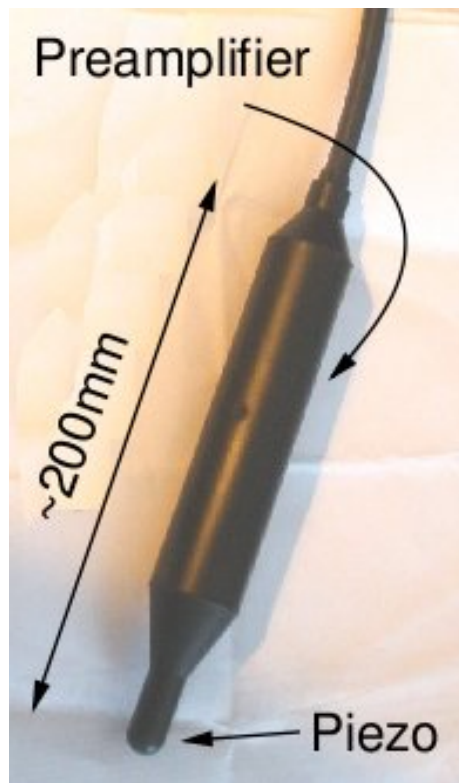


Abbildung 3.5: *Das Hydrophon des PPM-DOM[Col14a]*



Abbildung 3.6: *Position von Hydrophon und DOM an der IL[Adr+14]*

werden um die PMT-Oberflächen reflektierende Ringe angebracht, so dass sich die Photonen-detektionseffizienz erhöht. Jedes PMT wird individuell ausgelesen und bei Überschreiten eines bestimmten Schwellenwertes wird die Dauer dieser Überschreitung als Time-over-Threshold-Wert an die Küste übermittelt.[KM314a]

Neben den PMTs enthält das PPM-DOM noch weitere Instrumente wie einen Piezosensor zur akustischen Kalibration, eine Kalibrations-LED, einen Kompass und einen Neigungsmesser[Kal13]. Außerhalb des DOM ist außerdem ein Hydrophon angebracht (siehe Abbildung 3.6). Der Piezosensor und das Hydrophon dienen Tests der Positionierung des DOMs mittels Laufzeitmessung akustischer Signale.

Ebenso wie ANTARES funktioniert das DOM nach dem „all data to shore“-Prinzip. Dabei werden alle Daten des DOM komplett an die Küste gesendet und erst dort entschieden, ob sie dauerhaft für die spätere Auswertung gespeichert werden. Dies ermöglicht eine flexible Anpassung an geänderte Anforderungen und vereinfacht Änderungen. Auch kann somit ein ständiger Ringspeicher an der Küste eingerichtet werden, so dass man z.B. anhand bestimmter Merkmale, die erst nach einiger Zeit zusammengekommen sind, entscheiden kann, ob die vollständigen Daten der letzten Sekunden dauerhaft gespeichert oder verworfen werden oder nur ein Teil der Daten gespeichert wird.

Zur Integration in die bestehende Infrastruktur wurde die Datennahme an die ANTARES-Datennahme angepasst, entspricht also noch nicht komplett der später in KM3NeT verwendeten Fassung.

In Abbildung 3.3 ist das PPM-DOM mit dem Piezosensor (Abbildung 3.4) zu sehen. Das Hydrophon (Abbildung 3.5) ist extern über eine Mechanikkonstruktion am DOM fixiert, wie in Abbildung 3.6 zu erkennen ist. In dieser Arbeit werde ich mich mit der Positionierung des DOMs sowohl über das Hydrophon als auch (hauptsächlich) über den Piezosensor befassen und genauer auf die spezifischen Probleme, Eigenschaften und Ergebnisse eingehen.

4 Positionierung

4.1 Motivation

Wie bereits in Abschnitt 3.2 dargestellt, werden die einzelnen Stockwerke der DUs in KM3NeT flexibel (und somit nicht starr) verbunden sein. Da sich der Detektor im Meer befindet, in dem auch Strömungen auftreten können, ändern sich die exakten Positionen der DOMs laufend. Sie müssen somit regelmäßig bestimmt werden, um exakte Aussagen über die detektierten Cherenkovkegel mit der erforderlichen Genauigkeit treffen zu können und somit eine Detektion der Neutrinospuren zu ermöglichen. Nach COLLABORATION [Col11, S. 87] ist dadurch eine Genauigkeit der Positionskalibrierung von < 10 cm für das DOM erforderlich.

4.2 Pingerzyklus

Zur akustischen Positionierung in ANTARES dienen die sogenannten Pinger. Diese sind akustische Emittter, die am Fuß der Lines (an den Ankern) angebracht sind und alle 2 Minuten in einer bestimmten Reihenfolge Signale senden. Dabei handelt es sich um Sinuszüge, die als

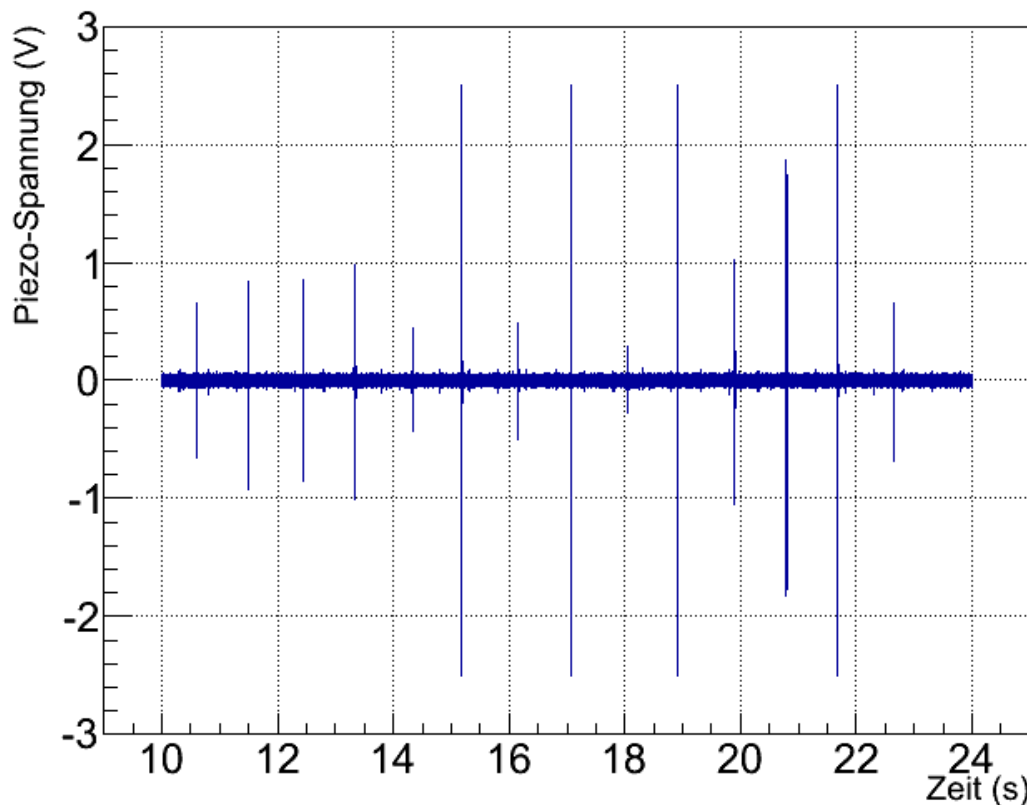


Abbildung 4.1: 1. Pingerzyklus von Run 691 des PPM-DOM

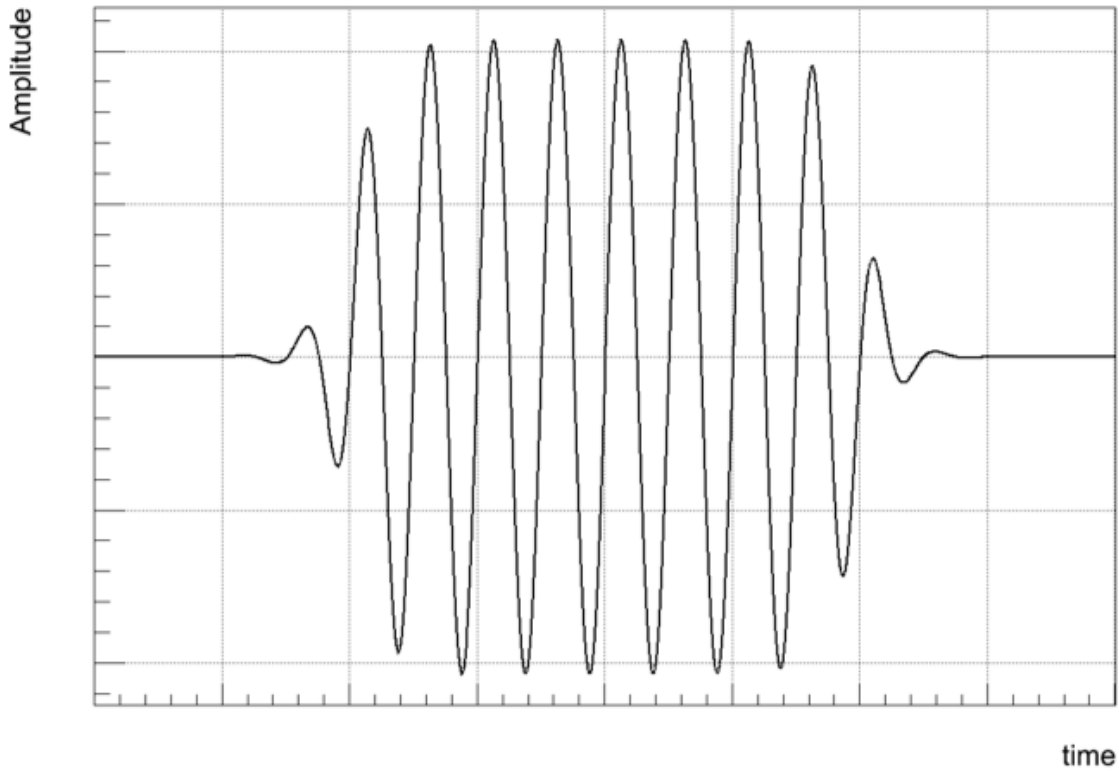


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung der Signalform eines ANTARES-Pingers [Kar13, S. 53]

Funktion der Zeit durch

$$\begin{aligned}
 U_{\text{pinger}}^{\text{in}}(t) = & U_0 \cdot \frac{\sin(2\pi \cdot f \cdot t)}{\left(\exp\left(-f \cdot \frac{t-p_1}{0.3}\right) + 1\right) \cdot \left(\exp\left(f \cdot \frac{t-p_2}{0.3}\right) + 1\right)} \\
 & + 0.1U_0 \cdot \frac{\sin(2\pi \cdot f \cdot t + 0.4\pi)}{\left(\exp\left(-\frac{f \cdot (t-p_1)+0.2}{0.3}\right) + 1\right) \cdot \left(\exp\left(\frac{f \cdot (t-p_2)+0.2}{0.3}\right) + 1\right)}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

beschrieben werden können (siehe z.B. KARL [Kar13, S. 53]). Dabei ist U_0 der Normierungsparameter, f die Frequenz und $p_1 = 0.1$ ms sowie $p_2 = 2.1$ ms die Positionen der 1. und der 2. Fermikante. Graphisch ist die Grundform eines Pingersignals anschaulich in Abbildung 4.2 dargestellt. In einem Pingerzyklus (Abbildung 4.1) werden zuerst die Pinger der Lines 1 bis 12 und der Instrumentation Line ausgelöst, anschließend nochmals der Pinger der Line 2 auf einer anderen Frequenz.

Leider ereignete sich am 28.2.2014 ein Stromausfall im ANTARES-Kontrollraum am Institut de biologie marine Michel-Pacha im französischen La Seyne-sur-Mer (IMP). Seit diesem Zeitpunkt reagiert der Pinger der Line 1 nicht mehr auf Taktsignale und ist im Schlafmodus, weswegen von dort keine Pingersignale mehr gesendet werden und der Zyklus somit nur noch aus 13 Signalen besteht. [Enz14]

Die derzeit gültigen Frequenzen f der Pinger (inkl. des derzeit nicht sendenden Pingers der Line 1) sind in Tabelle 4.1 dargestellt. Die Positionen der Pinger im UTM-Referenzsystem mit dem geodätischen Referenzsystem WGS84 sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst.

Das PPM-DOM befindet sich auf der Instrumentation Line etwa 100 m über dem Meeresboden (und damit auch über den Pingern).

Line	Auslösung	f [Hz]
1	1	50000
2	1	60235
3	1	46545
4	1	60235
5	1	47000
6	1	60235
7	1	53895
8	1	47000
9	1	53895
10	1	60235
11	1	47000
12	1	60235
IL	1	47000
2	2	56889

Tabelle 4.1: Frequenzen der Pinger in der Reihenfolge der Auslösung

Line	x [m]	y [m]	z [m]
1	8222.17	2480.66	-2474.38
2	8295.23	2443.18	-2474.45
3	8208.00	2423.14	-2474.49
4	8264.02	2395.12	-2474.48
5	8159.28	2463.82	-2474.45
6	8311.07	2361.52	-2474.39
7	8181.86	2368.64	-2474.61
8	8230.10	2346.72	-2474.52
9	8124.69	2392.47	-2474.62
10	8279.73	2306.16	-2474.15
11	8141.01	2326.54	-2474.26
12	8204.42	2290.08	-2474.12
IL	8351.99	2310.16	-2473.75

Tabelle 4.2: Positionen der Pinger im UTM-Koordinatensystem mit WGS84

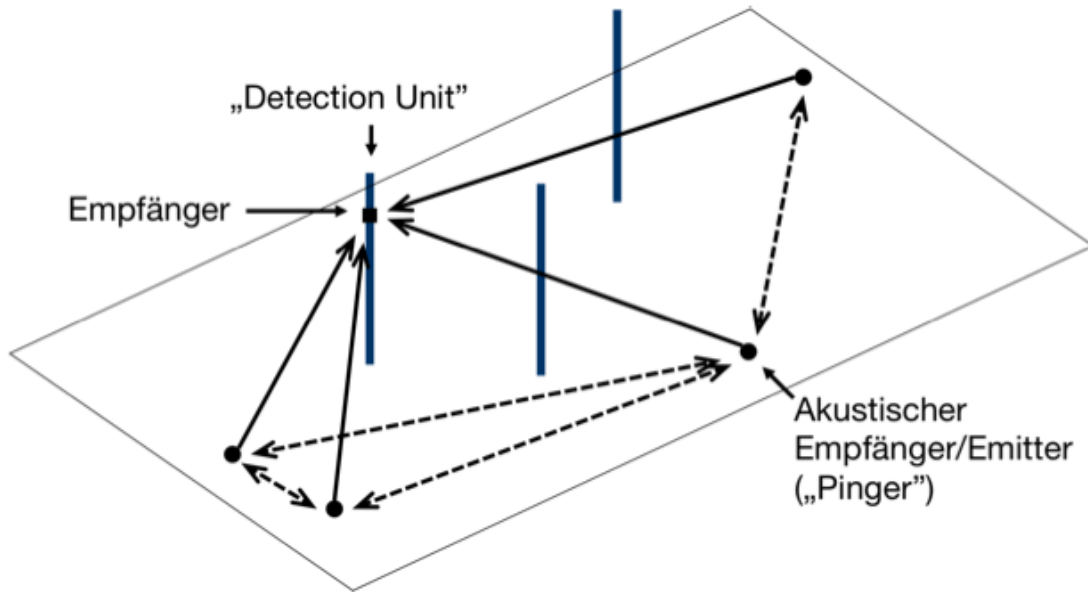


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung der Triangulation [Kar13, S. 5]

4.3 Triangulation

Die Positionsbestimmung des PPM-DOM erfolgt mittels Triangulation. Das Prinzip selbiger ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Von bestimmten Quellen aus (in unserem Fall den Pingern an den Ankern der ANTARES-Lines) werden zu bestimmten Zeitpunkten akustische Signale gesendet. Aus der Ankunftszeit am Empfänger, der Sendezeit der Signale und der Schallgeschwindigkeit im Wasser kann nun die aktuelle Position des DOMs berechnet werden.

Konkret erfolgt die Bestimmung der Koordinaten x , y und z mittels Minimierung der χ^2 -Funktion

$$\chi^2 = \sum_{i=0}^{13} \left(\frac{(t_{r,i} - t_{s,i} - t_{\text{sync}} - t_{\text{off}}) - \frac{\sqrt{(dx_i)^2 + (dy_i)^2 + (dz_i)^2}}{c}}{\sigma} \right)^2 \quad (4.2)$$

mit dem Minuit¹-Paket des CERN. Hierbei bezeichnet i die Pingernummer (0-11 entsprechen den Pingern der Lines 1-12, 12 entspricht dem Pinger der Instrumentation Line und 13 der zweiten Aussendung des Pingers der Line 2). $t_{s,i}$ ist der Zeitpunkt, zu dem das Pingersignal des Pingers i gesendet wurde, und $t_{r,i}$ der entsprechende Empfangszeitpunkt am Piezosensor oder Hydrophon. t_{off} ist ein festgelegter Offset, den die Pinger u.a. zur internen Signalverarbeitung brauchen (derzeit $24 \mu\text{s}$) und t_{sync} ein zusätzlicher Zeitoffset, der vor allem durch Synchronisationsprobleme (auf die ich u.a. in den Abschnitten 5.3 und 7 eingehen werde) entsteht und auch eine zu fittende Variable ist. dx_i , dy_i und dz_i sind die Abstände zwischen Piezosensor/Hydrophon und dem Pinger i (wobei im Endeffekt x , y und z des Empfängers gefittet werden, die Differenz ergibt sich dann mit den bekannten Pingerpositionen aus Tabelle 4.2). Die Schallgeschwindigkeit c wurde am Ort von ANTARES in einer Messung der ANTARES-Gruppe mit durchschnittlich $1544 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ angenommen und das σ mit $\frac{5\text{cm}}{c}$.

Anschaulich werden bei der Minimierung mittels Formel 4.2 die Werte für x , y und z sowie der Zeitoffset so lange strategisch geändert, bis diese möglichst gut zum ermittelten Empfangszeitpunkt passen. Dies ist dann der Fall, wenn das χ^2 (welches ja im Prinzip die Differenz zwischen der Laufzeit, die wir für unsere gefitteten Werte erwarten, und unserer tatsächlich gemessenen Laufzeit ist) möglichst gering wird.

¹<http://lcgapp.cern.ch/project/cls/work-packages/mathlibs/minuit/index.html>

Die Sendezeiten $t_{s,i}$ werden aus der ANTARES-Datenbank ausgelesen. In dieser sind die Pingersendezeiten in Sekunden und Nanosekunden gespeichert, wobei die Sekunden im Unix-Timestamp-Format (Sekunden seit dem 1. Januar 1970, 0:00:00 Uhr UTC) angegeben sind. Da wir die Angaben jedoch in Zeit relativ zum Runstart benötigen (andere Angaben sind im Run selbst nicht vorhanden), müssen diese noch umgerechnet werden. Zum Umrechnungsverfahren komme ich im Abschnitt 5.2.

Für die Ermittlung der Empfangszeiten $t_{r,i}$ gibt es verschiedene Methoden, denen ich mich in Abschnitt 6 widme.

Der zu fittende Offset t_{sync} wird benötigt, da der Runstart anscheinend nicht immer mit dem offiziell verzeichneten Runstart übereinstimmt. Darauf werde ich in Abschnitt 5.3 eingehen.

Je nach Situation kann es vorkommen, dass nicht alle 14 Signale am Empfänger registriert bzw. erkannt werden können. Dann läuft die Minimierung mit entsprechend weniger Pingern (wobei mindestens 4 Stück erforderlich sind, da mit x , y , z und dem Offset 4 Freiheitsgrade vorliegen). Auf diese Situationen gehe ich in Abschnitt 8.3 ein.

5 Analyse der akustischen PPM-DOM-Daten

Das akustische Signal des PPM-DOM in ANTARES hat einige Besonderheiten, die einen speziellen Umgang damit erfordern. Dazu wird jedoch zunächst dargelegt, wie dieses Signal grundsätzlich aufgebaut ist.

5.1 Datenstruktur

Das PPM-DOM wurde für den Probetrieb auf der Instrumentation Line von ANTARES in die Datennahme von ANTARES eingepasst. Daher ist das Datenformat recht ähnlich: Das DOM hat einen 125-MHz-Taktgeber, um die aufgezeichneten Daten mit einem Zeitstempel versehen zu können. Die Daten werden in Items (bestehend aus ADC-Werten und einem Zeitstempel) gefüllt, die dann in Frames verpackt und an die Küste geschickt werden. Ein Frame mit den gesammelten Items wird alle 2^{24} Takte an die Küste geschickt, somit existiert ein 24-Bit-Feld für den Zeitstempel. Mit dem 125-MHz-Takt ergibt sich dadurch eine Taktlänge von 8 ns und eine Framelänge von etwa 124.2178 ms.[Col14b]

Die akustischen Signale werden etwa alle 640 Taktzyklen analysiert (dieser Wert kann in Einzelfällen um wenige Zyklen variieren). Dabei werden die aktuellen ADC-Werte für Piezosensor und Hydrophon gespeichert. Der dafür verwendete Stereo-ADC-Typ hat einen Dynamikumfang von 5 Volt und sein Nullpunkt liegt in der Mitte des Wertebereichs, so dass Werte von -2.5 V bis +2.5 V ausgelesen werden können. Dies geschieht mit einer Auflösung von 24 Bit. Jedes Item hat einen Zeitstempel sowie (im Falle der Akustik) mehrere Abtastwerte von Hydrophon und Piezosensor.

Diese Daten werden dann (zusammen mit den optischen Daten und den Daten der anderen Instrumente) an die Küste geschickt.

5.2 Zeitumrechnung

Wie bereits in Abschnitt 4.3 erwähnt, kommen die benötigten Zeitangaben aus unterschiedlichen Quellen und müssen umgerechnet werden.

Der Runstart selbst wird aus dem elektronischen Logbuch ELOG[Col] von KM3NeT abgelesen. Dort ist (in UTC) verzeichnet, zu welcher GPS-Sekunde der Run startet. Mehr dazu in Abschnitt 5.3.

Die Sendezeitpunkte $t_{s,i}$ der Pinger werden aus der ANTARES-Datenbank ausgelesen. Dort liegen sie in Sekunden (in Unix-Zeit) und Nanosekunden (ab der jeweiligen vollen Sekunde) vor. Die Runstartzeit muss nun zunächst in Unix-Zeit konvertiert werden.

In den Runs liegen die Zeitangaben jedoch nur in Frames und Zyklen (siehe Abschnitt 5.1) vor. Diese müssen in Sekunden und Nanosekunden (ab Runstart) umgerechnet werden. Dabei müssen eventuelle Datennahmelücken (siehe Abschnitt 5.4) berücksichtigt werden. Die Sendezeitangaben der Pinger-Signale aus der ANTARES-Datenbank müssen ebenfalls (mit Hilfe der Angaben aus dem KM3NeT-ELOG[Col]) so umgewandelt werden, dass sie relativ zum Runstart vorliegen.

Im Endeffekt erhält man so die Umrechnung

$$t_{\text{send,rel}} = t_{\text{send,abs}} - t_{\text{start,abs}} \quad (5.1)$$

für die Pingersendezeitpunkte, wobei $t_{\text{send,rel}}$ der Sendezeitpunkt relativ zum Runstart ist, $t_{\text{send,abs}}$ der absolute Sendezeitpunkt (in Unixzeit plus Nanosekunden, aus der ANTARES-Datenbank) und $t_{\text{start,abs}}$ der absolute Startzeitpunkt des Runs (in Unixzeit, aus dem KM3NeT-ELOG).

Die akustischen Daten des Runs werden bereits bei der Konvertierung in das Arbeitsformat in relative Zeitangaben (in Sekunden) zum Runstart konvertiert. Dies geschieht gemäß

$$t = [(f - f_0) \cdot (2^{24} - 1) + u] \cdot 8 \text{ ns} \quad (5.2)$$

mit der Relativzeit (in Sekunden) zum Runstart t , der Framenummer f , der Framenummer beim Start des Runs f_0 und der Taktzyklenanzahl (die in jedem Frame neu bei 0 beginnt) u .

5.3 Runstart

Zur exakten Zeitbestimmung im ANTARES-Detektor wird ein GPS-Empfänger am ANTARES-Kontrollzentrum in La Seyne sur Mer verwendet. Dieser stellt (neben der exakten Uhrzeit) u.a. ein Pulse-per-Second-Signal (PPS) bereit, das zur vollen Sekunde steilflankig ansteigt und somit zur äußerst exakten Bestimmung des Zeitpunktes der vollen Sekunde geeignet ist. Der Runstart sollte genau zum PPS-Signal erfolgen, in der Praxis gibt es jedoch noch geringe Abweichungen, deren Ursache untersucht wird.

5.4 Datennahmelücken

Als Effekt des Einbaus des PPM-DOM in die ANTARES-Infrastruktur treten zeitweise Lücken in der akustischen Datenübertragung an die Küste auf. Einige solche sind in Abbildung 5.1 dargestellt. Verursacht werden die Lücken durch die begrenzte Bandbreite der Datenübertragung vom ANTARES-Detektor zur Küste. Bei hoher optischer Aktivität (optisch wird die Time over Threshold an die Küste gesendet, so dass bei wenig Aktivität auch wenige Daten anfallen) steht nicht mehr genug Bandbreite für die akustischen Frames zur Verfügung, so dass diese verworfen werden. Sichtbare Lücken in den Daten sind die Folge. Dies führte zunächst zu einigen Problemen bei der Zeitumrechnung der Daten (siehe Abschnitt 5.2).

In probeweise aufgenommenen Runs, bei denen die optische Datennahme deaktiviert war (und somit viel weniger Daten an die Küste übertragen werden mussten), traten keinerlei akustische Datenlücken auf. Da in KM3NeT ausreichend Bandbreite zur Verfügung stehen wird, ist davon auszugehen, dass die Lücken auch dort nicht auftreten.

5.5 Acoustic ROOT Format

Zur schnellen Verarbeitung der Daten wurde das „Acoustic ROOT Format“ (ARF) als Datenformat entwickelt. Dieses setzt das Datenanalyseframework ROOT¹ des CERN voraus, das auch für die weiteren Analysen genutzt wurde. Die Daten werden dabei in einen ROOT-Baum innerhalb eines ROOT-Files gefüllt. Der Baum hat 3 Zweige:

- **time:** Die Zeit seit Runstart in Sekunden.

¹<http://root.cern.ch>

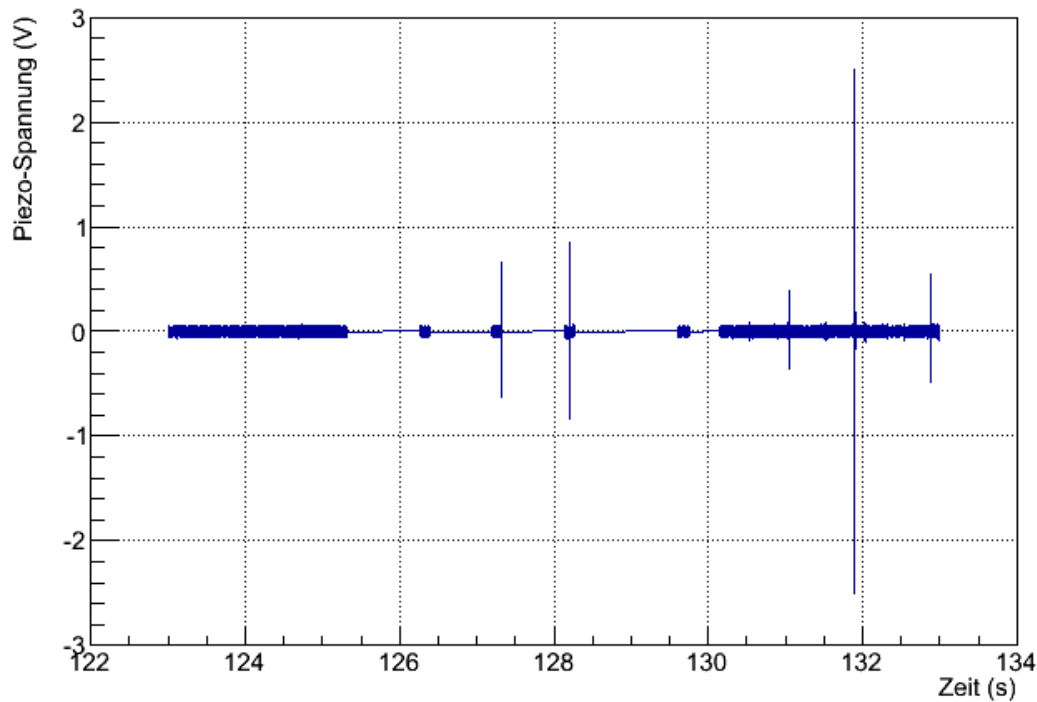


Abbildung 5.1: Datennahmelücken Run 691 Zyklus 2 (Piezo)

- **piezo:** Die Piezosensorspannung zu diesem Zeitpunkt in V.
- **hydro:** Die Hydrophonspannung zu diesem Zeitpunkt in V.

Die Zeit berechnet sich dabei wie in Gleichung 5.2 dargestellt. Die Spannungen für Hydrophon und Piezosensor gewinnt man aus den jeweiligen ADC-Werten nach

$$U = A \cdot 2^{-24} \cdot 5 \text{ V} \quad (5.3)$$

mit dem ADC-Wert A in ADC-Counts.

5.6 Von den Rohdaten zum ARF

Die Rohdaten des PPM-DOM werden durch die Run Control (Abbildung 5.2) in einem dedizierten binären Rohdatenformat (rdat) gespeichert. Dort sind sowohl die akustischen als auch die optischen Daten enthalten. Anschließend werden die akustischen Daten mit einem dedizierten Tool von Bertrand Vallage (CEA² Saclay) in Textdateien umgewandelt, die für jeden Messpunkt Framenummer, Taktzyklus und die ADC-Werte von Piezosensor und Hydrophon enthalten.

Erste Tests haben gezeigt, dass die Verarbeitungsgeschwindigkeit bei der Arbeit mit diesen (oft mehrere Gigabyte großen) Textdateien nicht zufriedenstellend ist. Auch werden durch die Speicherung als Textdatei die vorhandenen Speicherkapazitäten sehr ineffizient genutzt.

Daher werden diese Textdateien anschließend in das (in Abschnitt 5.5 beschriebene) Acoustic ROOT Format konvertiert. Dazu werden die Zeit- und ADC-Werte entsprechend konvertiert, so dass in der ARF-Datei die Werte in SI-Einheiten (Sekunden bzw. Volt) stehen. Datennahmelücken sind nach der Umwandlung nach wie vor vorhanden und müssen bei bestimmten Operationen daher während der Bearbeitung berücksichtigt werden. Diese Vorgehensweise wurde aus Gründen der optimalen Speicherplatznutzung gewählt.

²<http://www.cea.fr>

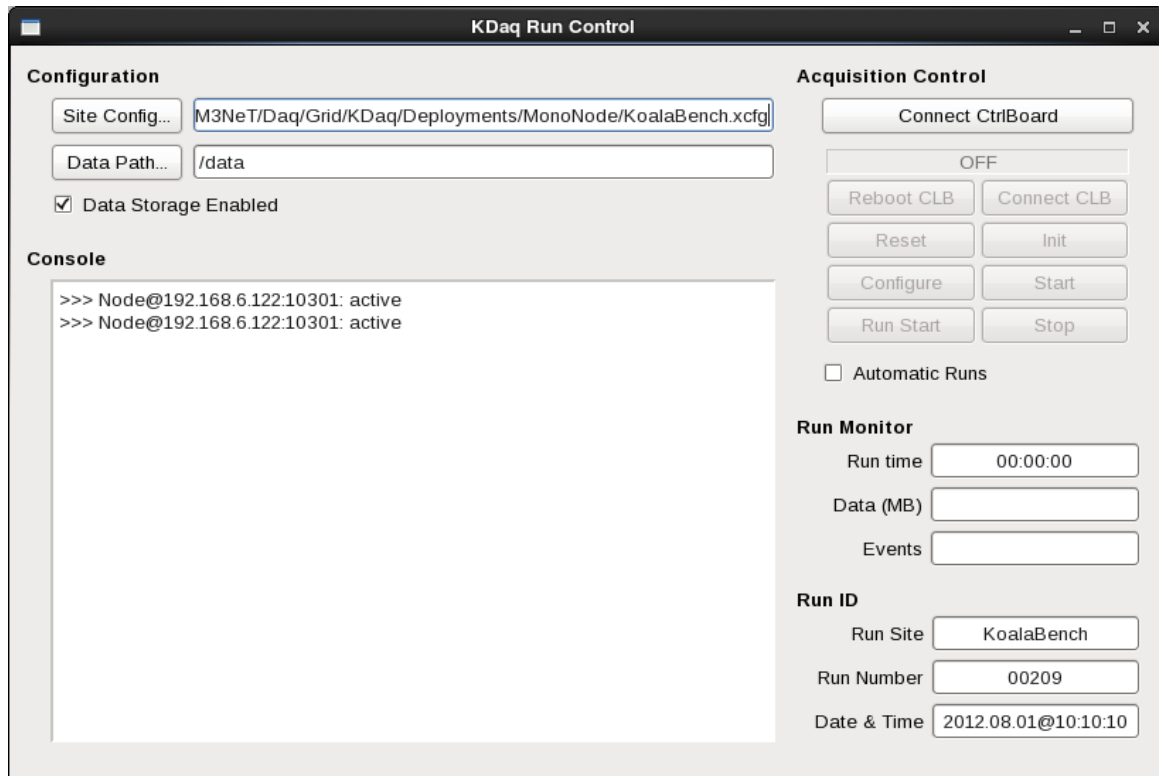


Abbildung 5.2: Die Run Control des PPM-DOM[Col14b]

Da die ARF-Datei binär ist und von ROOT automatisch komprimiert wird, wird der Speicher wesentlich effizienter genutzt als durch die Textdateien (welche nach der Umwandlung gelöscht werden). Auch die Verarbeitungsgeschwindigkeit ist deutlich höher.

5.7 Clipping

Je nach Ausrichtung des DOMs (und damit des Piezosensors) ist es möglich, dass einige der Pinger in das Clipping des Piezosensors geraten. In Abbildung 5.3 ist beispielhaft der Pinger auf Line 6 im 1. Zyklus von Run 691 dargestellt. Das Clipping ist hier sehr deutlich bei der Maximalspannung von ± 2.5 V zu erkennen. Auf die Auswirkungen der verschiedenen hohen Amplituden unter verschiedenen Winkeln zum DOM wird in Abschnitt 8.1 eingegangen.

5.8 Darstellungsartefakte

Mit den in Abschnitt 5.1 angegebenen Parametern ergibt sich – unter der Annahme von konstant 640 Taktzyklen pro Sample – gemäß

$$f_{\text{sampling}} = \frac{f_{\text{clock}}}{n} = \frac{125 \text{ MHz}}{640} = 195.3125 \text{ kHz} \quad (5.4)$$

mit der Taktfrequenz f_{clock} und der Taktzahl pro Sample n die Samplingrate f_{sampling} .

Gemäß dem Shannon-Nyquist-Theorem ist dies zwar für eine exakte Signalrekonstruktion gut genug (die höchste Pingerfrequenz beträgt 61 kHz, womit eine Samplingrate von 122 kHz ausreichen würde), um das Signal zu rekonstruieren. Da jedoch nicht immer das Amplitudenmaximum zu einem bestimmten Zeitpunkt, an dem gesampelt wird, erreicht wird, kommt es in der Darstellung (zum Beispiel in Abbildung 5.4) zu einem ungewollten Effekt: Bei der Darstellung werden die einzelnen Datenpunkte (rot) durch gerade Linien (grau) miteinander verbunden.

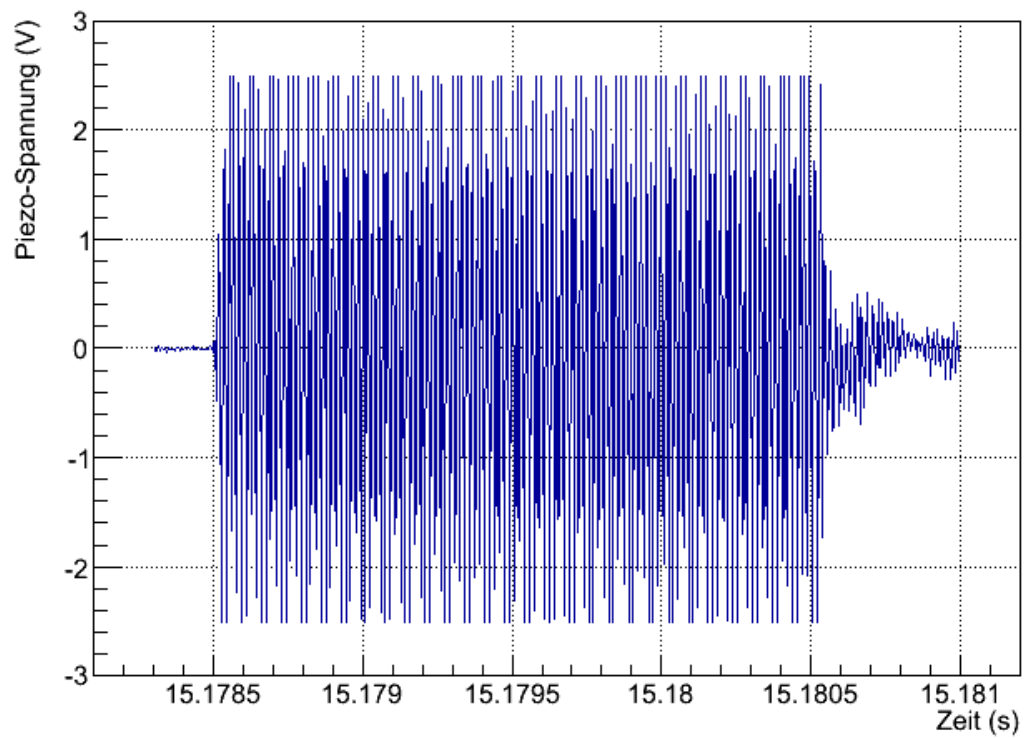


Abbildung 5.3: *Clipping Run 691 Zyklus 1 Line 6 (Piezo)*

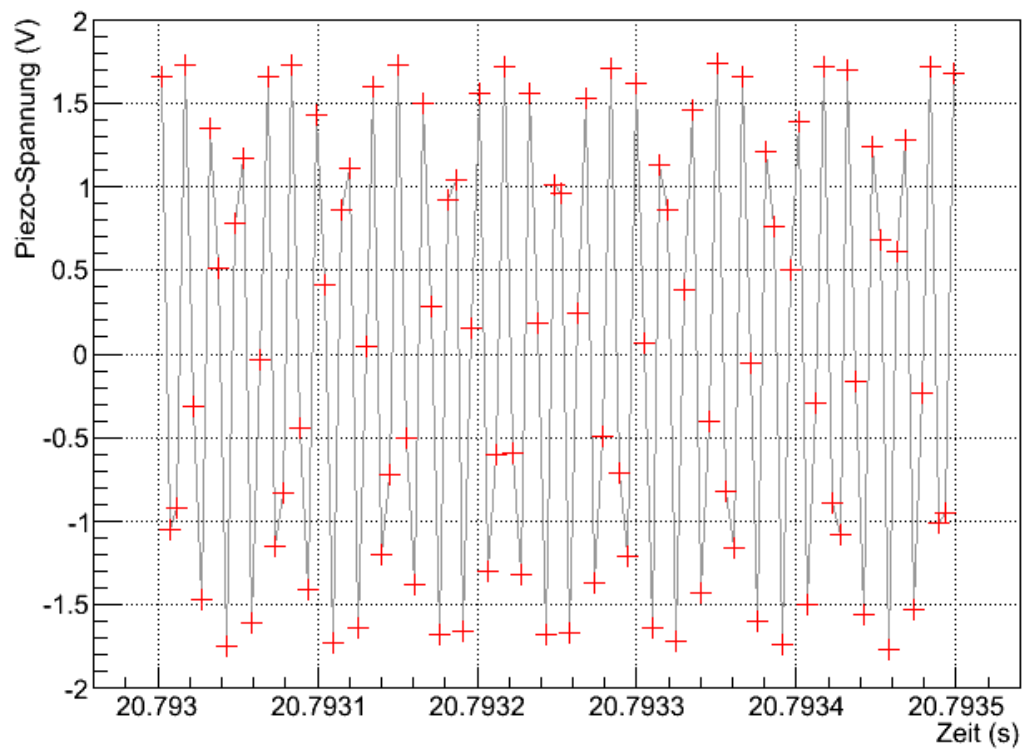


Abbildung 5.4: *Artefakte Run 691 Zyklus 1 Line 12 (rot: Datenpunkte, grau: interpolierte Verbindungslinien)*

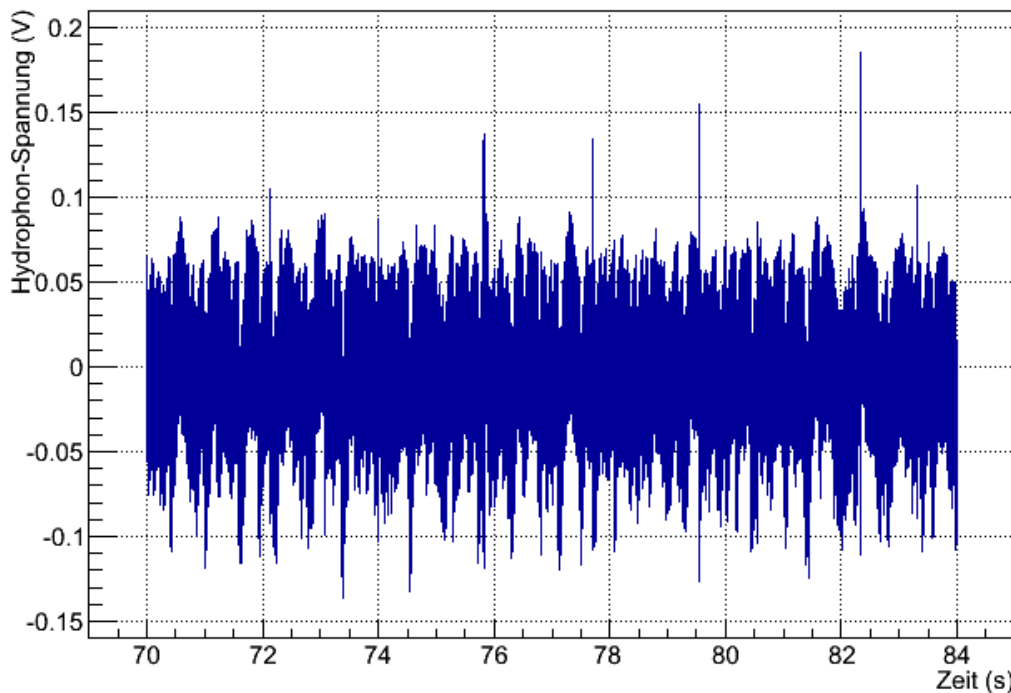


Abbildung 5.5: Ungefiltertes Hydrophonsignal Run 896 Zyklus 1

Befindet sich nun zufällig kein Datenpunkt auf voller Amplitudenhöhe, wird bei der Interpolation diese auch nicht erreicht. Für das Auge sieht dies teilweise wie ein Schwebungseffekt aus, auch wenn die Ursache natürlich eine völlig andere ist.

Auf die weitere Verarbeitung wirkt sich dieses Problem jedoch kaum aus: Es handelt sich hier nur um ein reines Darstellungsproblem für das Auge - der Rechner rechnet immer nur mit den roten Datenpunkten. Außerdem werden eventuelle Vergleichssignale – z.B. bei der Kreuzkorrelation – mit der gleichen Samplingrate hergestellt und haben somit gleichartige Artefakte. Der Effekt wird hier nur erwähnt, um im weiteren Verlauf der Arbeit einer möglichen Verwirrung des Lesers beim Betrachten der Signale vorzubeugen.

5.9 Störsignale der Hydrophone

Beim ersten Betrachten der Hydrophondaten fiel auf, dass die Signale der Pinger kaum bis gar nicht erkennbar waren (siehe Abbildung 5.5). Eine Arbeit mit den Daten in dieser Form war somit nicht ohne weiteres möglich.

Zur genaueren Analyse wurde eine Fouriertransformation mittels des FFTW³-Paketes (Fastest Fourier Transform in the West) erstellt. Diese ist eine C-Subroutine, die schnelle diskrete Fouriertransformationen bereitstellt und vom MIT entwickelt wurde. Wie in Abbildung 5.6 ersichtlich, befinden sich die größten Störfrequenzen außerhalb des Pingerbandes, das sich nach Tabelle 4.1 von 46545 bis 60235 Hz erstreckt.

Im Rest dieser Arbeit werden – wie der Titel bereits verrät – nur Signale des Piezosensors untersucht. Das Hydrophon wird nicht weiter analysiert und wurde von mir nur anfangs als Referenz, um Signalform u.ä. vergleichen zu können, verwendet.

³<http://www.fftw.org>

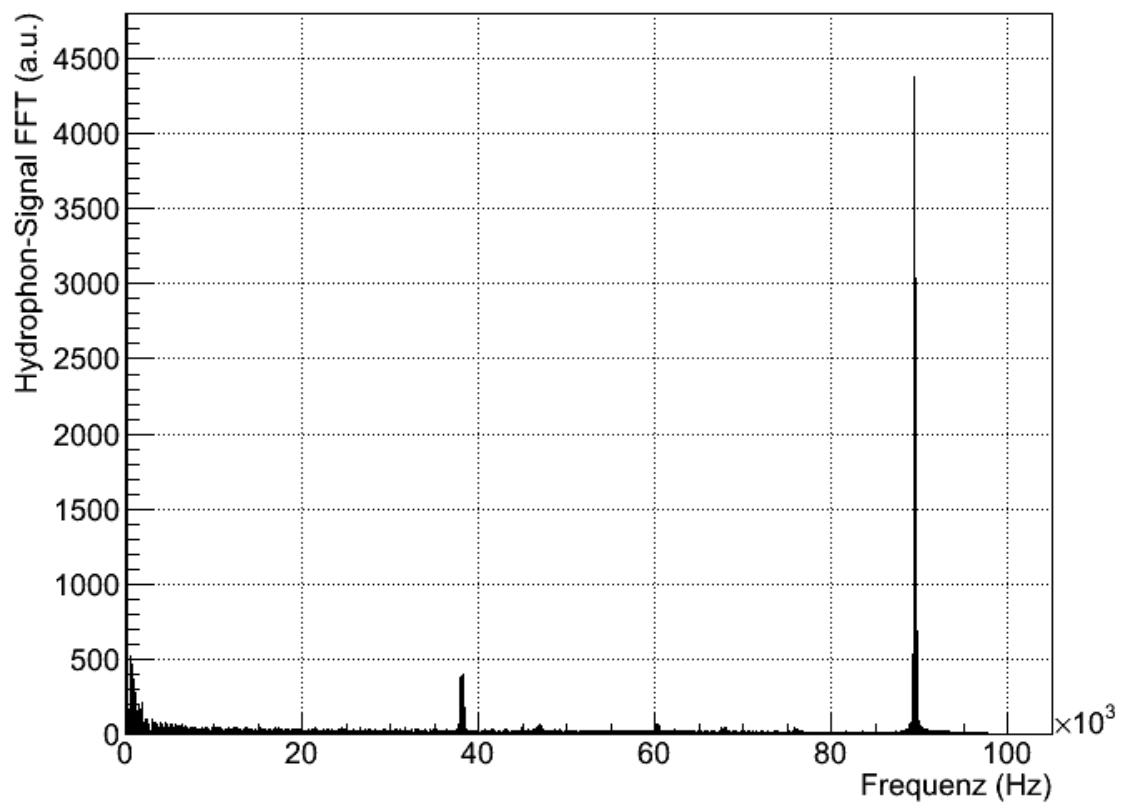


Abbildung 5.6: $|FFT|$ des Hydrophonsignals (Run 896 Zyklus 1)

6 Methoden der Ankunftszeitbestimmung

Zur exakten Positionierung der Detektorbestandteile ist eine möglichst exakte Ermittlung der Ankunftszeiten der Pingersignale unerlässlich. In diesem Abschnitt werden daher mehrere Methoden zur Ankunftszeitbestimmung vorgestellt und hinsichtlich ihrer Güte untersucht. Dies geschieht auf realen Messdaten des PPM-DOM. Das hier gezeigte Vorgehen ist sowohl für den Piezosensor als auch für das Hydrophon möglich.

Generell wird vor jeder Betrachtung ein Bandpass mit Rechteckfenster auf den Frequenzbereich 30-75 kHz angewendet, um Störsignale grob außerhalb des uns interessierenden Pingerbandes von Anfang an wegzufiltern. Dieser Bandpass wurde natürlich auch auf die Mustersignale der Kreuzkorrelation angewendet.

6.1 Fehlerbetrachtung

Nach JAMES und WINKLER [JW04, S. 6-7] und der für χ^2 -Fits üblichen Fehlerrechnung müssen die Fehler, die Minuit liefert, durch \sqrt{n} geteilt werden, wobei n die Anzahl der Freiheitsgrade beschreibt. Diese variiert je nach Anzahl der Pinger, die gut genug für eine Verwendung zur Ortung sind. Das DOM bewegt sich nicht völlig frei im Raum sondern ist an der Instrumentation Line befestigt, womit die 3 Raumkoordinaten nicht völlig unabhängig voneinander geändert werden können. Daher sind die drei Raumkoordinaten in der Realität korreliert, werden für den Fit jedoch als unabhängig angenommen. Bei der Betrachtung der angegebenen Fehler muss diese Information jedoch stets im Kopf behalten werden, so dass die Fehlerangaben nur als Richtwert zu sehen sind.

6.2 Schwellenwertmethode

Die Schwellenwertmethode ist die einfachste Form der Ankunftszeitbestimmung. Dabei wird ein Signal als empfangen registriert, sobald die gemessene Amplitude das erste mal einen bestimmten vorher festgelegten Schwellenwert überschreitet. Nachteilhaft dabei ist, dass diese Überschreitung nicht durch ein Pingersignal ausgelöst worden sein muss, sondern theoretisch auch durch andere laute Signale verursacht worden sein kann. In der Praxis spielen solche Störsignale – wie durch Tests mit verschiedenen Runs festgestellt wurde – jedoch eine zu vernachlässigende Rolle.

Wichtig bei der Schwellenwertmethode ist die Festlegung des Schwellenwertes. Ist dieser zu hoch gesetzt, so werden Pinger nicht gewertet, die empfangen worden sind. Somit wird die Positionierung (aufgrund weniger verfügbarer Pinger) ungenauer. Ist der Schwellenwert hingegen zu niedrig gesetzt, so werden Nebengeräusche wie Rauschen als Pingersignal gewertet. Dies kann die Ergebnisse so weit verfälschen, dass keine Positionierung möglich ist. Desweiteren gibt es eventuell (bei sehr hoher Schwelle) ein verspätetes Auslösen je nach eintreffender Amplitude des Pingersignals, so dass hier eine Zeitverzögerung entsteht. Man spricht dann vom „time walk effect“.

Insgesamt hat sich folgender Algorithmus zur Schwellenwertsuche als nützlich herausgestellt: Zunächst muss festgestellt werden, wie stark der Hintergrund ist. Dafür wird ein Zeitfenster

von 63 Sekunden vor dem Sendezeitpunkt des ersten Pingers bis 3 Sekunden vor dem Sendezeitpunkt des ersten Pingers festgelegt. Dieses Fenster beginnt jedoch frühestens zum Runstart, da zu einem früheren Zeitpunkt keine Daten vorhanden sind, und kann somit auch kürzer als 60 Sekunden sein. Da der Pingerzyklus nur alle 2 Minuten durchlaufen wird, ist in diesem Zeitfenster kein störendes Pingersignal enthalten und eine Hintergrundmessung möglich. Nun werden der Mittelwert und das quadratische Mittel (Root Mean Square RMS) der Daten in diesem Fenster bestimmt.

Anschließend wird der Schwellenwert festgelegt. Die Berechnung desselben mittels

$$S = M + 20R \quad (6.1)$$

hat sich als zweckmäßig herausgestellt. Dabei sind M und R der Mittelwert und das quadratische Mittel, die eben gemessen wurden.

Nun wird für alle 14 Signale eines Zyklus die Ankunftszeit bestimmt. Für jedes Signal wird dabei der Sendezeitpunkt eingelesen und um einen fixen Offset t_{off} (der u.a. durch die Datenverarbeitung und Hardware entsteht, siehe Abschnitt 4.3) verschoben. Nun wird ab dem Ankunftszeitpunkt die erste Überschreitung unseres Schwellenwertes gesucht und der Zeitpunkt gespeichert. Zusätzlich wird die erstmalige Überschreitung des doppelten Schwellenwertes gesucht und ebenfalls gespeichert.

Wenn diese beiden Überschreitungen mehr als 0.1ms Zeitdifferenz haben, wird davon ausgegangen, dass es sich hier nicht um ein Pingersignal (das entsprechend schnell ansteigen müsste) handelt. In diesem Fall wird der Zeitpunkt des Überschreitens des doppelten Schwellenwertes als neuer Startzeitpunkt genommen und der doppelte Schwellenwert als neuer Schwellenwert (nur für diesen einen Pinger). Dies hat sich als guter Kompromiss zwischen Genauigkeit und Geschwindigkeit herausgestellt.

Durch das Sampling wäre an sich noch ein zusätzlicher Fehler in der Größenordnung $\frac{t_{\text{sample}}}{\sqrt{12}}$ mit der Zeitdauer eines Samples t_{sample} zu berücksichtigen, dieser kann jedoch im Vergleich zu den sonstigen Ungenauigkeiten vernachlässigt werden. Dies trifft auch auf die Ungenauigkeiten durch den time walk effect zu.

6.3 Kreuzkorrelation

Bei der Kreuzkorrelation wird das Messsignal mit einem vorgegebenen Signal, das gefunden werden soll, verglichen. Anschaulich wird dabei nach LYNN und FUERST [LF94, S. 309-311] das zu findende Signal schrittweise über das Messsignal geschoben und mit diesem multipliziert. Der Maximalwert dieses Multiplikationsergebnisses tritt genau am Beginn des dem zu findenden Signals ähnlichsten Messsignalabschnitts auf. Somit erhält man daraus die Ankunftszeit des zu findenden Signals.

Mit zwei N Messpunkte langen Signalen (das kürzere Signal – i.d.R. das zu findende Signal – wird einfach mit Nullen aufgefüllt) ist die Kreuzkorrelation nach LYNN und FUERST [LF94, S. 309] abgesehen von Normierungsfaktoren nach

$$\phi(\tau) = \sum_{n=-N}^N f(t)g(t+\tau) \quad (6.2)$$

definiert. Diese Berechnung in der Zeitdomäne wird jedoch aus Effizienzgründen nicht weiter verfolgt und dient nur der Veranschaulichung.

Leicht erkennbar ist in Gleichung 6.2 eine Faltung, wobei das Integral wegen der diskreten Natur der Messwerte durch eine Summe ersetzt wurde. Einer Faltung in der Zeitdomäne entspricht in der Frequenzdomäne eine einfache Multiplikation, die deutlich weniger rechenaufwändig ist

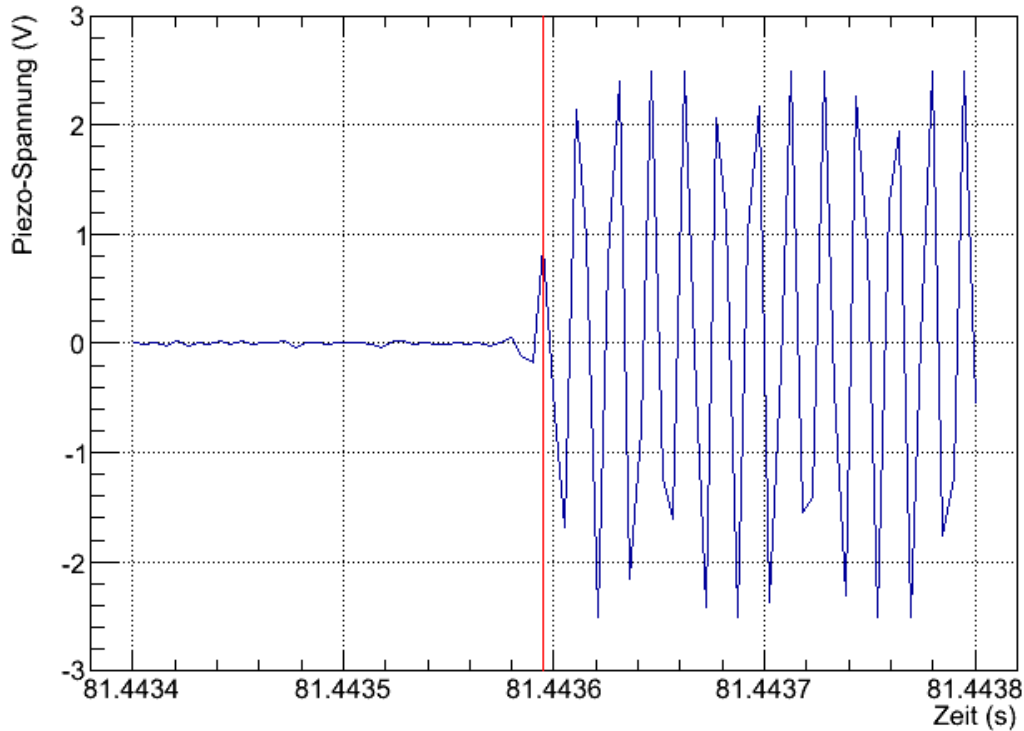


Abbildung 6.1: Ankunftszeitenbestimmung (rot) mittels Schwellenwertmethode Run 896-1 Pinger 11 (Piezo)

(trotz der davor und danach notwendigen Fouriertransformationen). Im Fourierraum ergibt sich somit für die Kreuzkorrelation

$$\Phi = F^* \cdot G \quad (6.3)$$

mit der fouriertransformierten Kreuzkorrelation Φ und den fouriertransformierten F und G der Funktionen f und g , die die ursprünglichen Messwerte (bzw. das gesuchte Signal) abbilden.

Zur Implementierung der diskreten Fouriertransformation (sowohl unsere Messwerte als auch das zu suchende Pingersignal liegen ja in diskreten Zeitabständen vor) wurde die bereits in Abschnitt 5.9 erwähnte Implementierung FFTW genutzt.

Die konkrete Verarbeitung erfolgt wie folgt: Zunächst werden Signallücken, die durch die begrenzte Bandbreite an die Küste zustandekommen, durch Füllen mit Nullen für die FFT nutzbar gemacht. Anschließend wird das kürzere der beiden Signale durch Ergänzen mit Nullen auf die Länge des längeren Signals gebracht. Sodann werden beide Signale fouriertransformiert. Als nächstes werden die komplexe Konjugation eines Signals und die Multiplikation beider Signale gemäß Gleichung 6.3 durchgeführt.

Anschließend wird das Ergebnis zurücktransformiert. Der höchste Wert dieses Ergebnisses wird bestimmt und seine Zeit als Ankunftszeit zurückgeliefert. Sofern der höchste Wert jedoch nicht mindestens einhundert mal so hoch wie der Mittelwert (diese Schwelle hat sich als sinnvoll herausgestellt) ist, wird davon ausgegangen, dass es sich nicht um einen wirklichen Fund des Signals handelt. Ebenso werden Ergebnisse verworfen, bei denen zwischen Sende- und Empfangszeitpunkt mehr als eine halbe Sekunde liegt, da dann davon ausgegangen wird, dass es sich nicht mehr um das Pingersignal handeln kann.

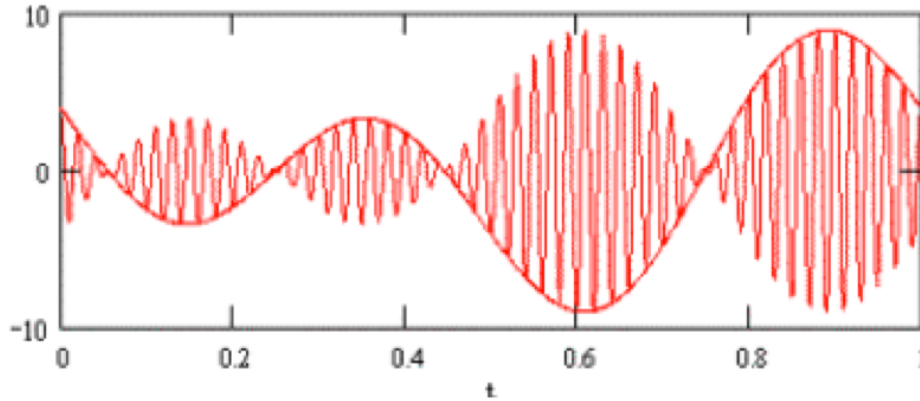


Abbildung 6.2: Die komplexe Einhüllende [Lan99]

6.4 Hilbert-Transformation

Bei dieser Methode wird die komplexe Einhüllende mittels Hilbert-Transformation gebildet. Nach LANGTON [Lan99] ist die Hilberttransformation in der Zeitdomäne definiert durch

$$\hat{g}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (6.4)$$

mit dem ursprünglichen Signal $g(t)$. Mit der bekannten Definition für die Faltung kann dies auch als

$$\hat{g}(t) = \frac{1}{\pi t} * g(t) \quad (6.5)$$

geschrieben werden.

Das analytische Signals definiert LANGTON [Lan99] als

$$g_+(t) = g(t) + i\hat{g}(t) \quad (6.6)$$

und ergänzt somit das gemessene Signal (das ja reellwertig ist) um einen komplexen Anteil. Dieses enthält nur noch Anteile im positiven Frequenzband, die negativen Frequenzanteile wurden abgestreift.

Dieses Signal lässt sich nun auch als

$$g_+(t) = \tilde{g}(t)e^{i2\pi f_m t} \quad (6.7)$$

schreiben. $\tilde{g}(t)$ bezeichnet dabei die komplexe Einhüllende von $g(t)$. Umgeschrieben wird dies zu

$$\tilde{g}(t) = g_+(t)e^{-i2\pi f_m t} \quad (6.8)$$

was zeigt, dass die komplexe Einhüllende im Endeffekt die frequenzverschobene Version des analytischen Signals ist (aus dem die Modulationsfrequenz f_m wieder herausgerechnet wurde). [Lan99]

Bildet man nun den Betrag der komplexen Einhüllenden (nur dieser interessiert uns), so ergibt sich unter Zuhilfenahme der Gleichung 6.6

$$|\tilde{g}(t)| = \sqrt{g^2(t) + \hat{g}^2(t)} \quad (6.9)$$

und es wird nicht einmal die Modulationsfrequenz benötigt.

Anschaulich ist dies in Abbildung 6.2 dargestellt. Dabei wurde ein Sinussignal mit einem höherfrequenten Sinus moduliert. Durch die Erzeugung des analytischen Signals haben wir nur eine Seite beibehalten (ansonsten hätten wir jeweils oben und unten ein Signal), durch die Erstellung der komplexen Einhüllenden wurde die hochfrequente Modulation herausgefiltert, übrig bleibt die niederfrequente rote Linie.

Wie in Abbildung 4.2 bzw. Gleichung 4.1 dargestellt, steigt unser Signal am Anfang an. Wenn also die komplexe Einhüllende des Signals gebildet wird, kann auf die ansteigende Flanke des Betrags derselben getriggert werden und somit die Ankunftszeit bestimmt werden.

Wie im Abschnitt 6.3 bereits erwähnt, entspricht die Faltung in der Frequenzdomäne einer einfachen Multiplikation. Diese ist trotz der doppelten Fouriertransformation wesentlich rechenunaufwändiger als die Faltung und wird somit eingesetzt.

Konkret wird das Signal wie folgt verarbeitet: Zunächst werden die Sendezeitpunkte der Pinger eingelesen. Anschließend wird die komplexe Einhüllende erstellt. Auf dieser werden nun alle weiteren Operationen durchgeführt.

Nun wird ein Signal als angekommen gesehen, wenn es den Schwellenwert von 1 überschreitet (in Einheiten der komplexen Einhüllenden). Die bekannte Plausibilitätsprüfung (innerhalb von einer zehntausendstel Sekunde muss das Signal auf den doppelten Wert angestiegen sein) hat sich für diese Methode als nicht zweckmäßig herausgestellt und unterbleibt deshalb. Im Prinzip haben wir jedoch trotzdem wieder die bekannte Schwellenwertmethode (wenn auch stark vereinfacht), die jetzt aber anstatt auf das direkte Signal auf die komplexe Einhüllende angewandt wird.

6.5 Methodenvergleich

6.5.1 Verwendete Runs

In einer ersten Auswahl wurden 13 Runs für die Analysen verwendet, wovon 5 speziell für diese Arbeit nur mit akustischen Daten aufgenommen wurden. Die Runs sind in einen Zeitraum vom 19. Juni 2013 bis zum 2. April 2014 aufgenommen worden. Leider war das PPM-DOM kurz darauf nicht mehr vom Steuerrechner aus erreichbar, weswegen keine weiteren Runs mehr aufgenommen werden konnten. In dieser ersten Auswahl befanden sich die Runnummern 691, 826, 834, 866, 896, 897, 920, 1042, 1064, 1065, 1085 und 1086. Speziell für diese Arbeit nur mit akustischen Daten wurden davon die Runs 691, 1064, 1065, 1085 und 1086 aufgenommen.

Leider hatten einige der nicht rein akustischen Runs massive Timingprobleme. Es erhalten anscheinend – im Verlauf des Runs – akustische Signale falsche Zeitangaben. Die Ursache dieses Fehlers ist unbekannt, die Runs waren deshalb jedoch nicht vollständig für eine Analyse geeignet. Daher wurden bei Run 866 nur die ersten 3 von 5 Pingerzyklen verwendet und bei Run 1042 nur die ersten 4 von 13. Bei den restlichen Runs wurden sämtliche Zyklen analysiert.

6.5.2 Anzahl erkannter Pinger

Je nach verwendeter Technik werden für jeden Zyklus eines Runs unterschiedlich viele Pinger erkannt. Optimalerweise sollte eine Technik natürlich alle Pinger, die im Signal vorhanden sind, erkennen und verwenden können. In der Praxis ist dies jedoch nicht immer der Fall, weshalb hier anhand verschiedener Runs eine Übersicht über die erkannten Pinger gegeben wird.

Da aufgrund der in Abschnitt 5.4 erwähnten Datennahmelücken nicht immer alle Pinger in jedem Zyklus enthalten waren, wird jeweils die Anzahl der vorhandenen, aber nicht erkannten Pinger angegeben. Dies ermöglicht eine bessere Beurteilung als die Anzahl der erkannten Pinger (da – je nach Anzahl, Position und Länge der Lücken – eine unterschiedliche Anzahl an Pingern im Zyklus enthalten sein kann). Die Anzahl der im Signal enthaltenen Pinger ist

Run	Zyklus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
691		14	12	14	12														
826		14	14	14															
834		14	14																
866		13	14	14															
896		14	14	14	14	14	14	13	14	14	14								
897		14	14	14															
920		14																	
1042		14	11	14	14														
1064		13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
1065		13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13				
1085		13	13																
1086		13	13	13															

Tabelle 6.1: Anzahl der im Signal vorhandenen Pinger je Zyklus

in Tabelle 6.1 ersichtlich und wurde mittels optischer Kontrolle der Wellenform der einzelnen Zyklen festgestellt. Bei den Runs 1064, 1065, 1085 und 1086 war der Pinger der Line 1 nach einem Stromausfall defekt (siehe Abschnitt 4.2), daher enthalten diese nur maximal 13 Pinger je Zyklus.

Schwellenwertmethode

Wie in Tabelle 6.2 zu erkennen ist, funktioniert die Schwellenwertmethode im Allgemeinen sehr zuverlässig. Vereinzelt wird ein Pinger nicht erkannt, was daran liegt, dass die entsprechenden Runs starke Störungen (die sich in spikeähnlichen Wellenformen äußerten) hatten, die den Schwellenwert überschritten hatten (und auch entsprechend schnell anstiegen, so dass sie fälschlicherweise als Pinger erkannt wurden). Dieses Phänomen tritt bei den offensichtlich generell mit einer schlechten Datenqualität versehenen Runs der 800er-Serie auf. Bei diesen Runs gab es auch andere technische Probleme bei der Aufnahme, die Datenübertragung über das I2C-Protokoll (über das auch der ADC für die akustischen Daten angebunden ist) lief zu diesem Zeitpunkt nicht zuverlässig, was auch aus diversen Einträgen aus dieser Zeit im elektronischen KM3NeT-Logbuch[Col] zu entnehmen ist. Für die rein akustischen Runs ist die Erkennung jedoch – wie man leicht erkennt – sehr zuverlässig.

Ein weiteres Phänomen ist das Wiederabnehmen des Pingersignals kurz nach dem ersten Anstieg, wie es in den Runs 896/1 (Pinger 1), 920/1 (Pinger 1 und 2. Durchgang Pinger 2) und 1042 (Pinger 1 und 5, alle Zyklen) auftrat. Dies kann möglicherweise durch Probleme mit dem Pinger oder Phänomenen im Wasser wie Luftblasen oder andere Störungen im Wasser erklärt werden. Ein solches Phänomen ist in Abb. 6.3 dargestellt.

Kreuzkorrelation

Bei der Kreuzkorrelation ergibt sich die Problematik, dass man durch Wahl des Faktors, um den der Peak der Korrelation das Rauschen derselben übersteigt, möglichst wenige Pinger wegschneiden will, andererseits aber auch nicht vorhandene Signale nicht als erkannt angeben will. Dafür hat sich – wie bereits erwähnt – ein Limit von 100 mal dem Mittelwert des ausgewerteten Zeitfensters (ab Sendezeitpunkt des Pingers 0.4 Sekunden) als nützlich herausgestellt.

Die Anzahl der nicht erkannten Pinger je Zyklus bei der Kreuzkorrelation ist aus Tabelle 6.3 ersichtlich. Wie zu sehen ist, wird sehr gut erkannt, ob ein Pinger angekommen ist.

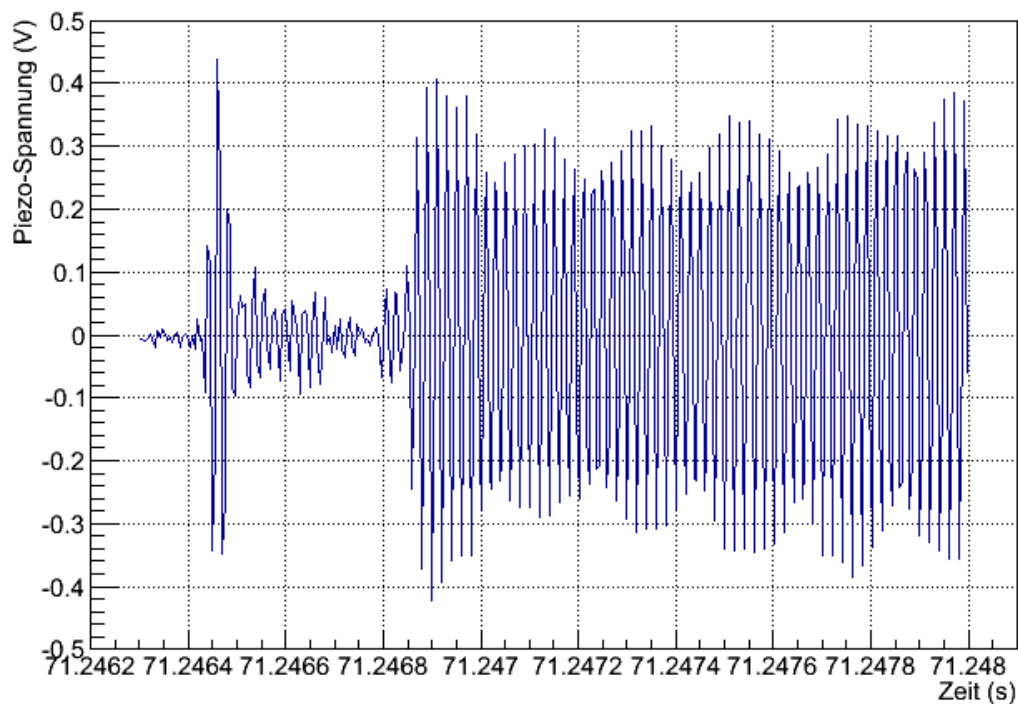


Abbildung 6.3: Effekt bei Run 896-1, Pinger 1

Run	Zyklus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
691		0	0	0	0														
826		0	1	0															
834		1	0																
866		0	0	0															
896		0	0	0	1	0	0	0	0	0	0								
897		0	0	0															
920		0																	
1042		0	0	0	0														
1064		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1065		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
1085		0	0																
1086		0	0	0															

Tabelle 6.2: Anzahl der nicht erkannten Pinger bei der Schwellenwertmethode je Zyklus

Run Zyklus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
691	0	0	0	0														
826	0	0	0															
834	0	0																
866	0	0	0															
896	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
897	1	1	1															
920	0																	
1042	0	0	0	0														
1064	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1065	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
1085	0	0																
1086	0	0	0															

Tabelle 6.3: Anzahl der nicht erkannten Pinger bei der Kreuzkorrelation je Zyklus

Run Zyklus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
691	1	0	0	0														
826	0	0	0															
834	0	0																
866	0	0	0															
896	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
897	0	0	0															
920	0																	
1042	0	0	0	0														
1064	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1065	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
1085	0	0																
1086	0	0	0															

Tabelle 6.4: Anzahl der nicht erkannten Pinger bei der Hilberttransformation je Zyklus

Hilbert-Transformation

Wie aus Tabelle 6.4 ersichtlich ist, wird mit Hilfe der Hilbert-Transformation die Anzahl der angekommenen Pinger ebenfalls sehr zuverlässig erkannt. Der Schwellenwert von 1 (in Einheiten des Betrags der komplexen Einhüllenden) hat sich als nützlich herausgestellt, um angekommene Pinger von nicht angekommenen zu unterscheiden. Lediglich beim 1. Zyklus des Run 691 befindet sich der Pinger der Line 5 unter diesem Wert.

6.5.3 Positionierungsergebnisse mit Minuit

Von o.g. Runs wurde mittels Minuit eine Positionierung (wie in Kapitel 4 beschrieben) durchgeführt. Dabei wurde der Zeitoffset zunächst mitgefittet. Anschließend wurden die Ergebnisse begutachtet und offensichtlich fehlerhafte Ergebnisse verworfen. Die Ergebnisse sind aus den Abbildungen A.1 bis A.36 im Anhang A ersichtlich, wobei die Daten in roter Farbe relevant sind. Auf die Daten in grüner Farbe bei den Runs 896, 1064 und 1065 werde ich in Abschnitt 7.4 eingehen.

Generell sind die Ergebnisse größtenteils nahe der Nominalposition und somit als realistisch einzuschätzen. Heraus stechen hier jedoch die Runs 834, 866 und 920 bei allen drei Methoden.

Run	Δx	Δy	Δz
691	0.0459171	0.0296785	0.0699368
826	0.0380737	0.0254405	0.0598983
834	0.0988236	0.0700066	1.44673
866	0.0993948	0.102618	0.0985931
896	0.0419227	0.0271045	0.062118
897	0.0417146	0.0270072	0.0619049
920	0.0786052	0.082572	0.713224
1042	0.102777	0.0781471	0.156589
1064	0.0457529	0.0292062	0.0679302
1065	0.0453494	0.0288766	0.0673258
1085	0.0441156	0.0275362	0.0663976
1086	0.0443176	0.028133	0.0667028
Durchschnitt	0.060563683	0.046360533	0.244779208

Tabelle 6.5: Durchschnittliche Minuit-Fehler bei der Schwellenwertmethode (in Metern)

Run	Δx	Δy	Δz
691	0.0459082	0.0299339	0.069542
826	0.0416879	0.0271634	0.0619214
834	0.098835	0.0700012	1.44471
866	0.0993624	0.102601	0.0986387
896	0.0414045	0.0270616	0.0615881
897	0.0450889	0.0292536	0.0678659
920	0.0786052	0.082572	0.713224
1042	0.102725	0.07811	0.157075
1064	0.0462065	0.0293167	0.0683949
1065	0.0456937	0.0290895	0.067813
1085	0.044985	0.0285522	0.067504
1086	0.0432378	0.0278762	0.0656996
Durchschnitt	0.061145008	0.046794275	0.245331383

Tabelle 6.6: Durchschnittliche Minuit-Fehler bei der Kreuzkorrelation (in Metern)

Diese weichen unrealistisch stark von den Nominalpositionen ab, sie liegen z.T. über 100 m über dem Positionsergebnis der anderen Runs (in z-Richtung), was physikalisch nicht möglich ist (das Kabel zur Verbindung kann sich nicht so stark dehnen). Möglicherweise gab es hier wieder Probleme mit der Zeitnahme oder andere Schwierigkeiten, die auf den Prototypenstatus zurückzuführen sind.

6.5.4 Positionierungsfehler aus Minuit

Ein weiterer Indikator für die Qualität der Ankunftszeitbestimmungsmethoden sind die Fehler, die Minuit bei der Positionierung liefert. Diese sind zwar – wie bereits in Abschnitt 6.1 erwähnt – nicht exakt zu verstehen, liefern jedoch einen guten Anhaltspunkt. Je geringer der von Minuit ausgegebene Fehler ist, als desto besser kann man die Qualität ansehen.

Wie in den Tabellen 6.5 (für die Schwellenwertmethode), 6.6 (für die Kreuzkorrelation) sowie 6.7 zu sehen ist, sind die Unterschiede in den Minuit-Fehlerwerten eher gering. Die größten Fehlerwerte liefert interessanterweise die Kreuzkorrelation. An zweiter Stelle folgt die Hilbert-transformation, während die Schwellenwertmethode die geringsten Fehler liefert. Eine mögliche

Run	Δx	Δy	Δz
691	0.0464741	0.0300163	0.0709409
826	0.0413085	0.0269261	0.0616434
834	0.098823	0.0700069	1.44684
866	0.0993951	0.102618	0.0985928
896	0.0419455	0.0271151	0.0622691
897	0.0417409	0.0270225	0.0619504
920	0.0786052	0.082572	0.713224
1042	0.102648	0.0781606	0.156951
1064	0.0457784	0.0292596	0.0679952
1065	0.0455195	0.0288819	0.0676812
1085	0.0446309	0.0282902	0.067125
1086	0.0444101	0.0281853	0.0668266
Durchschnitt	0.060939933	0.046587875	0.245169967

Tabelle 6.7: Durchschnittliche Minuit-Fehler bei der Hilberttransformation (in Metern)

Erklärung für die großen Fehler der Kreuzkorrelation ist, dass das Pingersignal durch u.a. die Charakteristik des Empfängers und Beeinflussungen im Wasser so verändert wird, dass es nicht mehr exakt mit dem Muster übereinstimmt. Auch ist es möglich, dass aufgrund der relativ großen Länge des zu findenden Signals gegenüber einer Schwingungsperiode bei kurzzeitigen Störungen am Anfang des Signals die Kreuzkorrelation auf eine spätere Schwingungsperiode auslöst. Die größeren Fehler der Hilberttransformation gegenüber der Schwellenwertmethode könnten darauf zurückzuführen sein, dass bei der Hilberttransformation die Feinheiten des Signals verlorengehen und nur noch die Einhüllende untersucht wird.

Wie deutlich zu erkennen ist, sind die Fehler in der z-Positionierung deutlich höher als in der x- und y-Positionierung. Dieses Phänomen hängt mit der Geometrie des Detektors zusammen und wird in Abschnitt 8.2 erklärt.

Auffällig ist weiterhin, dass sich die Fehler frühestens ab der 2. geltenden Ziffer unterscheiden.

6.5.5 Positionsschwankungen innerhalb eines Runs

Ein weiteres Qualitätskriterium sind die Positionsschwankungen innerhalb eines Runs. Da die Zyklen jedoch 2 Minuten auseinander liegen und sich zwischenzeitlich das DOM bewegt haben kann, ist die Aussagekraft nur begrenzt. Man könnte hier mit großem Aufwand (z.B. durch Kompassdaten) echte Bewegungen von Positionierungsfehlern unterscheiden, um exaktere Ergebnisse zu erhalten. Dennoch wurden die Schwankungen betrachtet. Der Run 920 wurde bei der Standardabweichung nicht berücksichtigt, da dieser nur aus einem einzigen Zyklus besteht. Zur Einschätzung der Schwankungen wurde die Standardabweichung der Werte innerhalb eines Runs berechnet. Dies geschieht wie gewohnt mittels

$$s(X) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_x (x - \mu)^2} \quad (6.10)$$

mit der Position x und dem Mittelwert μ der N Positionen in diesem Run.

Die Standardabweichungen sind in den Tabellen 6.8, 6.9 und 6.10 zu sehen.

Hier ergibt sich ein interessantes Bild: Mit Abstand am Größten sind die Standardabweichungen wieder bei der Kreuzkorrelation, aus den gleichen Gründen wie schon im vorherigen Abschnitt erwähnt. In x- und y-Richtung am Geringsten sind sie bei der Schwellenwertmethode (was wieder mit der größeren Feinheit des Signals begründet werden könnte), in z-Richtung allerdings bei der Hilberttransformation. Die Aussagekraft ist jedoch – wie bereits erwähnt – begrenzt.

Run	$s(X)$	$s(Y)$	$s(Z)$
691	0.0390084	0.0281662	0.0668011
826	0.0716492	0.0175509	0.103521
834	0.00290869	0.0038082	8.77572e-05
866	0.0070453	0.00738504	0.0094146
896	0.0234472	0.0143854	0.0521889
897	0.0476593	0.0224028	0.103237
1042	0.000371708	0.000198291	0.0328534
1064	0.0419778	0.0361871	0.0684059
1065	0.0426691	0.026286	0.0647558
1085	0.0708969	0.0404214	0.136026
1086	0.0253957	0.00651781	0.0523605
Durchschnitt	0.031085775	0.016942428	0.057470996

Tabelle 6.8: Standardabweichung bei der Schwellenwertmethode (in Metern)

Run	$s(X)$	$s(Y)$	$s(Z)$
691	0.449528	0.439863	0.844054
826	0.0681742	0.106807	0.324507
834	0.00723709	0.00951127	0.000218238
866	0.0246175	0.0252239	0.0330378
896	0.257446	0.28997	0.593042
897	0.39189	0.348872	0.604758
1042	0.00425669	0.00241642	0.310453
1064	0.53493	0.294358	0.891755
1065	0.540756	0.333031	0.829537
1085	0.259491	0.194189	0.633565
1086	0.350436	0.341259	0.546694
Durchschnitt	0.240730207	0.198791716	0.467635087

Tabelle 6.9: Standardabweichung bei der Kreuzkorrelation (in Metern)

Run	$s(X)$	$s(Y)$	$s(Z)$
691	0.0405107	0.0199589	0.0532738
826	0.0239868	0.0120642	0.0394416
834	0.00436304	0.0057123	0.000131636
866	0.0033935	0.003558	0.004534
896	0.0310509	0.0172599	0.0583594
897	0.0320985	0.0328493	0.0511238
1042	0.913466	0.651977	0.0798691
1064	0.0341509	0.0229465	0.0448773
1065	0.0372504	0.018842	0.0408562
1085	0.00270142	0.0113634	0.0118363
1086	0.0471508	0.0132752	0.0719953
Durchschnitt	0.097510247	0.067483892	0.03802487

Tabelle 6.10: Standardabweichung bei der Hilberttransformation (in Metern)

6.5.6 Ergebnis

Insgesamt ergibt sich aus den Minuit-Fehlern und Standardabweichungen, dass die Schwellenwertmethode tatsächlich die beste Technik der Ankunftszeitenbestimmung ist, gefolgt von der Hilberttransformation. Die Kreuzkorrelation liegt weit abgeschlagen, was möglicherweise an Veränderungen des Musters auf dem Weg zum oder im Empfänger oder an den (im Vergleich zu einer Schwingungsperiode) langen gleichartigen Pingersignalen liegen könnte.

7 Zeitoffset-Fit

Wie in Gleichung 4.2 dargestellt, wird bei der Positionierung ein Zeitoffset t_{sync} mitgefittet, um im jeweiligen Zyklus das empfangene Signal zeitlich mit dem theoretisch erwarteten Signal zu synchronisieren. Die zeitlichen Ungenauigkeiten, die diesen Offset nötig machen, haben ihre Ursache in Synchronisationsproblemen beim Runstart. Bisher wurde dieser Offset beim Fit eines jeden Zyklus neu bestimmt.

Es wäre jedoch denkbar, dass die z.T. sehr starken Abweichungen der DOM-Positionen zwischen zwei zeitlich benachbarten Zyklen mit stark unterschiedlichen Offsets der beiden Fits zusammenhängen, obwohl sich der Offset in der Realität nicht geändert hat. Diesem Effekt wird in diesem Kapitel nachgegangen.

7.1 Verwendete Runs

Die Auswirkungen eines festgelegten Zeitoffsets t_{sync} werden auf einer Auswahl der bisher getesteten Runs analysiert. Sinnvollerweise verwendet man dafür nur die langen Runs (mit mehr als 5 Pingerzyklen). Dies sind die Runs mit den Nummern 896 (10 Zyklen), 1064 (18 Zyklen) und 1065 (14 Zyklen). Aufgrund der langen Laufzeit ist hier eine genügend große Stichprobe vorhanden, um die Auswirkungen eines gemittelten Offsets innerhalb ein- und desselben Runs zu sehen. Eine Mittelung über mehrere Runs würde aufgrund der großen zeitlichen Abstände zwischen denselben und den unklaren (und ungleichmäßigen) Startproblemen nicht viel Sinn ergeben.

7.2 Vorgehensweise

Konkret wird wie folgt vorgegangen: Zunächst wird aus den bisher erstellten Fits (wieder nach Herausnahme offensichtlicher Ausreißer) für jeden Run einzeln der Mittelwert aus den Offsets sämtlicher Zyklen ermittelt. Dieser wird nun in Minuit als fester Wert für t_{sync} hinterlegt und der Fit damit erneut gestartet, wobei die anderen drei Fitwerte (die Koordinaten) vor dem Start wieder auf die nominalen Werte zurückgesetzt werden und der Fit daher (bis auf das nicht zu fittende t_{sync}) genauso abläuft wie zuvor. Die Fits haben jetzt jedoch einen Freiheitsgrad mehr, da ja nur 3 statt 4 Parametern gefittet werden, die Anzahl an Pingern aber gleich bleibt. Dies ist u.a. bei der Interpretation der durch Minuit gelieferten Fehler relevant (wird aber automatisch berücksichtigt).

7.3 Durchschnittlicher Zeitoffset

Die Durchschnittswerte von t_{sync} je Run und Ankunftszeitenmethode sind in Tabelle 7.1 dargestellt. Wie zu erkennen ist, sind die Offsets innerhalb eines Runs weitgehend unabhängig von der verwendeten Methode zur Ankunftszeitenbestimmung. Kleine Abweichungen sind jedoch möglich, da die verschiedenen Methoden auf verschiedene Schwingungen des Pingersignals triggern können.

Run	Schwellenwertmethode	Kreuzkorrelation	Hilberttransformation
896	0.120415 ± 0.000044	0.120722 ± 0.000044	0.120382 ± 0.000044
1064	0.0939889 ± 0.0000481	0.0931396 ± 0.0000486	0.0939538 ± 0.0000481
1065	0.0609438 ± 0.0000478	0.0601468 ± 0.0000482	0.060916 ± 0.000048

Tabelle 7.1: Durchschnittliches t_{sync} je Run und Ankunftszeitenbestimmungsmethode (in Sekunden)

7.4 Positionierung mit gemitteltem Zeitoffset

Nun wurde die Positionierung – wie bereits erwähnt – mit dem oben ermittelten gemittelten Zeitoffset durchgeführt und analysiert. Die Positionierungsergebnisse befinden sich in grüner Farbe in den Positionierungsplots der entsprechenden Runs: Dies sind die Abbildungen A.5, A.9 und A.10 für die Schwellenwertmethode, die Abbildungen A.17, A.21 und A.22 für die Kreuzkorrelation sowie die Abbildungen A.29, A.33 und A.34 für die Hilberttransformation. Auffällig ist bei den Plots mit gemitteltem (festem) Zeitoffsets, dass generell sowohl die Positionsschwankungen als auch die Fehlerbalken kleiner sind, worauf im nächsten Abschnitt noch genauer eingegangen wird.

Bei der Kreuzkorrelation fällt generell auf, dass die mit gemitteltem Offset gefundenen Werte sehr stark von den mit gefittetem Offset gefundenen Werten abweichen und allgemein sehr stark streuen. Dies ist in diesem Ausmaß bei den anderen beiden Ankunftszeitbestimmungsmethoden nicht zu sehen. Eine mögliche Erklärung ist – wie bereits in Abschnitt 6.5.4 erklärt – die Auslösung auf verschiedene Schwingungen des Signals, da das Signal gegenüber der Periodendauer der Schwingung sehr lange ist und daher die Kreuzkorrelation bei geringsten Störungen leicht versetzt besser passt.

7.5 Vergleich zwischen gemitteltem und mitgefittetem Offset

Zum Vergleich mit den in Abschnitt 6.5 erhaltenen Ergebnissen werden auch für den festen Offset t_{sync} wieder die Minit-Fehlerangaben sowie die Positionsschwankungen innerhalb eines Runs betrachtet. Außerdem wurden die Durchschnittswerte der Fehler und Standardabweichungen mit gefittetem Offset für die 3 Runs, die auch mit gemitteltem Offset betrachtet werden, gebildet. Diese sind (unter den neuen Ergebnissen) in den Tabellen 7.2 bis 7.7 zu sehen.

Beim Vergleich der Fehler fällt auf, dass für die Runs 896, 1064 und 1065 die Minit-Fehler bei gemitteltem Zeitoffset deutlich kleiner (etwa um den Faktor 4) sind als bei mitgefittetem Offset. Die Durchschnittswerte liegen noch deutlich näher beisammen als bei mitgefittetem Offset. Bei der Rangfolge der Methoden muss jetzt nach Richtungen unterschieden werden: Den kleinsten Fehler in x-Richtung hat wieder die Schwellenwertmethode, gefolgt von der Kreuzkorrelation und der Hilberttransformation. In y-Richtung hat die Kreuzkorrelation den geringsten Fehler, gefolgt von der Schwellenwertmethode und der Hilberttransformation. In z-Richtung hat wiederum die Schwellenwertmethode den kleinsten Fehler, gefolgt von der Hilberttransformation. Den größten Fehler hat hier die Kreuzkorrelation. Es ist jedoch generell anzumerken, dass die Unterschiede so gering sind (in der Größenordnung von 0.1 mm), dass eine Betrachtungsreihenfolge aufzustellen kaum Rückschlüsse auf die Qualität der Methoden zulässt.

Für die Positionsschwankungen wurde wie gehabt die Standardabweichung berechnet. Hier ergeben sich interessante Effekte: Bei der Schwellenwertmethode sind für gemittelten Offset die Standardabweichungen in x-Richtung bei Run 896 geringer als bei mitgefittetem Offset, bei den anderen zwei Runs höher. Für die y-Abweichungen gilt genau das Umgekehrte.

Bei der Kreuzkorrelation ist das Bild einheitlicher: Alle drei Runs haben mit gemitteltem Offset

Run	Δx	Δy	Δz
896	0.0106813	0.0123117	0.0116107
1064	0.0111476	0.0137942	0.0123166
1065	0.0111464	0.0137954	0.0123085
Durchschnitt	0.010991767	0.013300433	0.0120786
Vergleichswert	0.044341667	0.028395767	0.065791333

Tabelle 7.2: Durchschnittliche Minuit-Fehler bei der Schwellenwertmethode (Offset gemittelt, in Metern)

Run	Δx	Δy	Δz
896	0.010592	0.0121792	0.0115905
1064	0.0111988	0.0138529	0.012375
1065	0.0111912	0.0138199	0.0123315
Durchschnitt	0.010994	0.013284	0.012099
Vergleichswert	0.0444349	0.028489267	0.065932

Tabelle 7.3: Durchschnittliche Minuit-Fehler bei der Kreuzkorrelation (Offset gemittelt, in Metern)

Run	Δx	Δy	Δz
896	0.010674	0.0123018	0.0116037
1064	0.0111567	0.0138038	0.012326
1065	0.0111558	0.0138027	0.0123203
Durchschnitt	0.0109955	0.013302767	0.012083333
Vergleichswert	0.044414467	0.028418867	0.065981833

Tabelle 7.4: Durchschnittliche Minuit-Fehler bei der Hilberttransformation (Offset gemittelt, in Metern)

niedrigere Standardabweichungen in alle drei Richtungen als bei mitgefittetem Offset.

Bei der Hilberttransformation ist das Bild wieder uneinheitlicher: Die x-Standardabweichungen sind – wie bei der Schwellenwertmethode – für Run 896 kleiner, für alle anderen größer als bei mitgefittetem Offset. Die y-Standardabweichung ist nur bei Run 1065 größer, bei allen anderen kleiner. Bei den z-Standardabweichungen verhält es sich wie bei denen in x-Richtung (Run 896 kleiner, alle anderen größer).

Die Durchschnittswerte der Standardabweichungen sind bei gemitteltem Offset bei der Schwellenwertmethode für die x-Richtung größer, für die y- und z-Richtungen kleiner als bei gefittetem Offset. Bei der Kreuzkorrelation sind sie durchgängig kleiner, bei der Hilberttransformation durchgängig größer als bei mitgefittetem Offset.

Da jedoch bei Betrachtung der Plots (insbesondere bei den Runs 1064 und 1065) ein deutlicher linearer Verlauf der gefitteten Werte erkennbar ist (noch dazu wird der Verlauf von Run 1064 beim kurz danach aufgenommenen Run 1065 fortgesetzt), kann möglicherweise von einer tatsächlichen Bewegung oder Drehung des PPM-DOM ausgegangen werden. Ein kurzer Test bei diesen Runs mit einem linearen Fit auf die Positionen bei gemitteltem Offset ergab ein χ^2 von etwa 1, was für diese These spricht. Es können jedoch auch systematische Fehler o.ä. als Ursache nicht ausgeschlossen werden.

Von den Plots her und den Minuit-Fehlern scheint der gemittelte Offset insgesamt deutlich stabilere und fehlerärmere Ergebnisse zu liefern, so dass diese Methode empfohlen werden kann.

Run	$s(X)$	$s(Y)$	$s(Z)$
896	0.0130505	0.0148436	0.0390698
1064	0.0521936	0.024885	0.0657141
1065	0.0530416	0.0231173	0.0447022
Durchschnitt	0.039428567	0.020948633	0.0498287
Vergleichswert	0.036031367	0.0256195	0.061783533

Tabelle 7.5: Standardabweichung bei der Schwellenwertmethode (Offset gemittelt, in Metern)

Run	$s(X)$	$s(Y)$	$s(Z)$
896	0.151661	0.148921	0.130638
1064	0.112642	0.117244	0.168426
1065	0.127577	0.267106	0.126714
Durchschnitt	0.130626667	0.177757	0.141926
Vergleichswert	0.444377333	0.305786333	0.771444667

Tabelle 7.6: Standardabweichung bei der Kreuzkorrelation (Offset gemittelt, in Metern)

Run	$s(X)$	$s(Y)$	$s(Z)$
896	0.0151545	0.014869	0.0379679
1064	0.0507621	0.0215191	0.074609
1065	0.0486701	0.0259248	0.0515367
Durchschnitt	0.038195567	0.020770967	0.054704533
Vergleichswert	0.034150733	0.0196828	0.048030967

Tabelle 7.7: Standardabweichung bei der Hilberttransformation (Offset gemittelt, in Metern)

8 Weitere Analysen

8.1 Abhängigkeit der Amplitude vom Einfallswinkel

Im Rahmen der Prüfung der Tauglichkeit des PPM-DOM für KM3NeT wurde in einer zeitlich frühen Phase dieser Arbeit auch die Winkelabhängigkeit der Amplitude der eintreffenden Signale abgeschätzt. Dafür wurden die bekannten Pingerpositionen aus Tabelle 4.2 verwendet und das DOM an seiner nominalen Position mit Ausrichtung des Piezosensors in Richtung des Meeresgrundes angenommen.

Dazu wurden die Runs 533 und 691 untersucht. Run 533 besteht aus 3 Zyklen, Run 691 aus 4. Die Maximalwerte der Spannungen, die die Pingersignale am Empfänger auslösen, wurden jeweils aufgetragen (Pinger 2 auch für den 2. Durchlauf) und die Winkel nach der Formel

$$\Theta = \arctan \frac{\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}}{\Delta z} \quad (8.1)$$

berechnet, wobei Δx , Δy und Δz die Abstände des DOM vom jeweiligen Pinger in x-, y- bzw. z-Richtung sind. Die Formel lässt sich gemäß Abbildung 8.1 geometrisch herleiten.

Die Amplituden der Pinger wurden „von Hand“ aus der graphischen Darstellung der Wellenform abgelesen und in Abhängigkeit vom Winkel in Abbildung 8.2 eingetragen. Dabei bezeichnet „Rxxx_y“ die 1. Auslösung und „Rxxx_y.2“ die 2. Auslösung (in der nur der Pinger der Line 2 enthalten ist) des y. Pingerzyklus im xxx. Run. Wie zu sehen ist, sättigen die Pinger sehr lange den Piezosensor (bei 2.5 V Spannung), bis sie abfallen. Ab etwa $\Theta = 50^\circ$ ist ein Abfallen der Amplitude erkennbar. Nicht berücksichtigt ist in diesem Plot die Dämpfung durch die Entfernung der Pinger zum Sensor, die jedoch bei den relevanten Längenskalen im Wasser eher gering ist. Insgesamt entspricht das Ergebnis den Erwartungen.

Prinzipiell bringt die Winkelabhängigkeit der Amplitude über den time walk effect (siehe Abschnitt 6.2) eine Ungenauigkeit in die Bestimmung mittels der beiden von der Amplitude abhängigen Methoden (Schwellenwertmethode und Hilberttransformation). In der Praxis ist diese jedoch aufgrund ihrer geringen Auswirkungen zu vernachlässigen.

8.2 Geometrische Effekte

Bei genauer Betrachtung der Abbildung 3.1 fällt auf, dass die Genauigkeit der Positionierung aus geometrischen Gründen nicht in alle drei Raumrichtungen gleich ist. Während in x- und y-Richtung viele verschiedene Quellorte existieren (die Pinger haben unterschiedliche x- und y-Koordinaten), sind die z-Koordinaten der Pinger nahezu gleich (siehe auch Tabelle 4.2).

Konkret ergibt sich bei den x-Positionen der Pinger eine Spanne von 227.3 m, bei den y-Positionen noch von 190.58 m, wohingegen die Spanne bei den z-Positionen vergleichsweise kleine 87 cm beträgt, diese also nahezu in einer Ebene liegen. Dabei wurden die nominalen Positionen zugrundegelegt. Dies entspricht (von z zu x) immerhin einem Faktor von über 260. Zur genaueren Analyse werden nun die Minit-Fehler für die x-, y- und z-Richtungen genauer betrachtet. Diese ergeben sich aus den Tabellen 6.5, 6.6, 6.7 sowie 7.2, 7.3 und 7.4.

Generell ist zu beachten, dass das PPM-DOM am äußersten Rand des Detektors sitzt. In x- und z-Richtung kommen die Pinger praktisch nur aus einer Richtung, in y-Richtung bis auf die

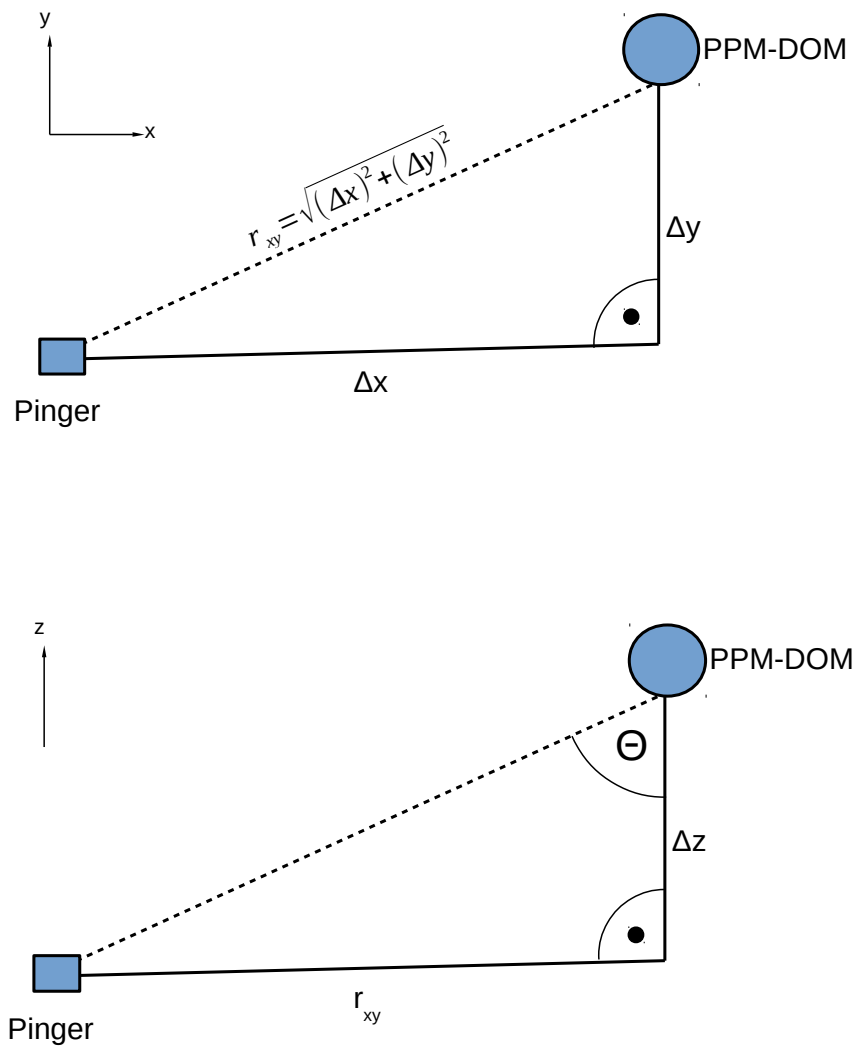


Abbildung 8.1: Geometrische Herleitung der Gleichung 8.1

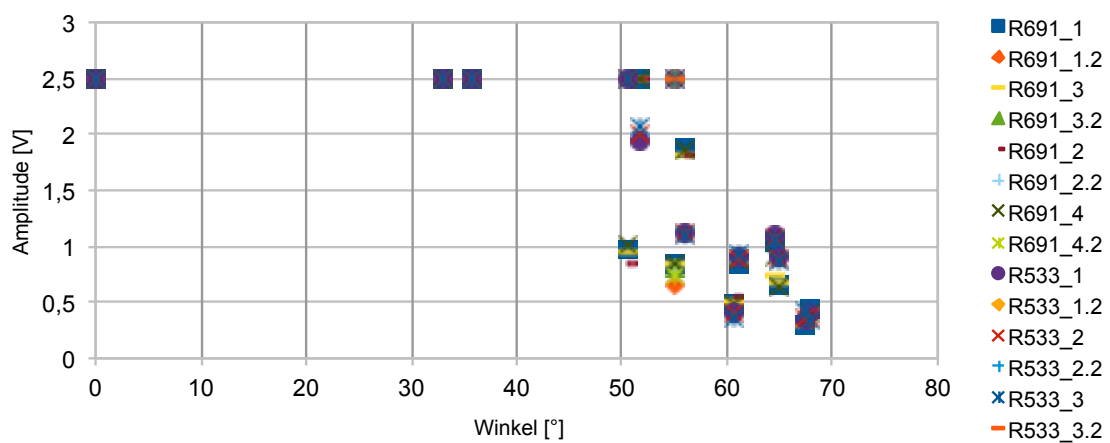


Abbildung 8.2: Abhängigkeit der Amplitude vom Einfallswinkel

Zyklus	\bar{O}_x	x	\bar{O}_y	y	\bar{O}_z	z
691-2	0.041234243	0.050193769	0.026850059	0.03379026	0.06161872	0.07531006
691-4	0.041234243	0.048461692	0.026850059	0.030451033	0.06161872	0.075568286
866-1	0.099394726	0.099395432	0.102617561	0.102617858	0.098593255	0.098592313
896-7	0.041593164	0.045272159	0.026969732	0.028463088	0.061773416	0.066188034
1042-2	0.102778002	0.102778785	0.078148029	0.0781486	0.156577787	0.156570389

Tabelle 8.1: Minuit-Fehlerwerte für Schwellenwertmethode für vollständige und unvollständige Zyklen (in Metern) – Erklärung der Spalten: siehe Text

Zyklus	\bar{O}_x	x	\bar{O}_y	y	\bar{O}_z	z
691-2	0.041182924	0.050990357	0.027081031	0.034725856	0.06117941	0.07560513
691-4	0.041182924	0.048092457	0.027081031	0.030390723	0.06117941	0.074872939
866-1	0.099363114	0.099361919	0.102601737	0.102601042	0.098637656	0.098639408
896-7	0.041073268	0.044851125	0.026914753	0.028562274	0.061192405	0.065702407
1042-2	0.102735467	0.1027205	0.078117338	0.078106178	0.156980359	0.157121265

Tabelle 8.2: Minuit-Fehlerwerte für Kreuzkorrelation für vollständige und unvollständige Zyklen (in Metern) – Erklärung der Spalten: siehe Text

Pinger der Line 10 und 12 ebenfalls (siehe wieder Tabelle 4.2).

Wie zu erwarten war, sind die Fehler (bei mitgefittetem Offset) in z-Richtung tatsächlich am größten, in x-Richtung am zweitgrößten und in y-Richtung am kleinsten (hier befinden sich immerhin zwei Pinger in der anderen Richtung). Bei gemitteltem Offset sind jedoch die Fehler in y-Richtung am größten, gefolgt von der z-Richtung und der x-Richtung. Diese unterscheiden sich hier jedoch nur im Millimeterbereich, so dass sich dies bei größerer Stichprobe ändern könnte und de facto keine wirkliche qualitative Aussage möglich ist.

8.3 Abhängigkeit von der Anzahl der Pinger

Bei den Runs 691, 866, 896 und 1042 sind bei einigen Zyklen aufgrund von Problemen bei der Datenübertragung zur Küste (siehe Abschnitt 5.4) nicht alle Pingersignale vorhanden, wie aus Tabelle 6.1 ersichtlich ist. Dies könnte einen Einfluss auf die Genauigkeit der Positionierung haben. Das System ist zwar sowieso überbestimmt (je nach Offsetbestimmungsmethode werden nur 3 bis 4 Pingersignale benötigt aufgrund der vorhandenen Freiheitsgrade), jedoch steigern mehr vorhandene Pingersignale in der Regel die Genauigkeit.

Betroffen sind bei Run 691 die Zyklen 2 und 4 (jeweils 12 statt 14 Pinger), bei Run 866 der Zyklus 1 (13 statt 14 Pinger), bei Run 896 der Zyklus 7 (13 statt 14 Pinger) und bei Run 1042 der Zyklus 2 (11 statt 14 Pinger). Von diesen Zyklen wurden bei allen 3 Ankunftszeitsbestimmungsmethoden sämtliche Pinger erkannt, so dass alle Methoden für die Analyse verwendet werden können.

Zur Analyse wurde jeweils der Durchschnittswert der Positionierungsfehler der Zyklen im jeweiligen Run, bei dem alle Pinger erkannt wurden, gebildet und der Wert bei den Zyklen, die nicht alle Pinger enthalten, damit verglichen.

In den Tabellen 8.1, 8.2 und 8.3 sind die Ergebnisse dieses Vergleichs notiert. Dabei sind x, y und z die Fehler für den in der Spalte „Zyklus“ bezeichneten Zyklus, die mit „ \bar{O} “ bezeichneten Werte dagegen die Fehlermittelwerte für alle Zyklen des gleichen Runs, in denen alle Pinger enthalten sind. Auffällig ist, dass bei den Runs 691 und 896 tatsächlich ein erheblich größerer Fehler bei weniger Pingern vorhanden ist, wohingegen dieser bei den Runs 866 und 1042 etwa gleich dem Durchschnittswert ist. Somit ist keine Aussage über den Einfluss von fehlenden

Zyklus	$\bar{O} \ x$	x	$\bar{O} \ y$	y	$\bar{O} \ z$	z
691-2	0.041225696	0.050401535	0.026860053	0.033920556	0.06162407	0.075529188
691-4	0.041225696	0.048510393	0.026860053	0.030488717	0.06162407	0.075622938
866-1	0.099394985	0.099395432	0.10261767	0.102617858	0.09859291	0.098592313
896-7	0.041616665	0.045267054	0.026981499	0.028470481	0.061879749	0.066206626
1042-2	0.102562548	0.102778785	0.078169603	0.0781486	0.157192283	0.156570389

Tabelle 8.3: *Minuit-Fehlerwerte für Hilberttransformation für vollständige und unvollständige Zyklen (in Metern) – Erklärung der Spalten: siehe Text*

Pingern auf die Genauigkeit möglich.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden die Daten eines neuartigen Piezosensors, der im Prototyp PPM-DOM eines Detektionsmoduls des KM3NeT-Neutrinoobservatoriums enthalten ist, untersucht. Insgesamt liefert er gute Ergebnisse für die Positionierung.

Nach einigen größeren Anfangsschwierigkeiten aufgrund technischer Probleme ist jetzt eine zuverlässige Auswertung der Daten des Piezosensors des PPM-DOM möglich. Mit aufgetretenen Datennahmelücken kann umgegangen werden, diese sind jedoch nur aufgrund der Einpassung in die ANTARES-Infrastruktur entstanden und treten bei rein akustischen Runs nicht auf. Auch wird erwartet, dass diese beim Einsatz in KM3NeT nicht auftreten werden.

Aufgetretene Probleme mit der Synchronisation des Runstarts auf die GPS-Zeit sowie einer falschen Zeitskala im weiteren Verlauf der Runs sind jetzt anscheinend gelöst. Die neuesten rein akustischen Runs zeichnen sich durch lückenlose Datennahme und saubere Zeitnahme aus. Es wurde ein Datenformat entwickelt, in dem die akustischen Daten platzsparend gespeichert und schnell verarbeitet werden können. Dieses Format kommt mit den fehlenden Frames bei zu hoher optischer Aktivität zurecht und speichert die Daten in SI-Einheiten, womit eine einfache Weiterverarbeitung gewährleistet ist.

Verschiedene Methoden der Ankunftszeitbestimmung wurden betrachtet. Dabei wurden diese an einer Auswahl an Runs getestet. Die einfache und robuste Schwellenwertmethode stellte sich dabei als beste Technik heraus, um die Ankunftszeiten (und dadurch auch die Positionen des PPM-DOM) zu bestimmen. Mit ihr erreicht man problemlos die für die Neutrinodetektion erforderliche Genauigkeit bei der Positionsbestimmung der Detektorbestandteile.

Effekte des Mitteln oder des Mitfittens der Zeitoffsets, der durch Synchronisationsprobleme verursacht wurde, wurden betrachtet. Dabei wurde eine ähnliche Analyse wie beim allgemeinen Methodenvergleich der Ankunftszeitbestimmung durchgeführt und festgestellt, dass die Methode, die Zeitoffsets durch Synchronisationsprobleme erst für jeden einzelnen Zyklus zu fitten, diesen anschließend zu mitteln und mit dem gemittelten Wert die Positionen erneut zu fitten, die exakteste ist.

Weiterhin wurden Abhängigkeiten der Amplitude vom Einfallswinkel der Signale untersucht, wobei hier wie zu erwarten ein starker Abfall ab etwa 50° festgestellt werden kann, während vorher die Signale in Sättigung sind. Die Auswirkungen auf die Positionsrekonstruktion sind in der Praxis aber – solange der Pinger überhaupt noch erkannt wird – zu vernachlässigen.

Geometrische Effekte wurden ebenfalls analysiert, wobei sich hier ein etwas uneinheitliches Bild ergab: Bei mitgefittetem Synchronisationszeitoffset wurden die erwarteten Effekte durch die Geometrie des Detektors sichtbar, bei gemitteltem jedoch nicht. Die Stichprobe an für den gemittelten Offset erforderlichen Runs ist jedoch zu gering, um wirkliche Aussagen zu ermöglichen. Die Aufnahme neuer Runs ist aufgrund der Tatsache, dass das PPM-DOM aufgrund eines technischen Defekts bis auf weiteres nicht mehr funktionstüchtig ist, derzeit nicht mehr möglich.

Zuletzt wurde noch die Abhängigkeit der Positionierungsgenauigkeit von der Anzahl der Pinger untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass bei einigen Runs deutliche Unterschiede in der Fehlergröße sichtbar sind, bei anderen jedoch überhaupt keine. Auch aufgrund der kleinen Stichprobe ist eine Interpretation dieser Tatsache sehr schwierig.

Insgesamt sprechen die Ergebnisse dieser Arbeit für eine gute Nutzbarkeit des untersuchten (in Erlangen am ECAP gefertigten) piezoelektrischen Instruments im PPM-DOM. Für die

Positionierung in KM3NeT ist es somit gut geeignet und kann aufgrund seiner Preisgünstigkeit klar empfohlen werden.

Ein positiver Nebeneffekt ist, dass der Einsatz akustischer Sensoren in KM3NeT die akustische Neutrinodektion, für die in ANTARES bereits eine Machbarkeitsstudie durchgeführt wurde, in den Bereich des Möglichen rückt. Durch die großen Volumina in KM3NeT und die Vielzahl an Piezosensoren in diesen Volumina ist eine Erkennung von Neutrinos mit deutlich höherer Energie als bei der optischen Methode möglich.

Es darf also eine spannende Zukunft mit KM3NeT, der Positionierung mittels des neuartigen piezoelektrischen Elements und der akustischen Neutrinodektion erwartet werden.

A Graphische Darstellung der Positionierungsergebnisse

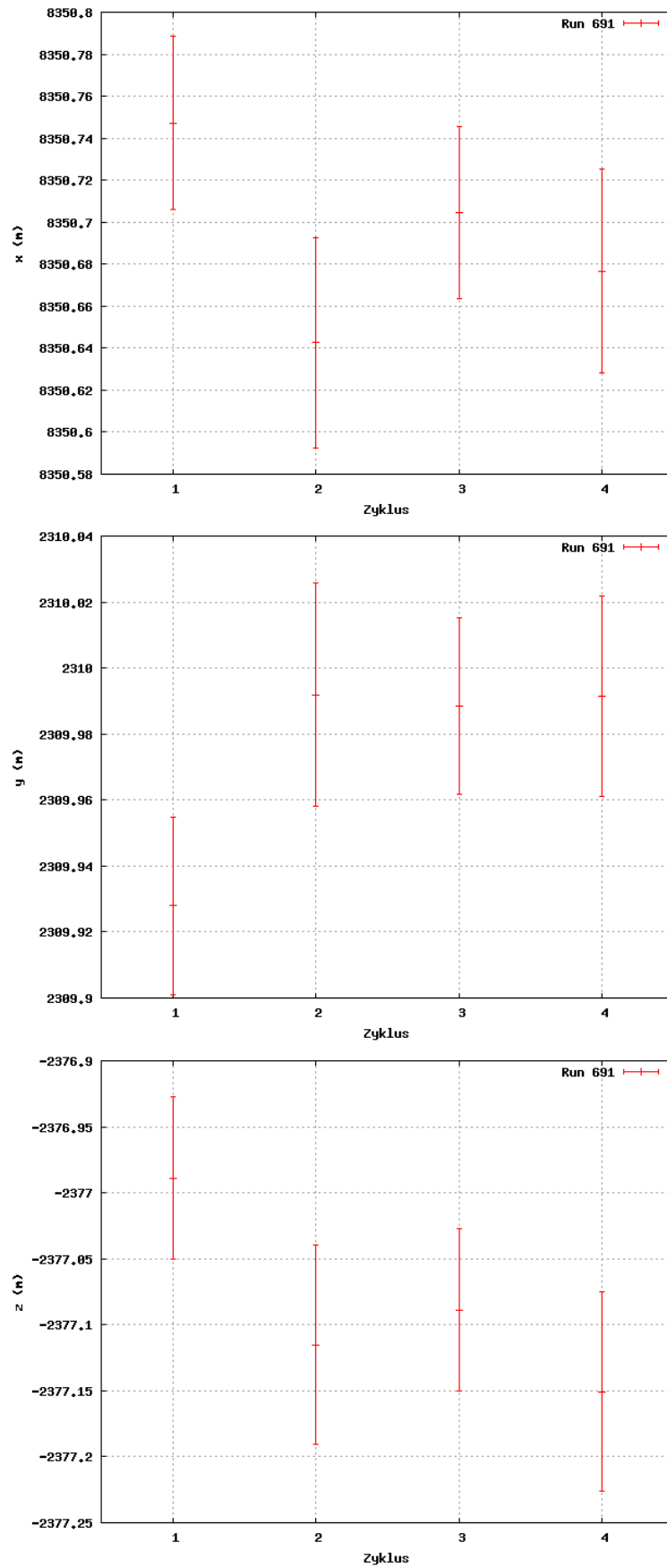


Abbildung A.1: Positionierungsergebnisse Run 691 mit Schwellenwertmethode

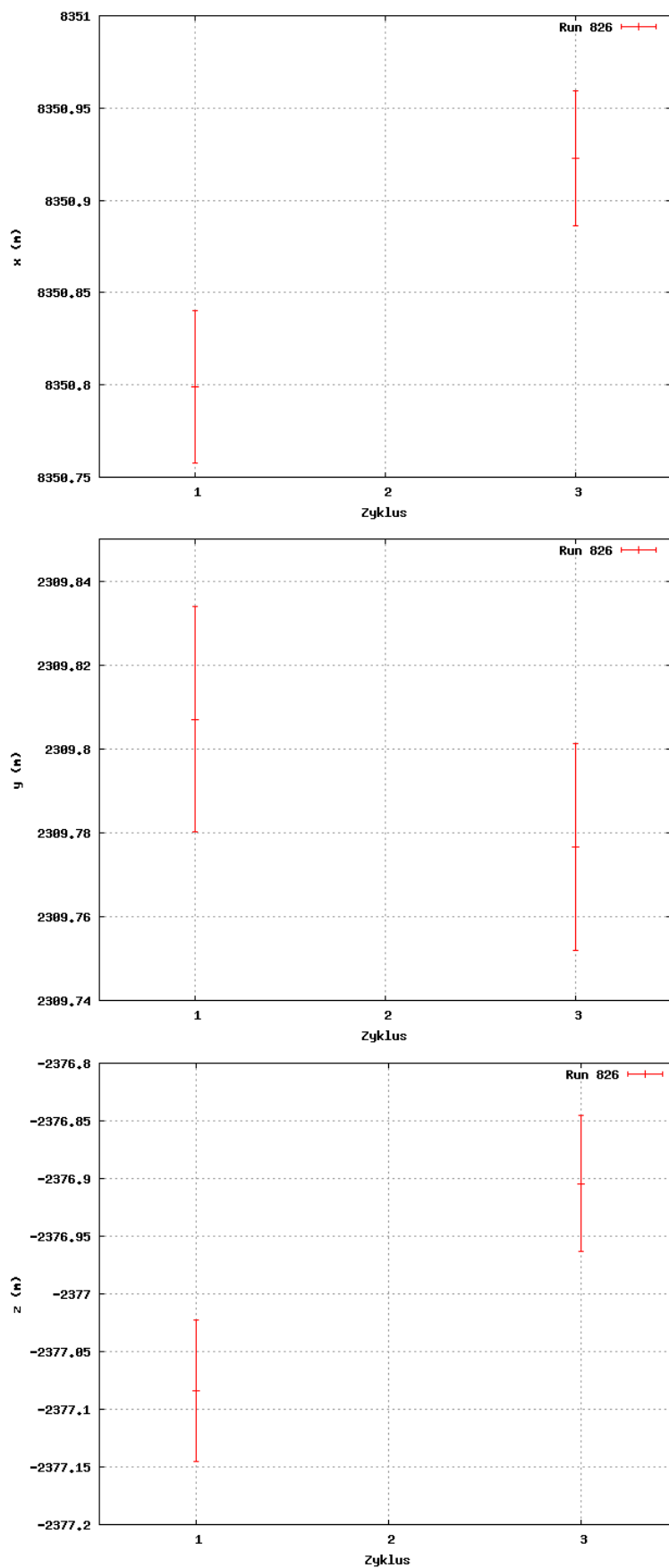


Abbildung A.2: Positionierungsergebnisse Run 826 mit Schwellenwertmethode

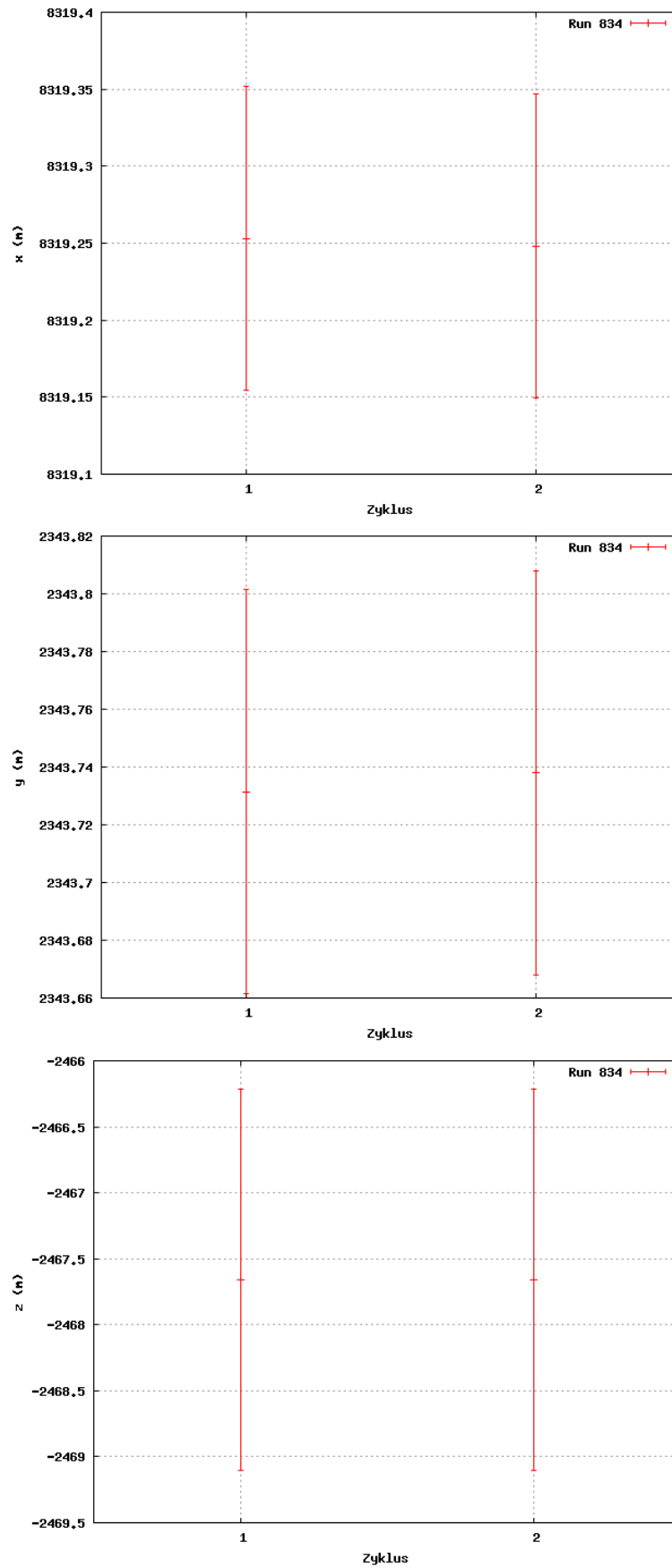


Abbildung A.3: Positionierungsergebnisse Run 834 mit Schwellenwertmethode

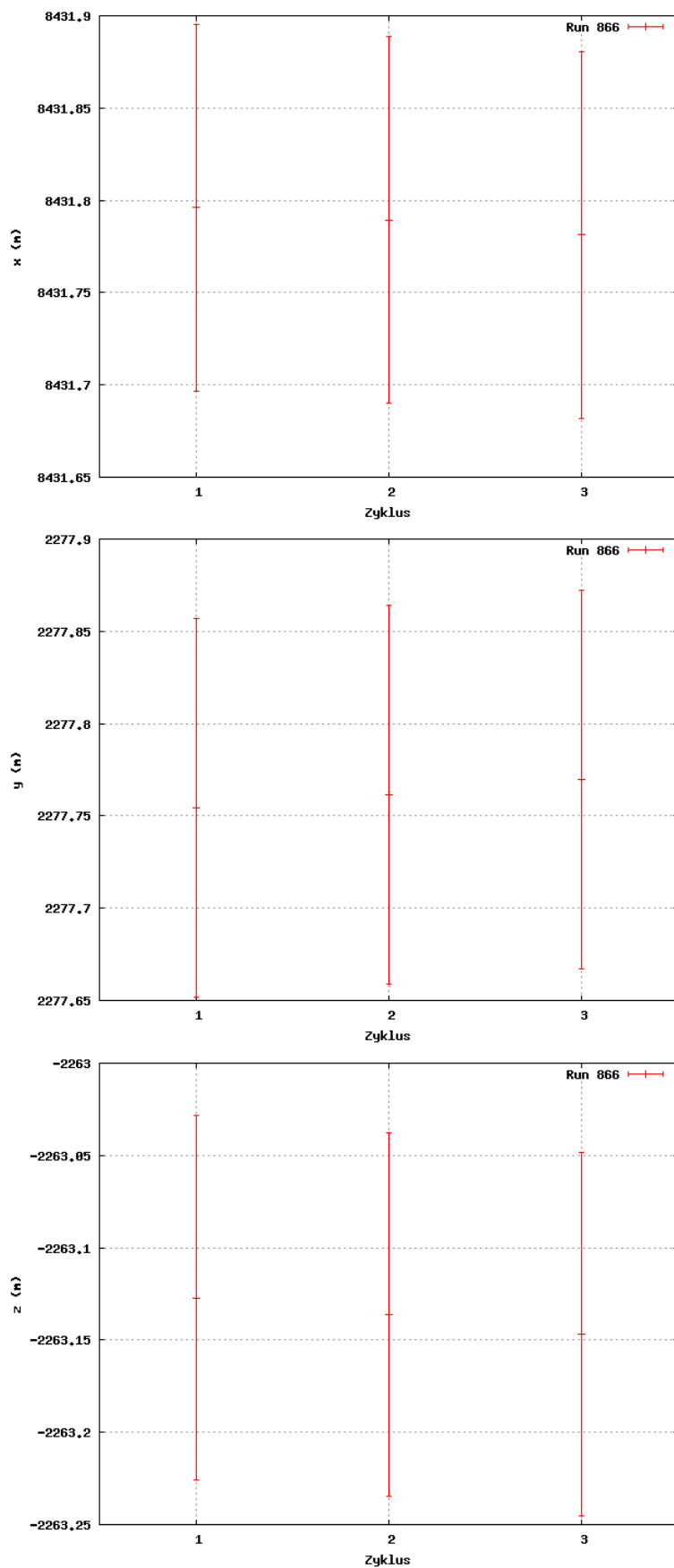


Abbildung A.4: Positionierungsergebnisse Run 866 mit Schwellenwertmethode

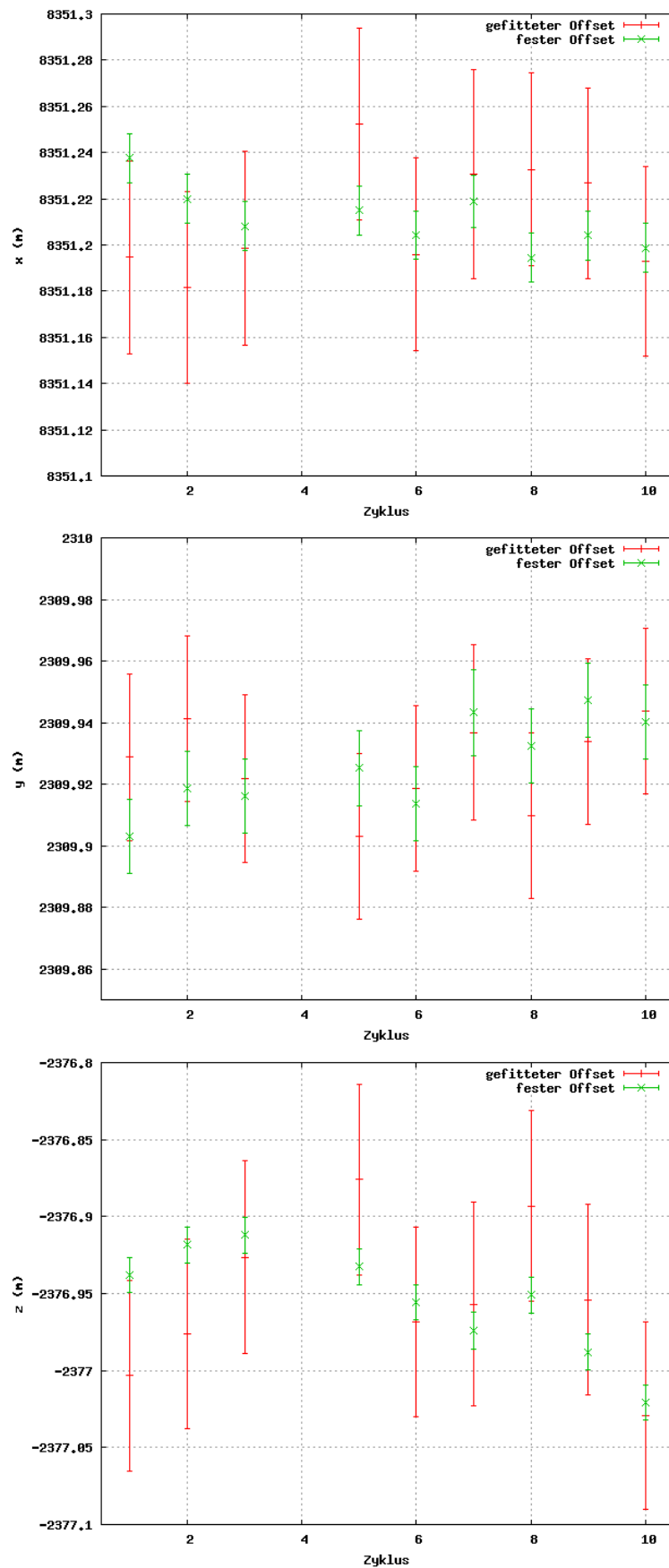


Abbildung A.5: Positionierungsergebnisse Run 896 mit Schwellenwertmethode

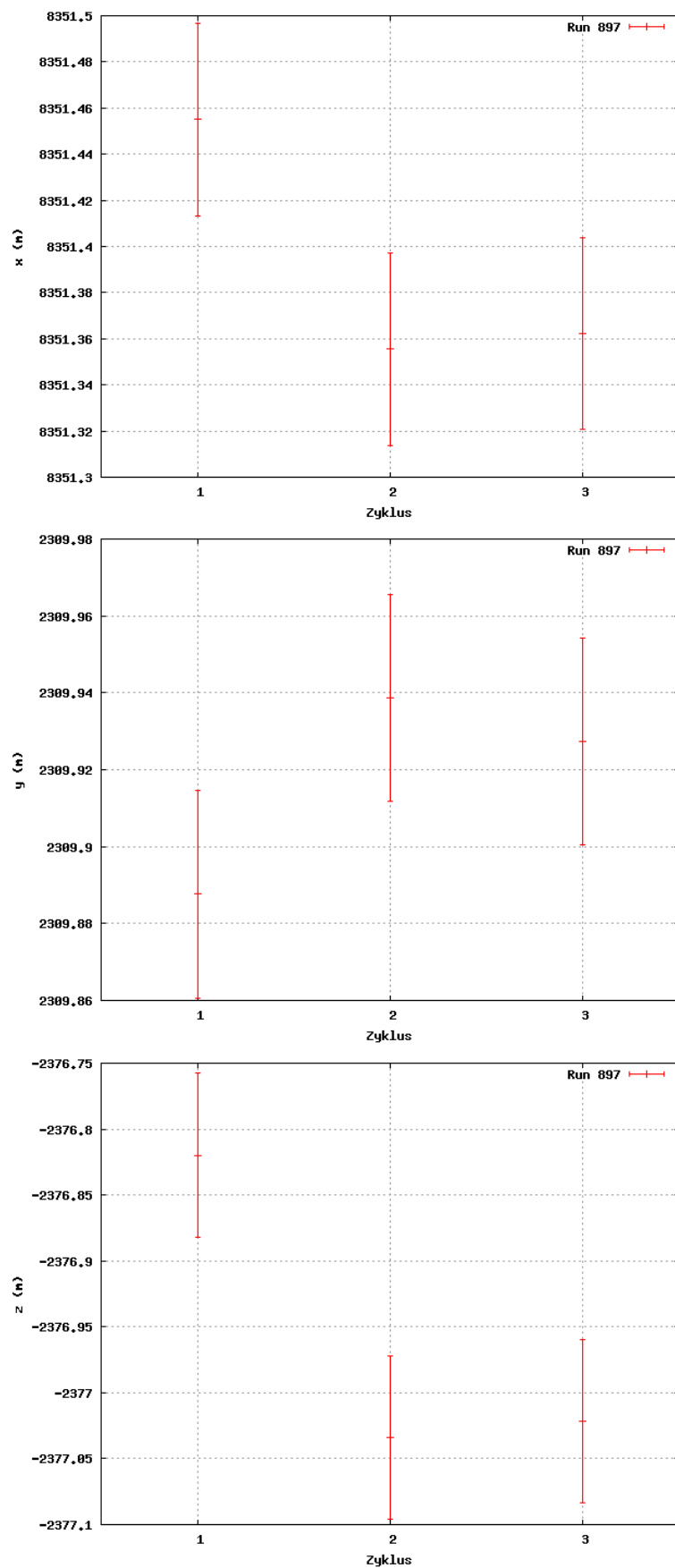


Abbildung A.6: Positionierungsergebnisse Run 897 mit Schwellenwertmethode

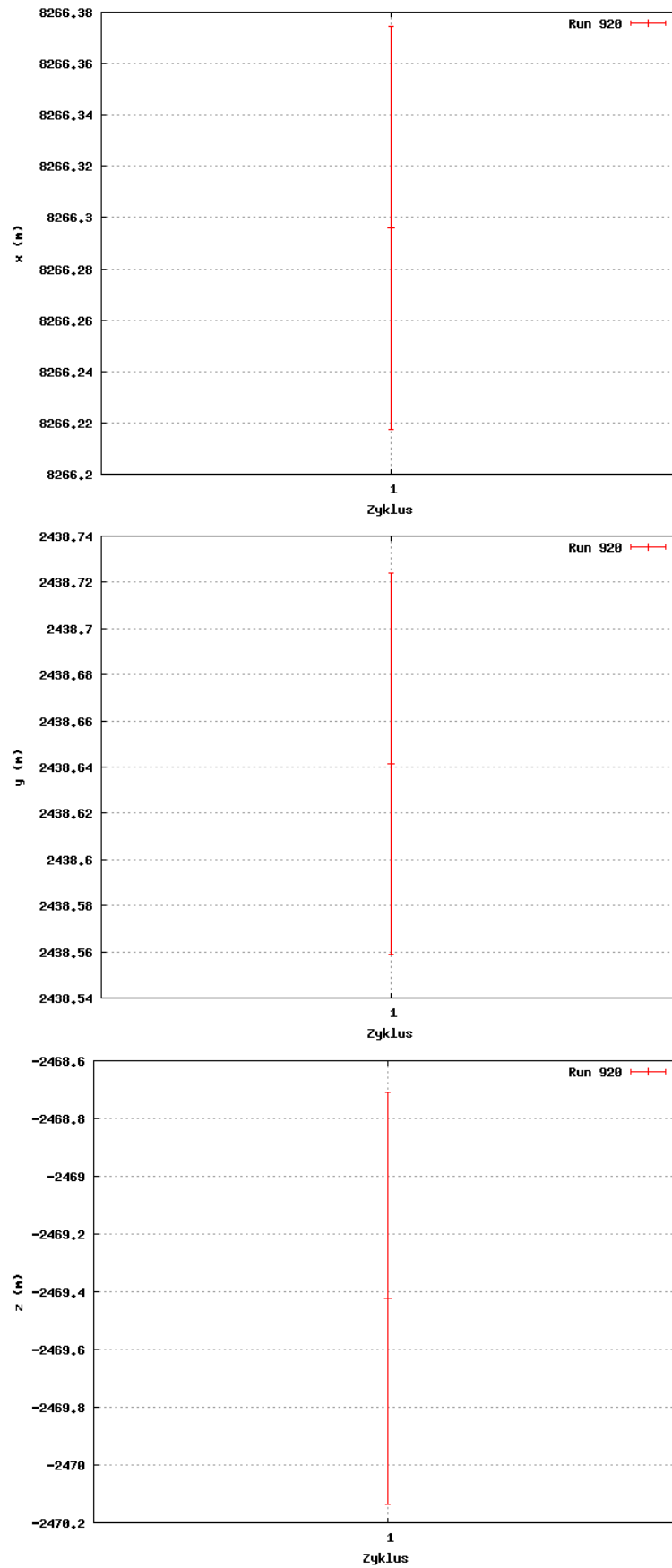


Abbildung A.7: Positionierungsergebnisse Run 920 mit Schwellenwertmethode

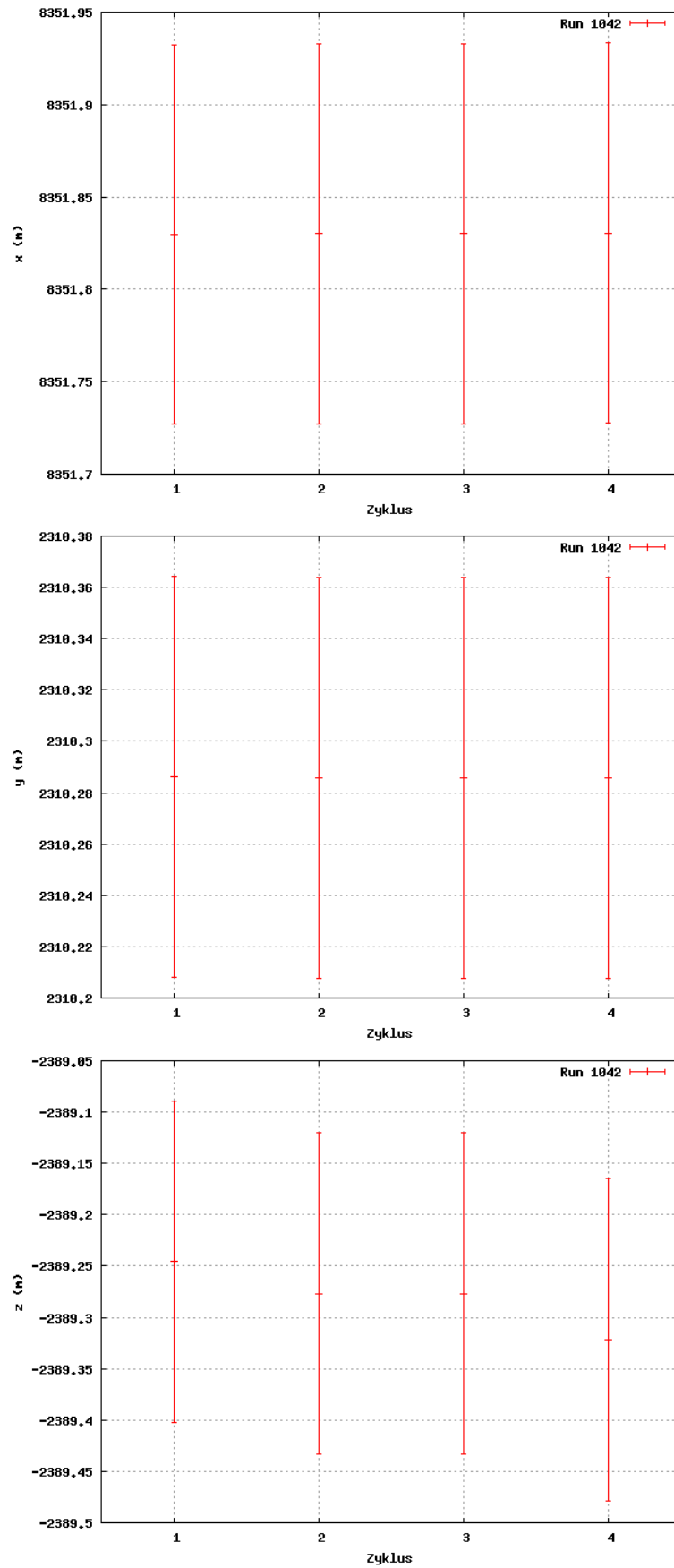


Abbildung A.8: Positionierungsergebnisse Run 1042 mit Schwellenwertmethode

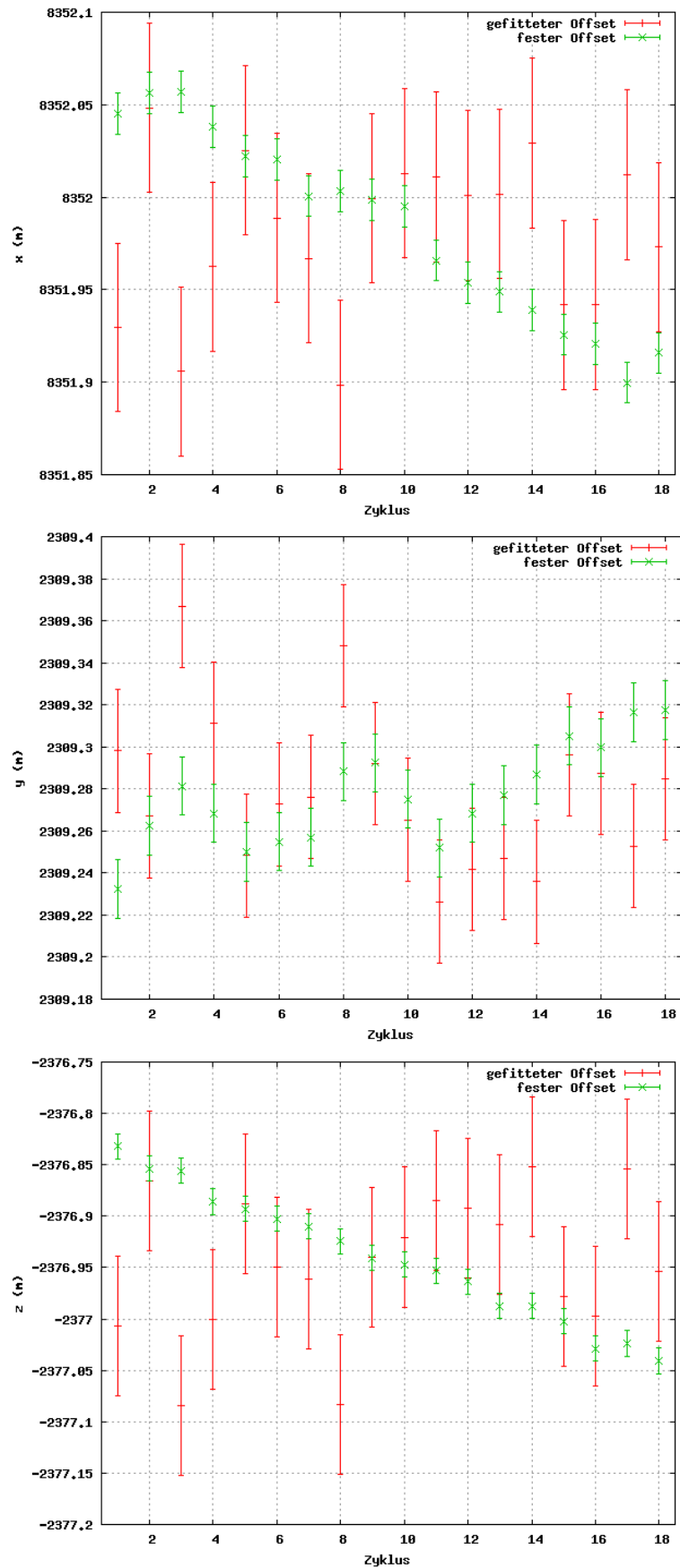


Abbildung A.9: Positionierungsergebnisse Run 1064 mit Schwellenwertmethode

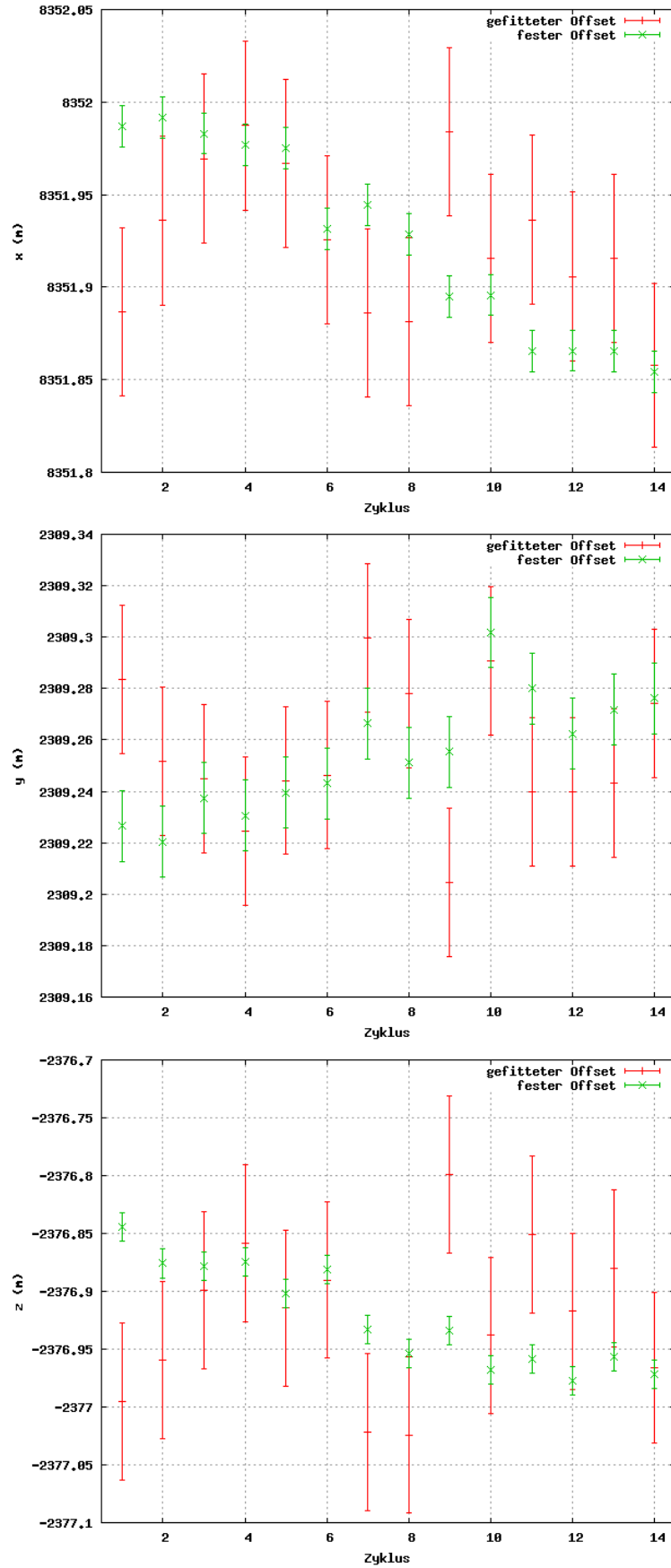


Abbildung A.10: Positionierungsergebnisse Run 1065 mit Schwellenwertmethode

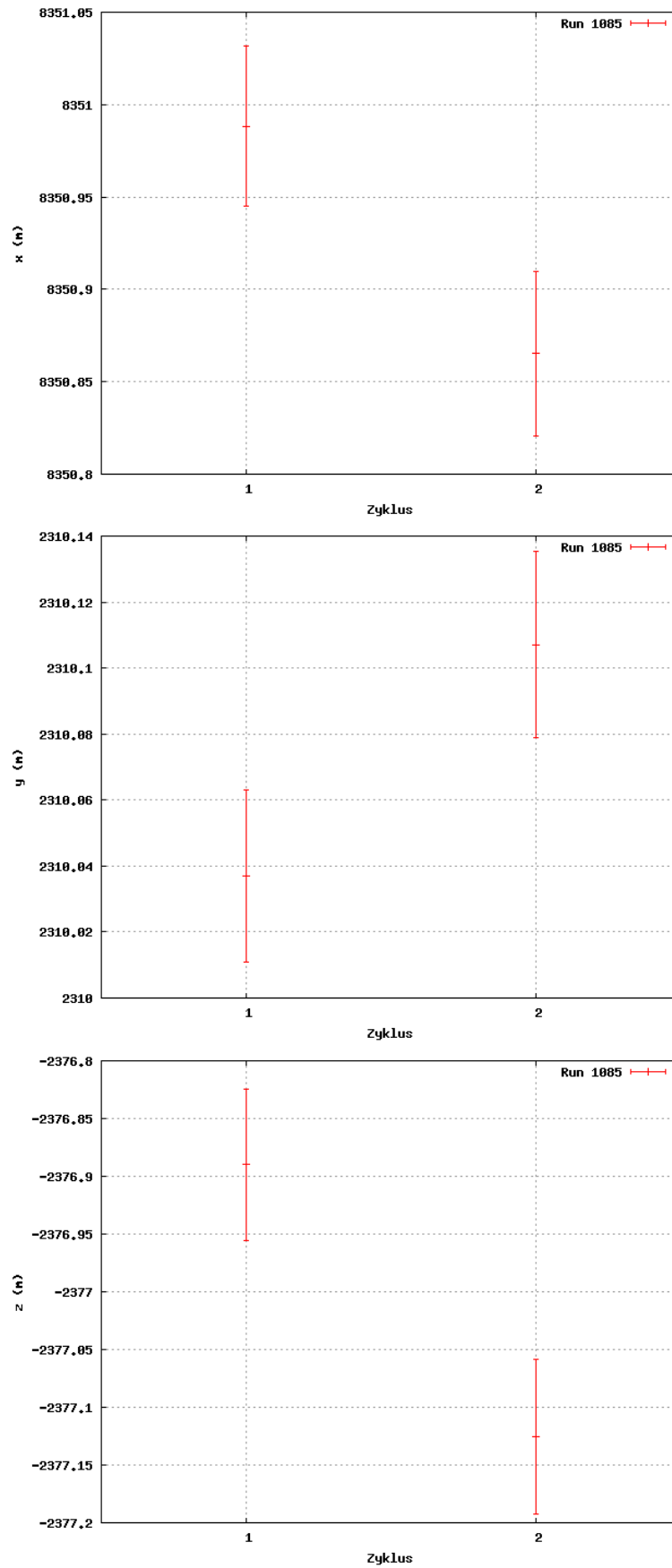


Abbildung A.11: Positionierungsergebnisse Run 1085 mit Schwellenwertmethode

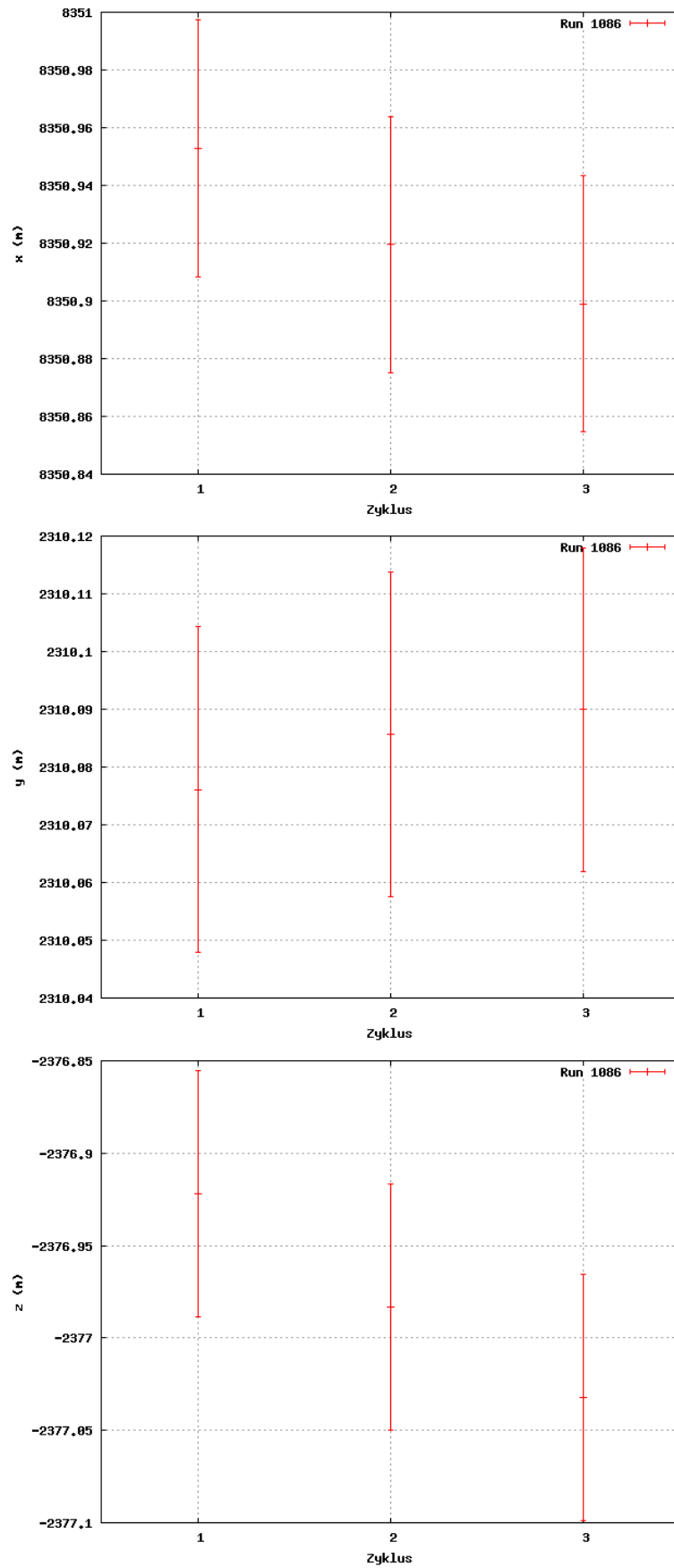


Abbildung A.12: Positionierungsergebnisse Run 1086 mit Schwellenwertmethode

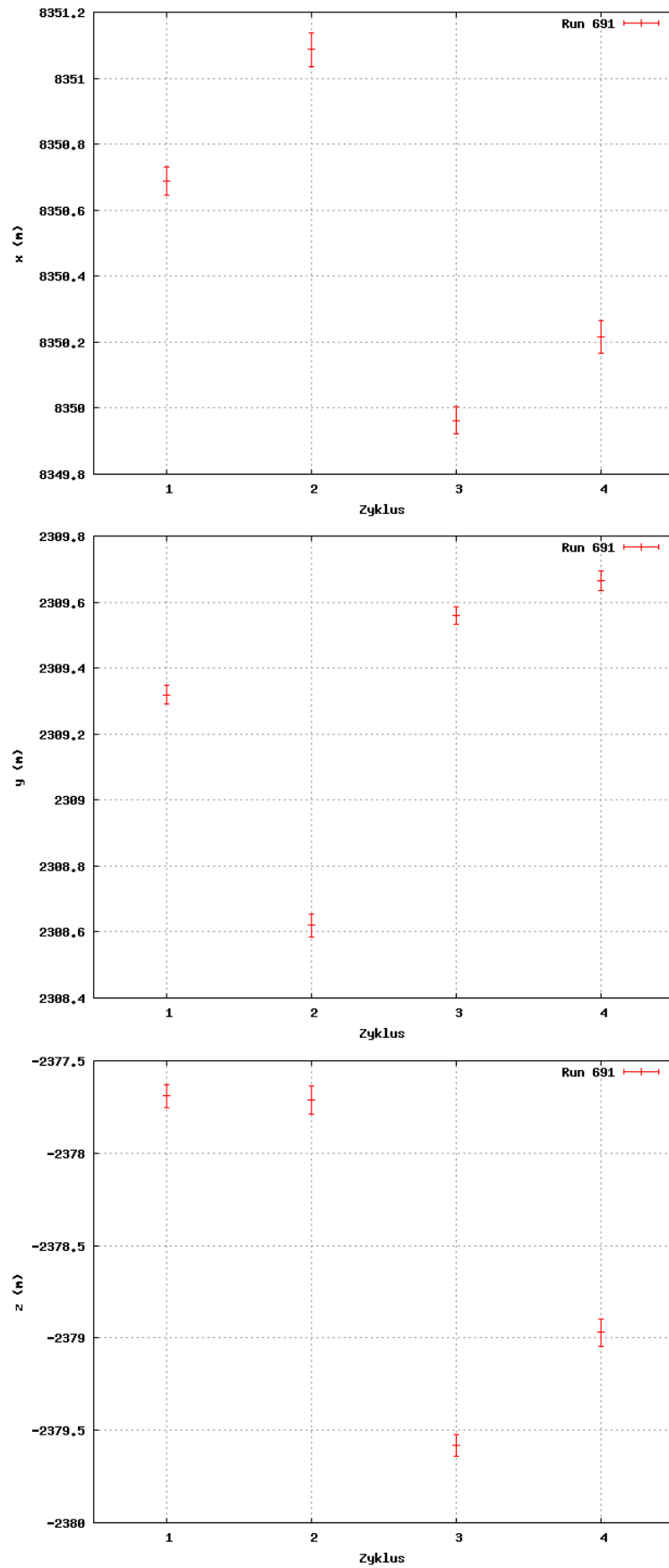


Abbildung A.13: Positionierungsergebnisse Run 691 mit Kreuzkorrelation

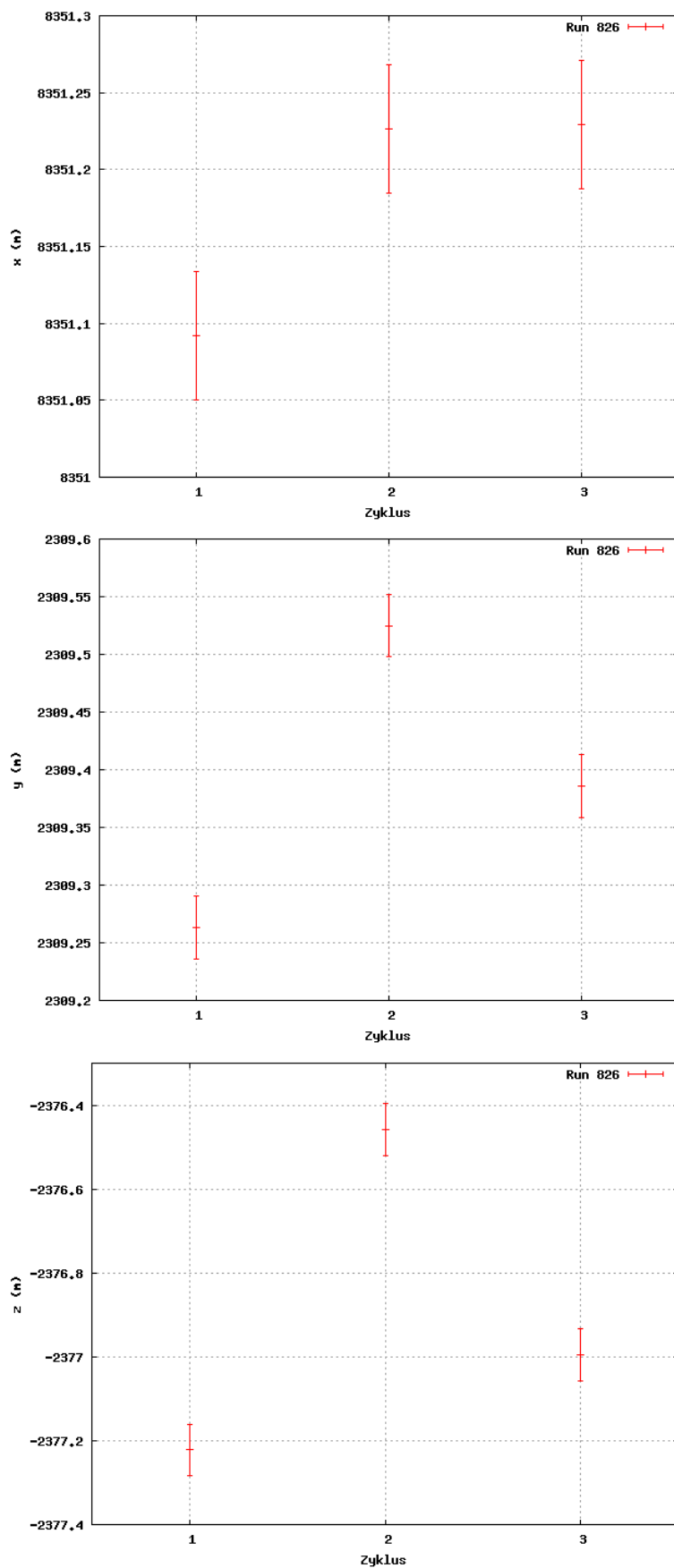


Abbildung A.14: Positionierungsergebnisse Run 826 mit Kreuzkorrelation

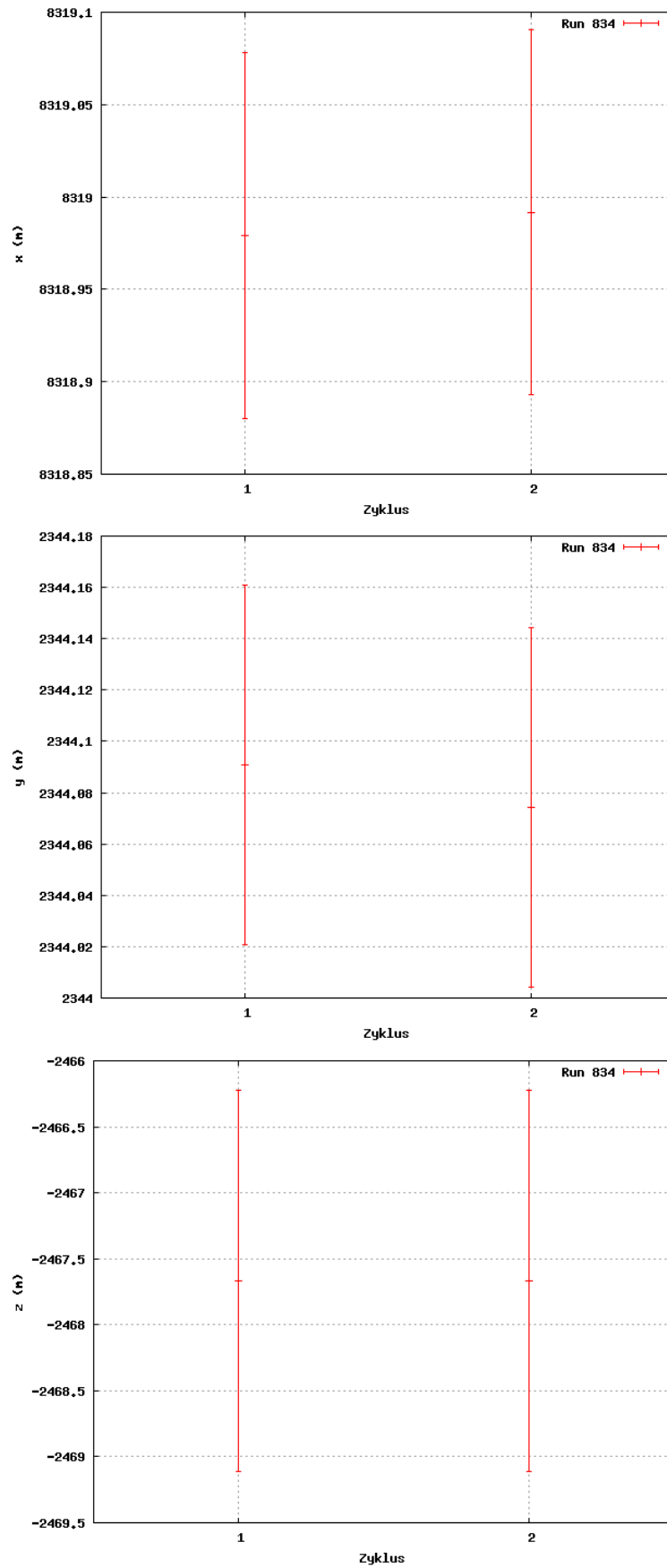


Abbildung A.15: Positionierungsergebnisse Run 834 mit Kreuzkorrelation

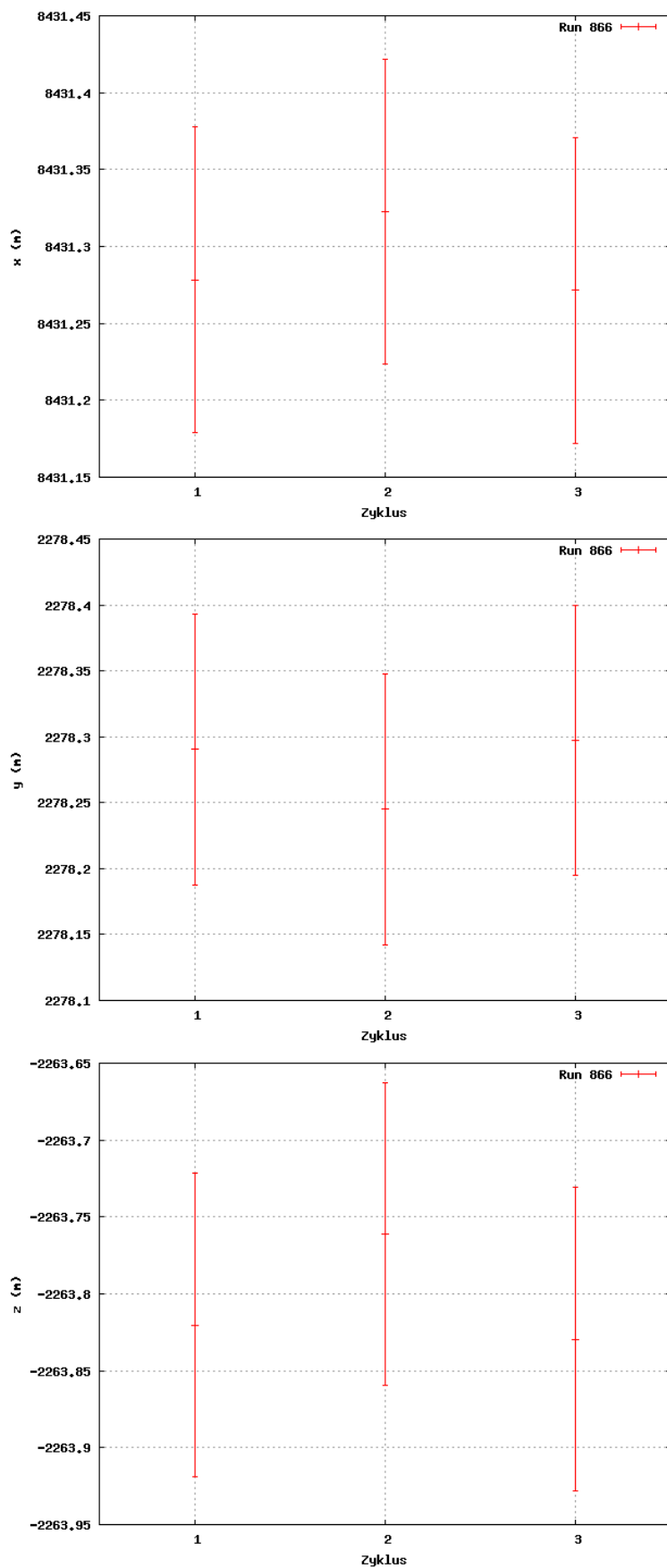


Abbildung A.16: Positionierungsergebnisse Run 866 mit Kreuzkorrelation

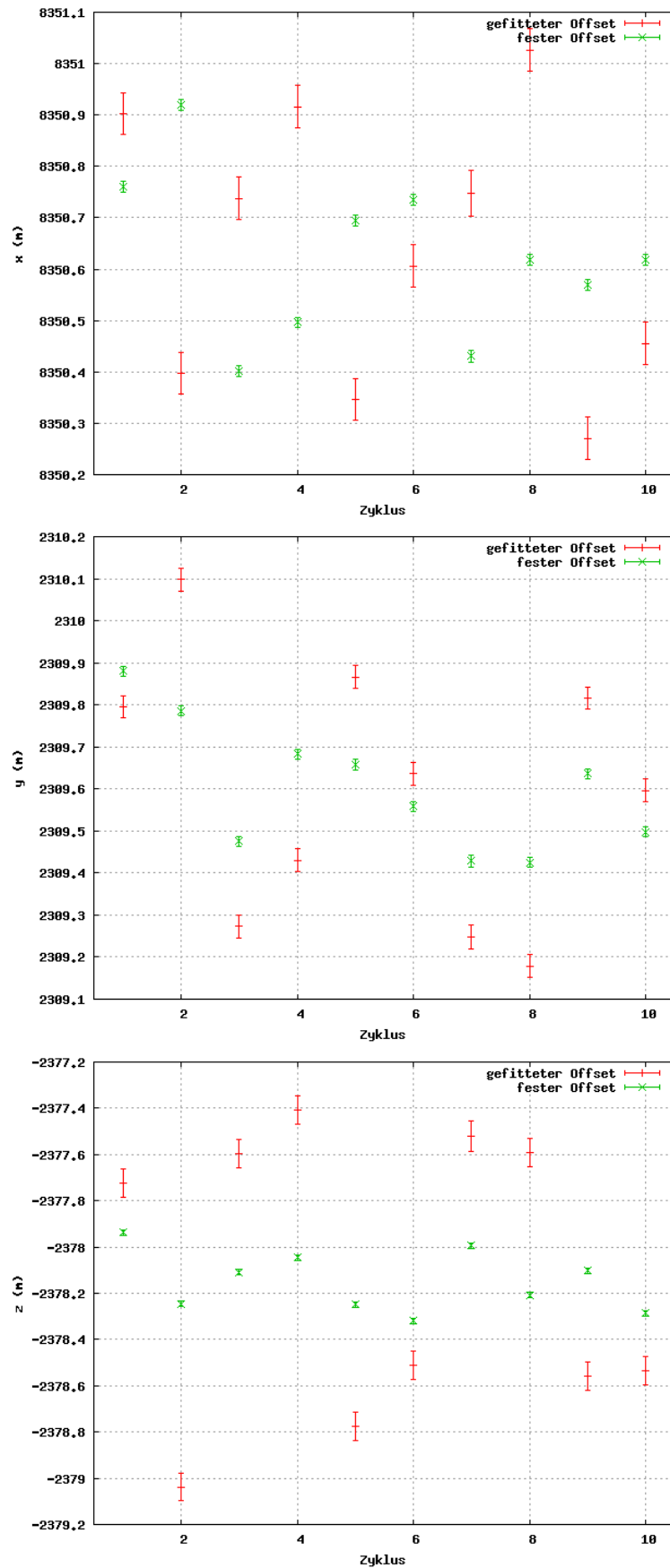


Abbildung A.17: Positionierungsergebnisse Run 896 mit Kreuzkorrelation

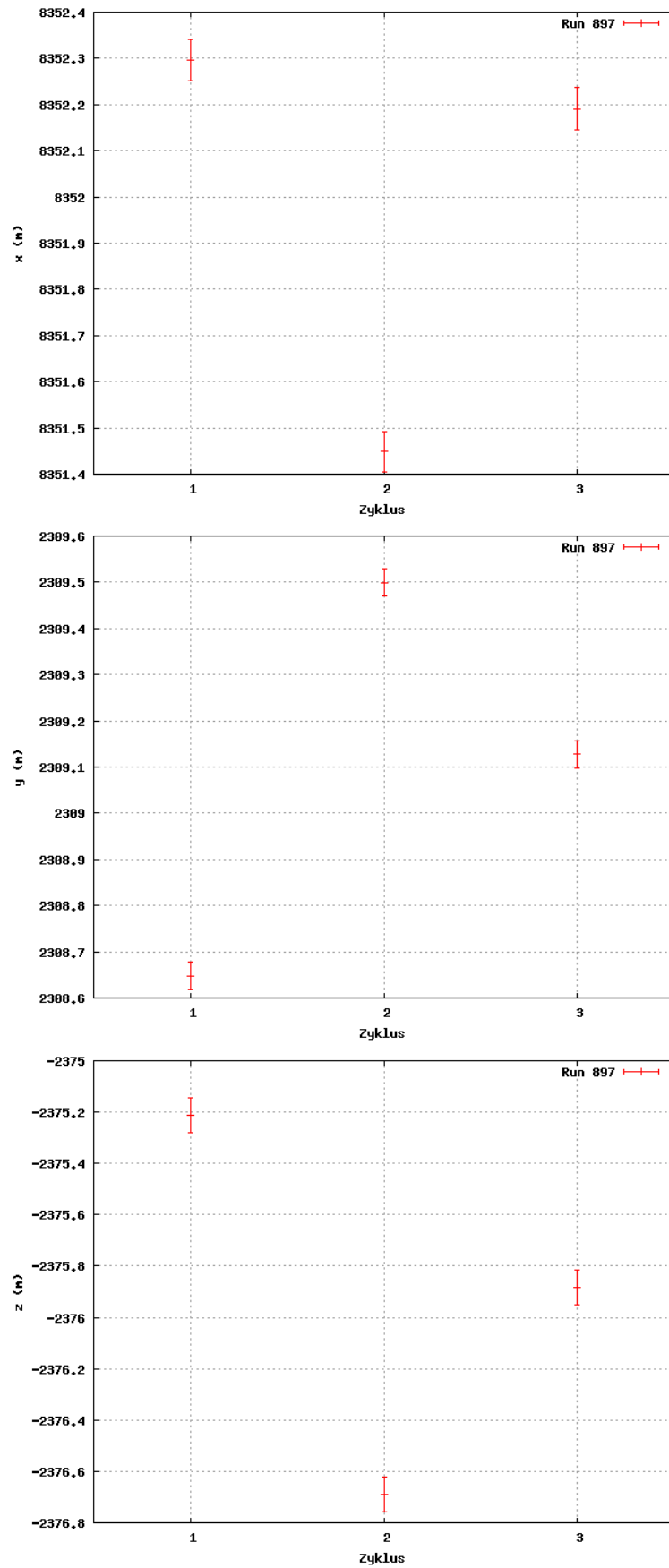


Abbildung A.18: Positionierungsergebnisse Run 897 mit Kreuzkorrelation

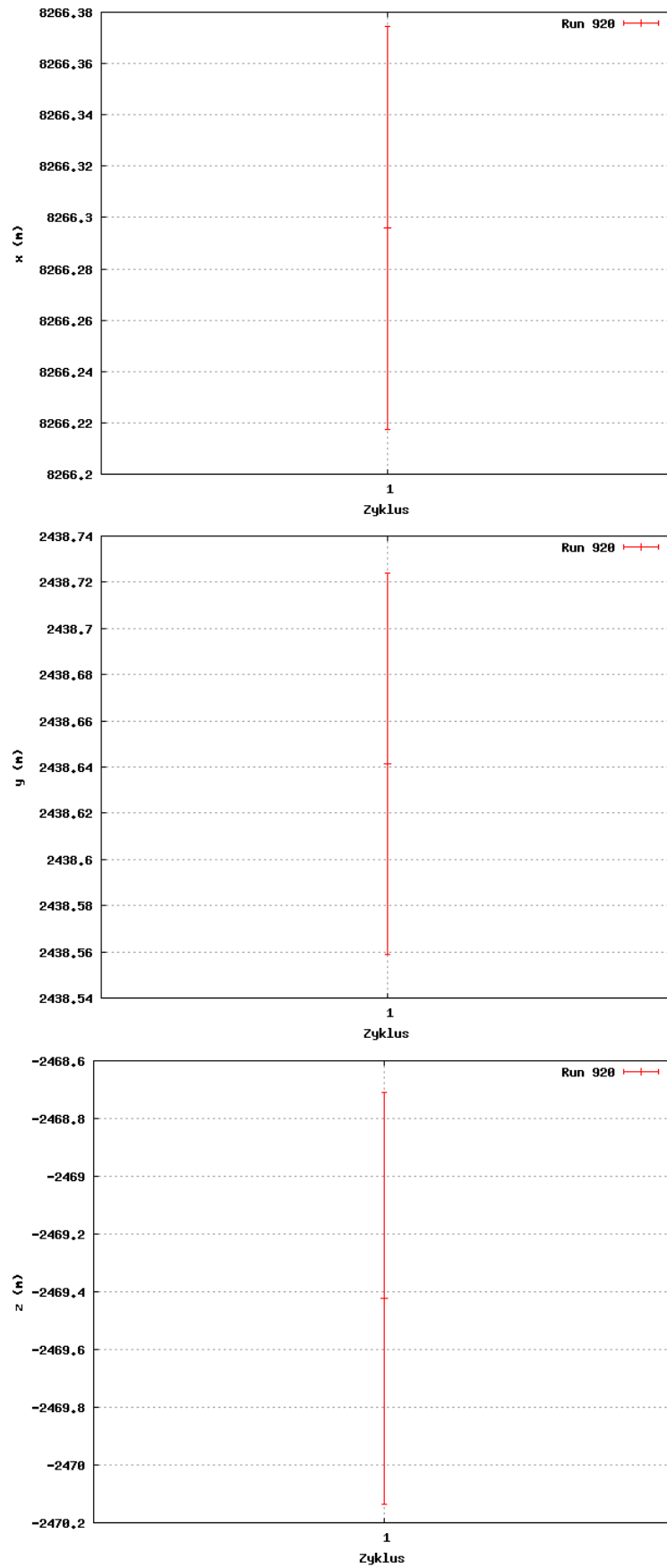


Abbildung A.19: Positionierungsergebnisse Run 920 mit Kreuzkorrelation

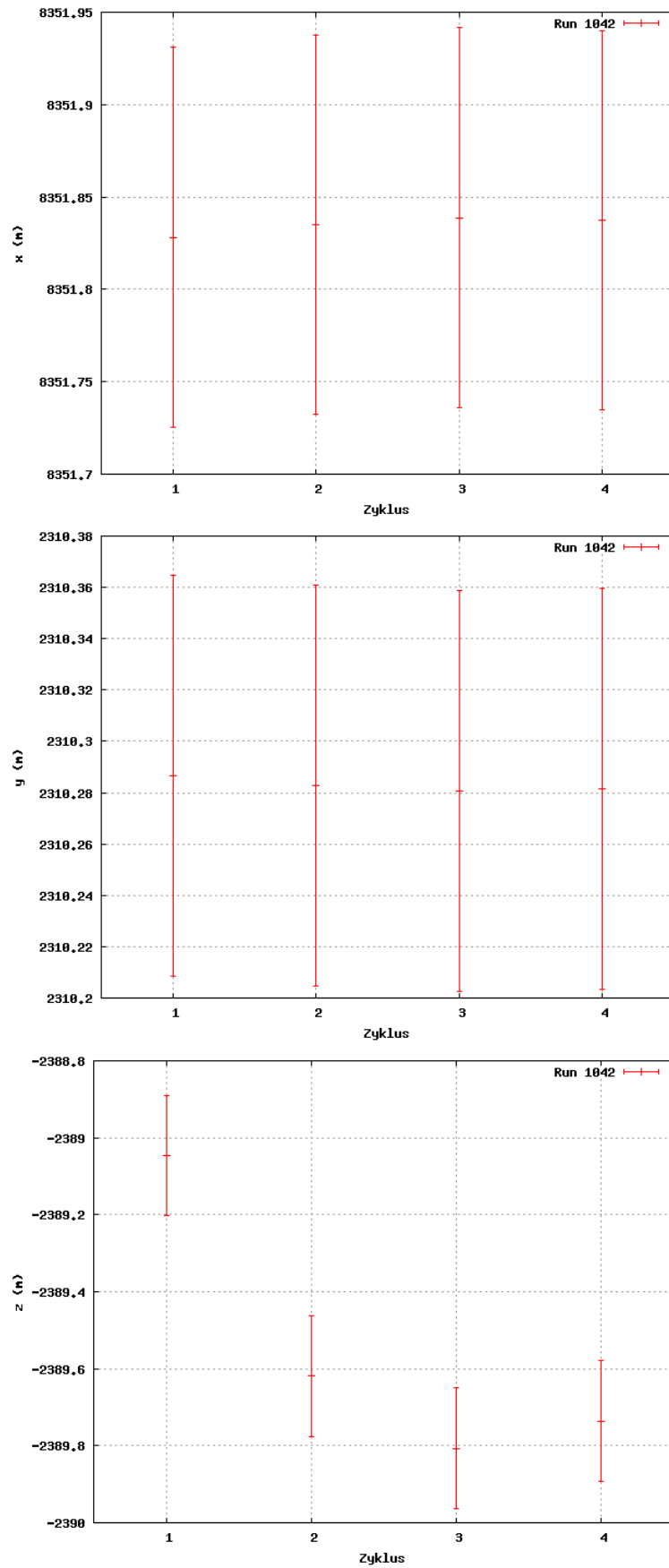


Abbildung A.20: Positionierungsergebnisse Run 1042 mit Kreuzkorrelation

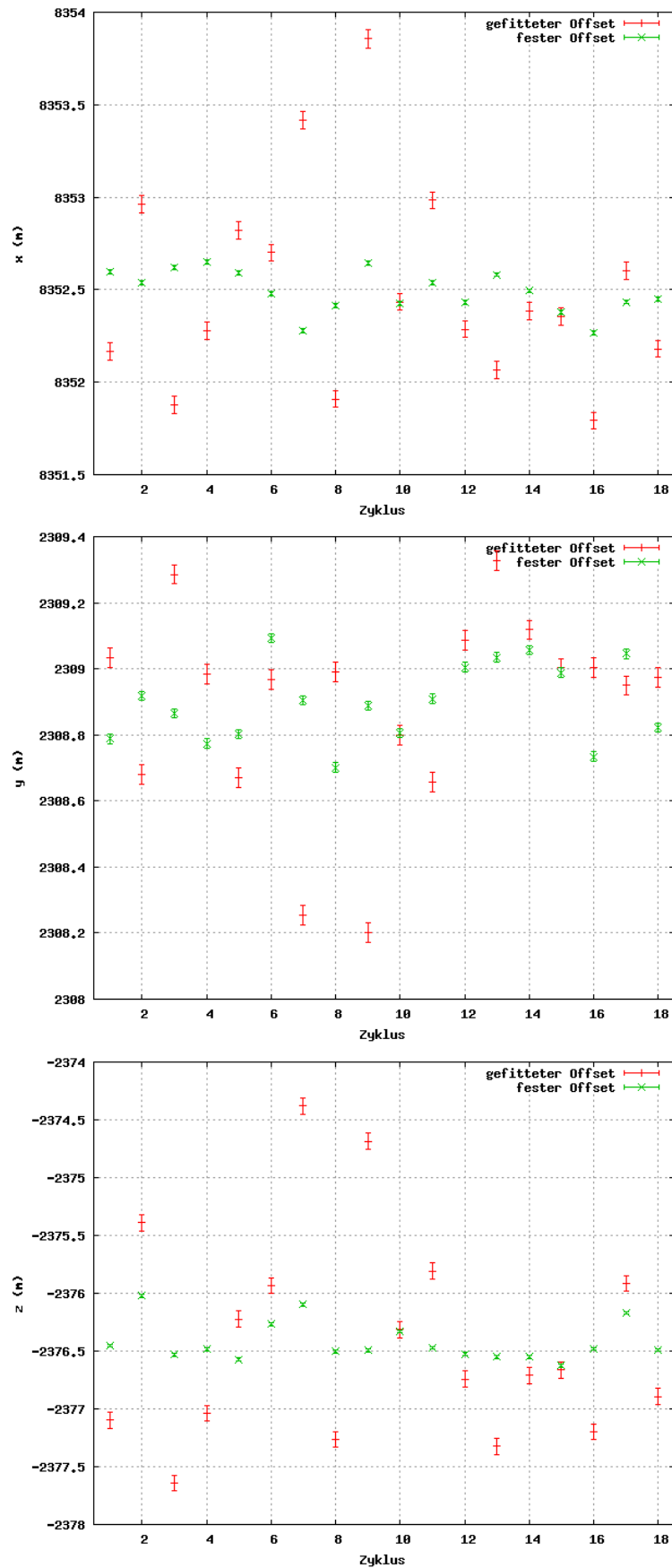


Abbildung A.21: Positionierungsergebnisse Run 1064 mit Kreuzkorrelation

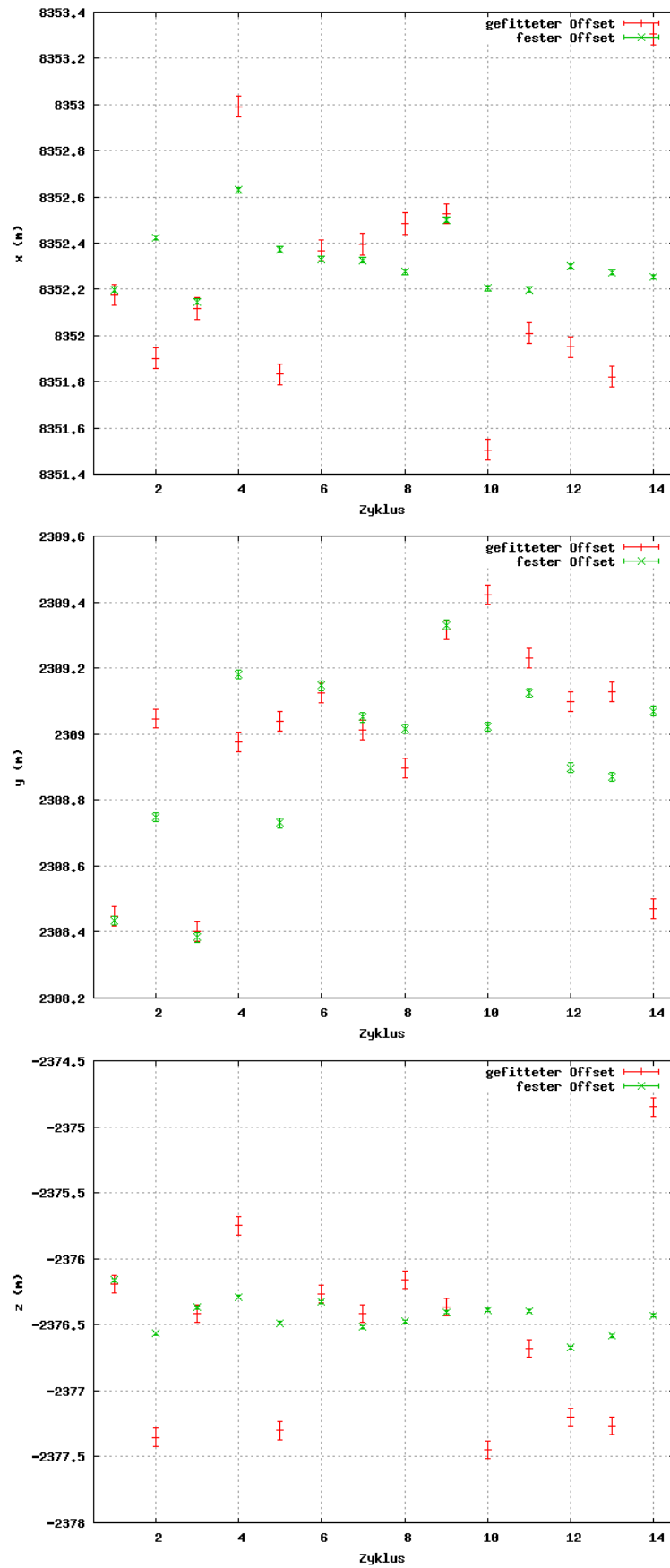


Abbildung A.22: Positionierungsergebnisse Run 1065 mit Kreuzkorrelation

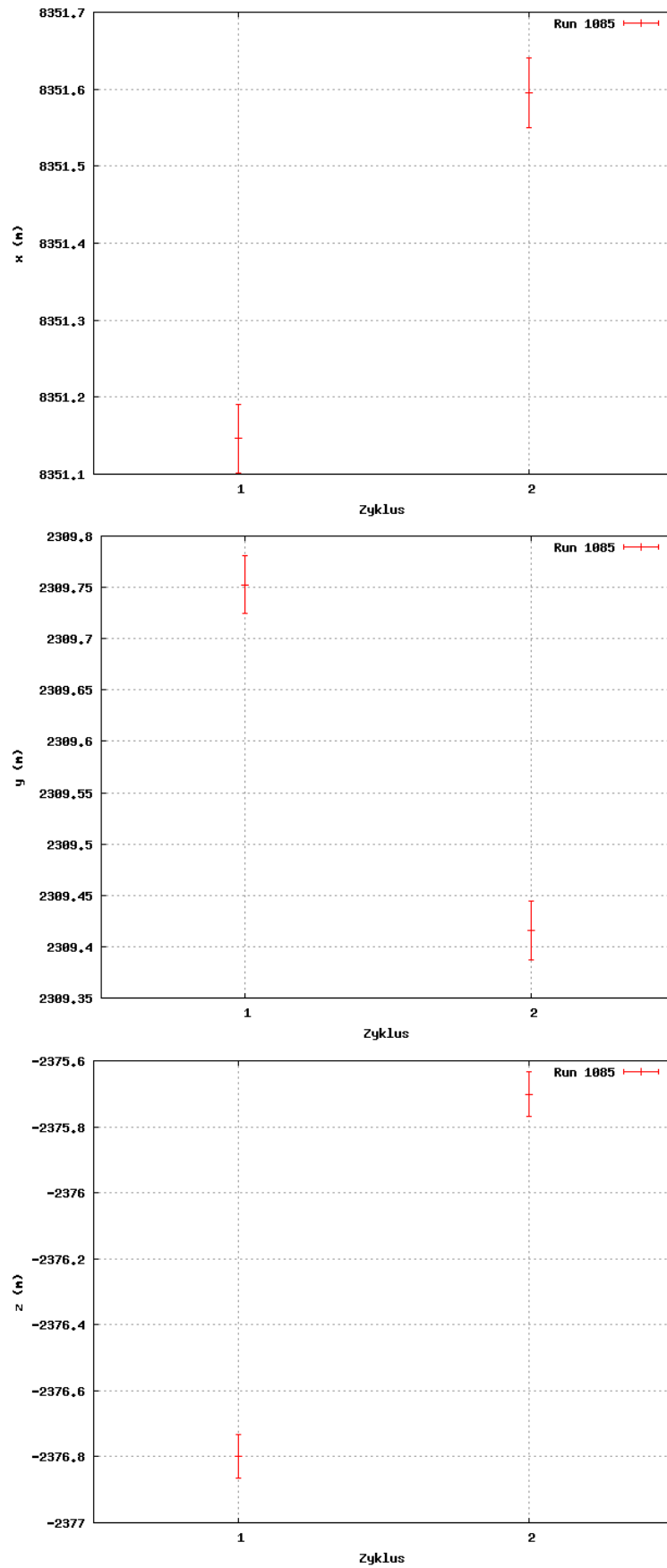


Abbildung A.23: Positionierungsergebnisse Run 1085 mit Kreuzkorrelation

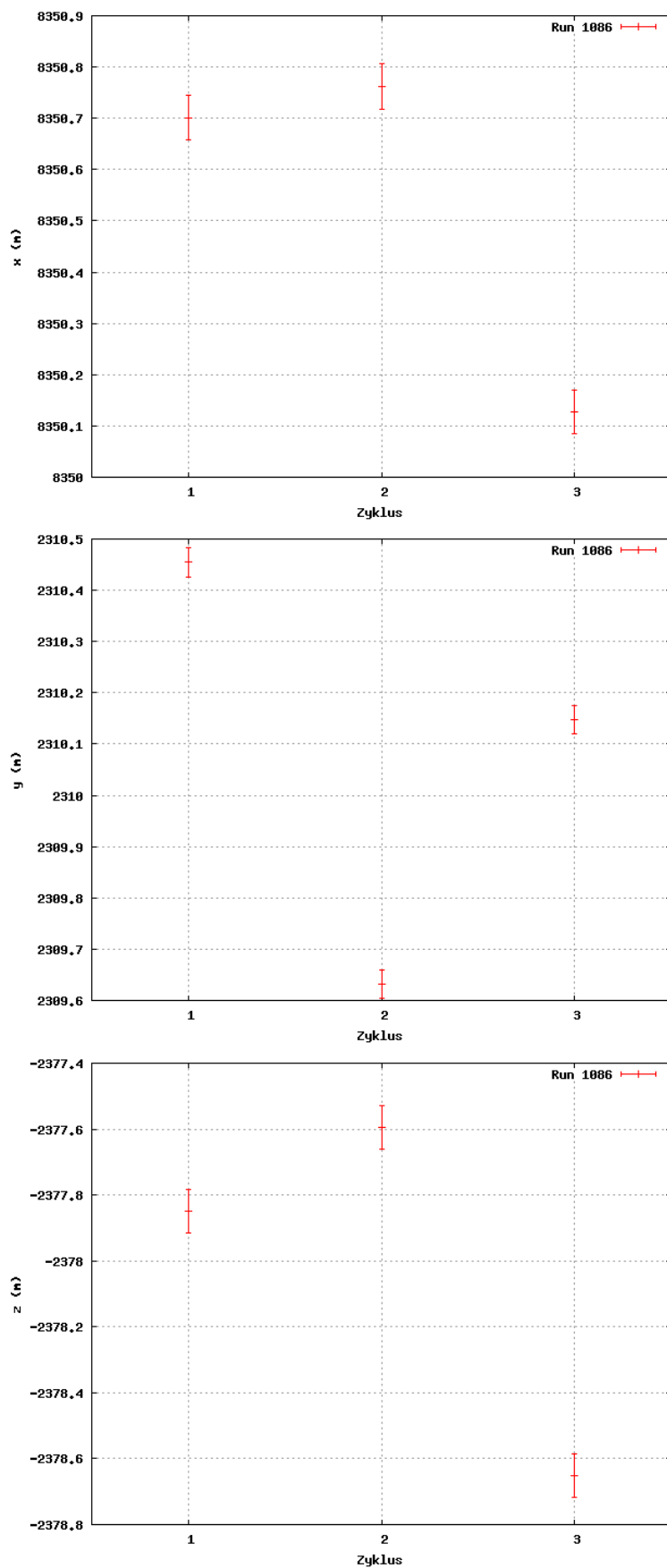


Abbildung A.24: Positionierungsergebnisse Run 1086 mit Kreuzkorrelation

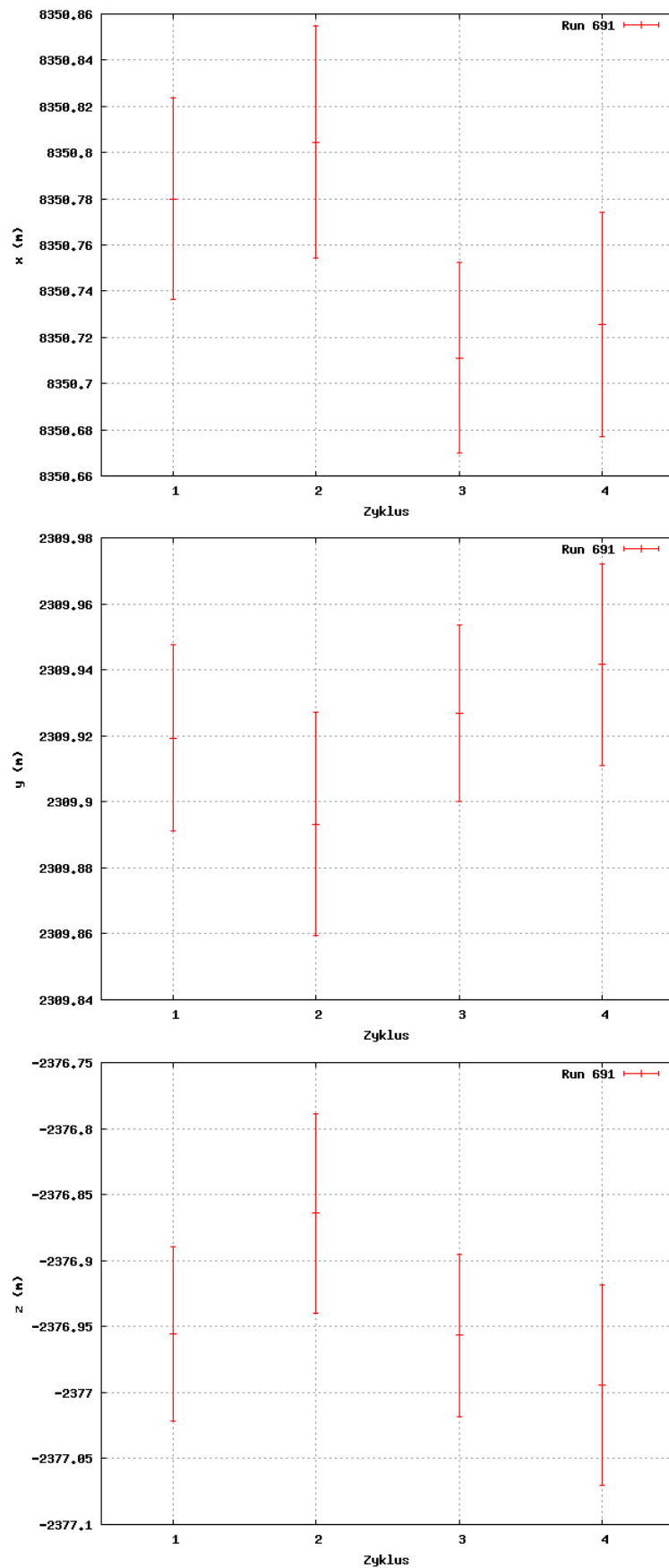


Abbildung A.25: Positionierungsergebnisse Run 691 mit Hilbert-Transformation

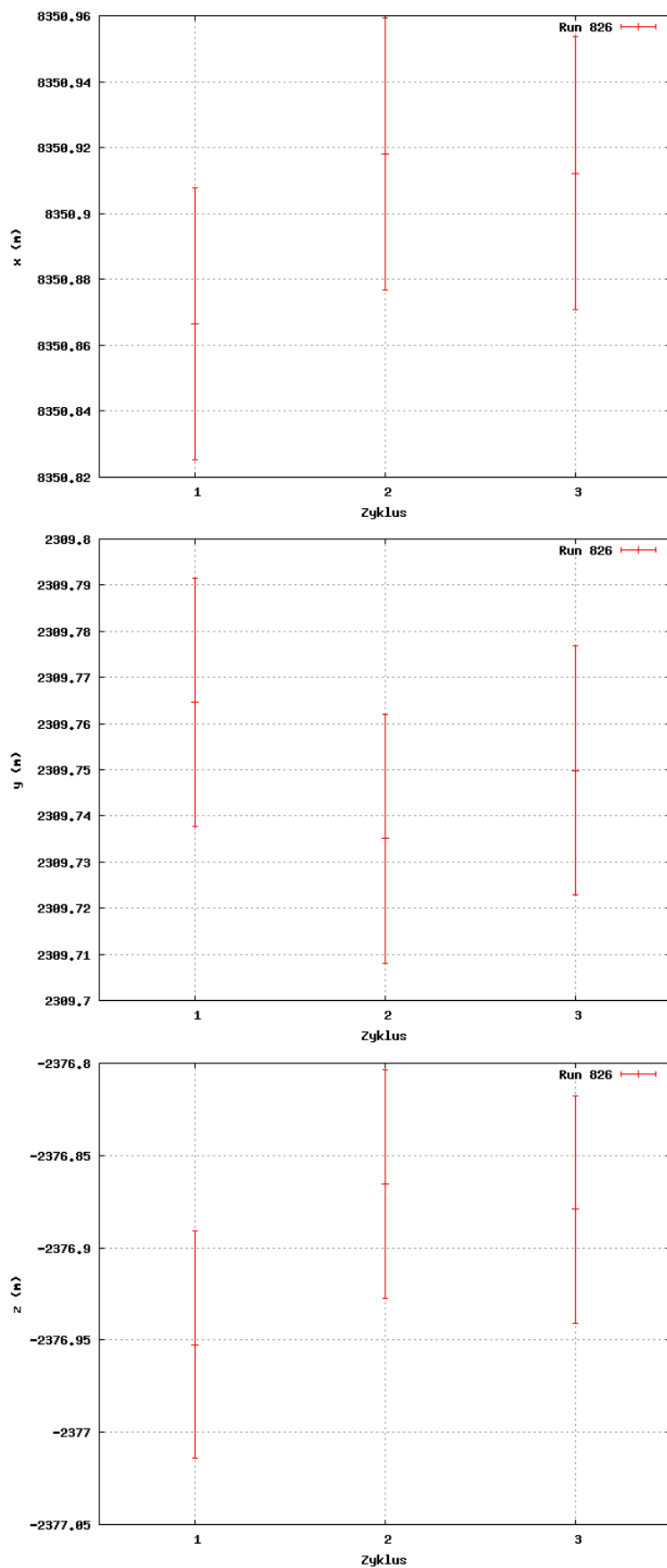


Abbildung A.26: Positionierungsergebnisse Run 826 mit Hilbert-Transformation

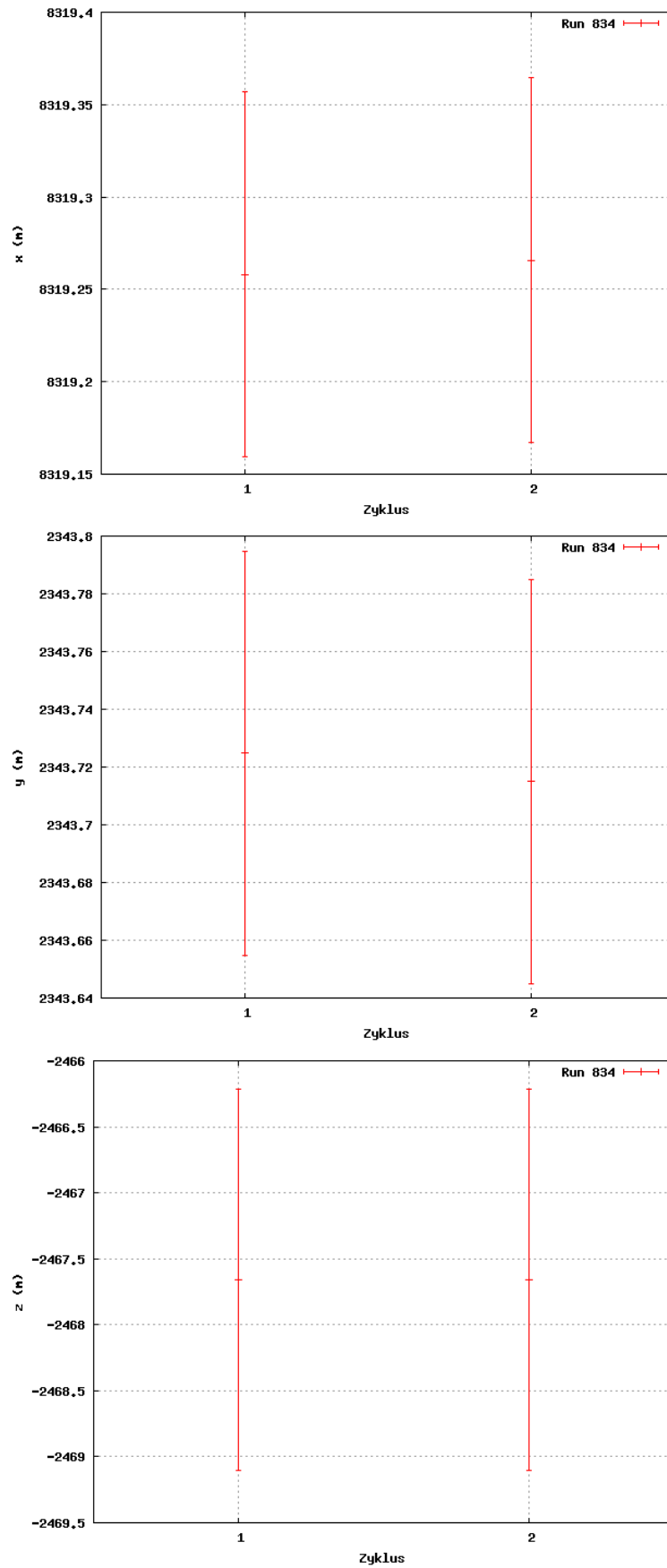


Abbildung A.27: Positionierungsergebnisse Run 834 mit Hilbert-Transformation

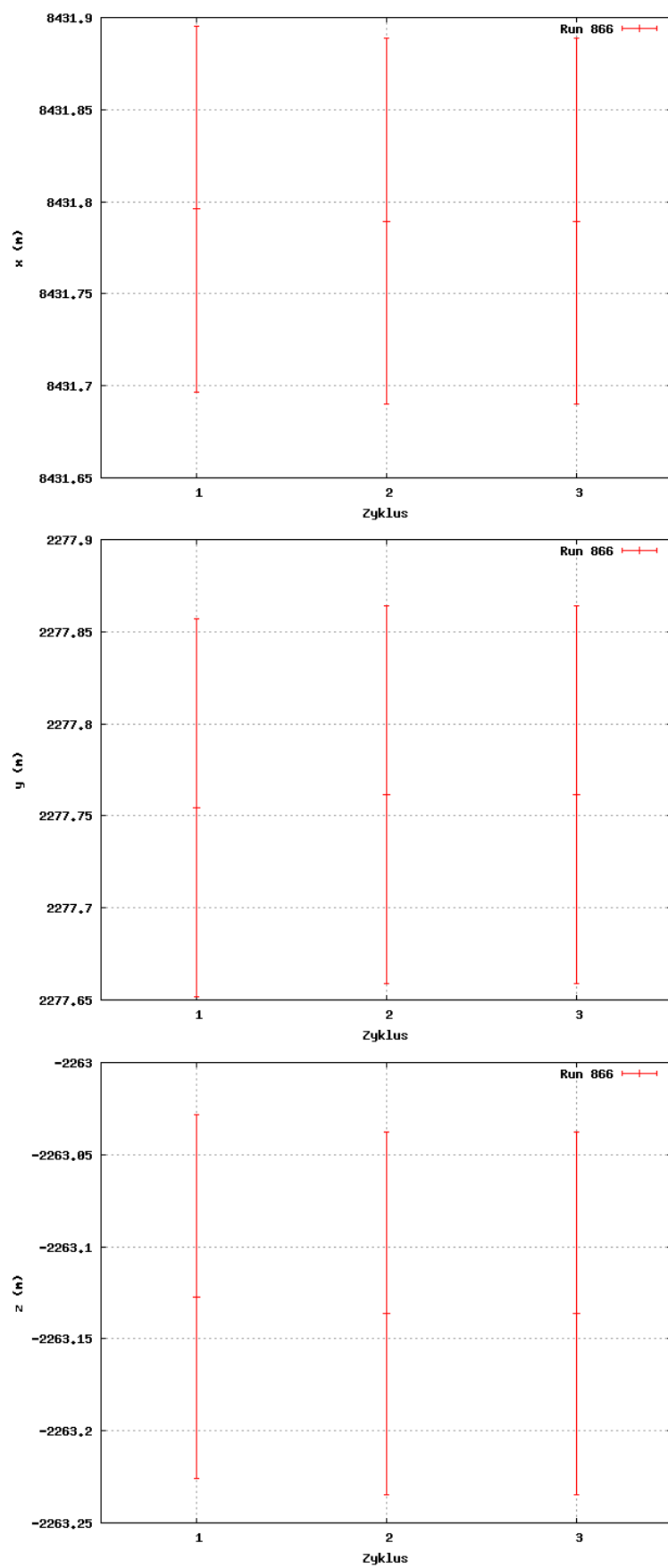


Abbildung A.28: Positionierungsergebnisse Run 866 mit Hilbert-Transformation

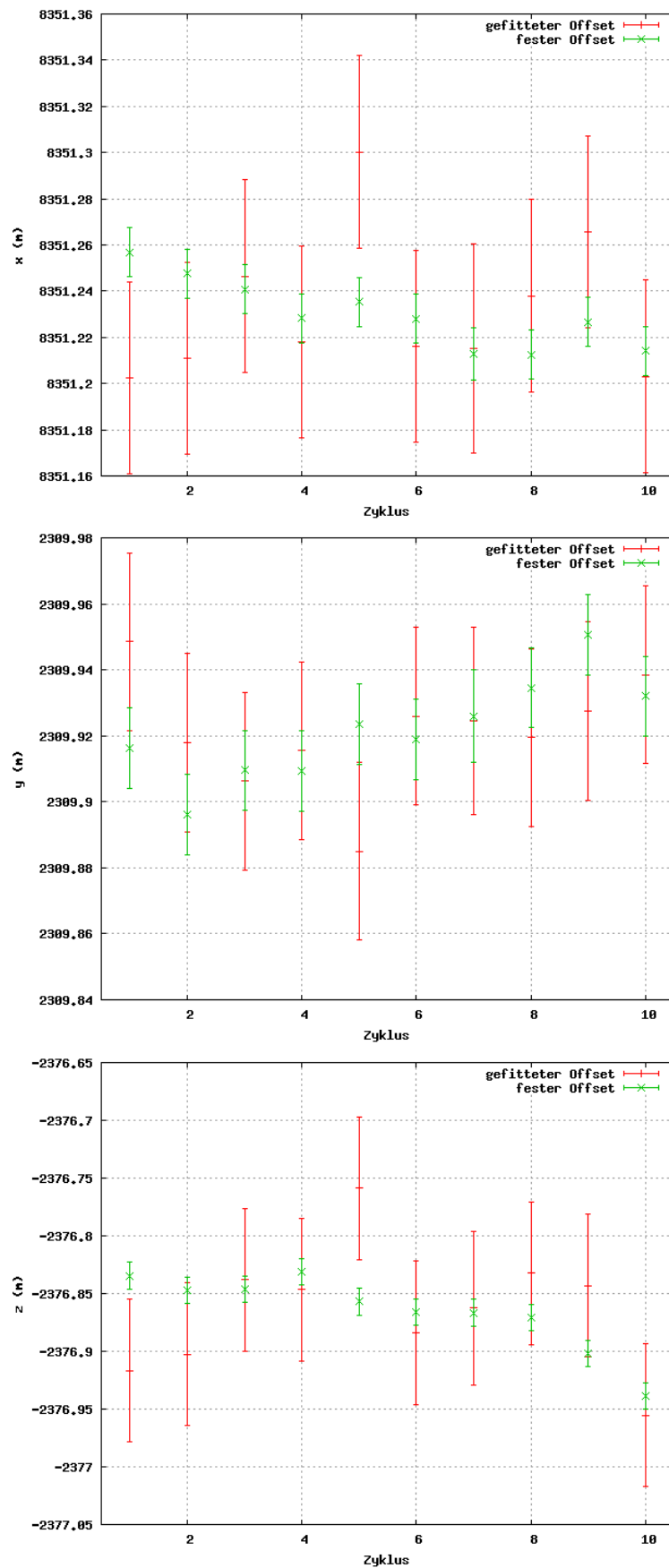


Abbildung A.29: Positionierungsergebnisse Run 896 mit Hilbert-Transformation

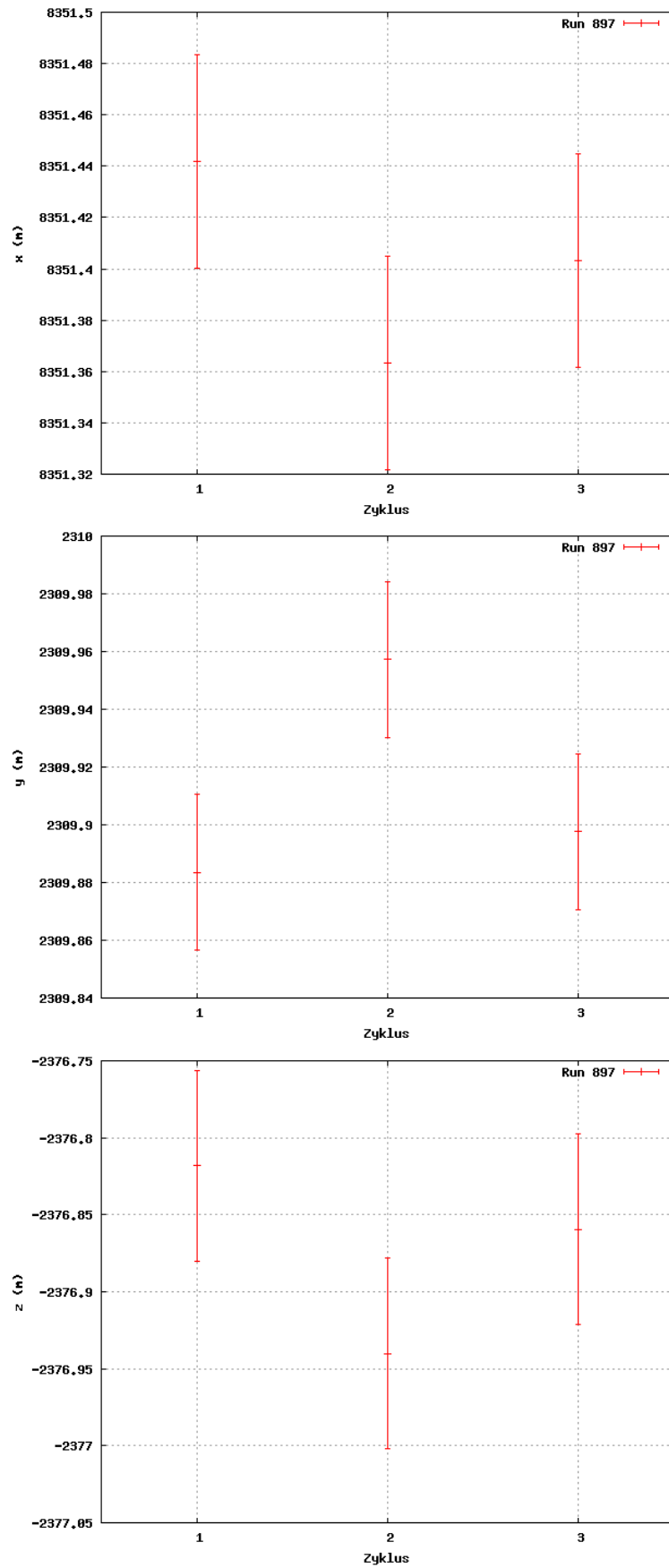


Abbildung A.30: Positionierungsergebnisse Run 897 mit Hilbert-Transformation

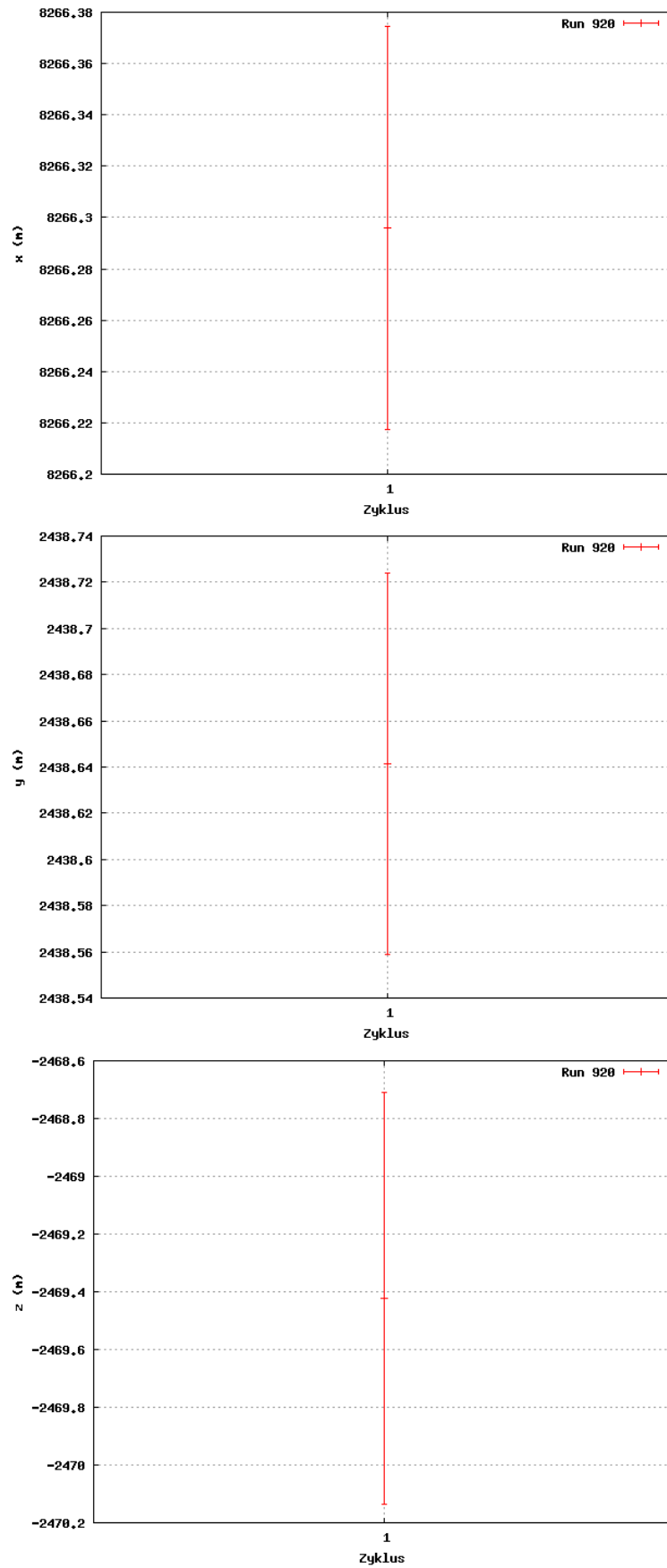


Abbildung A.31: Positionierungsergebnisse Run 920 mit Hilbert-Transformation

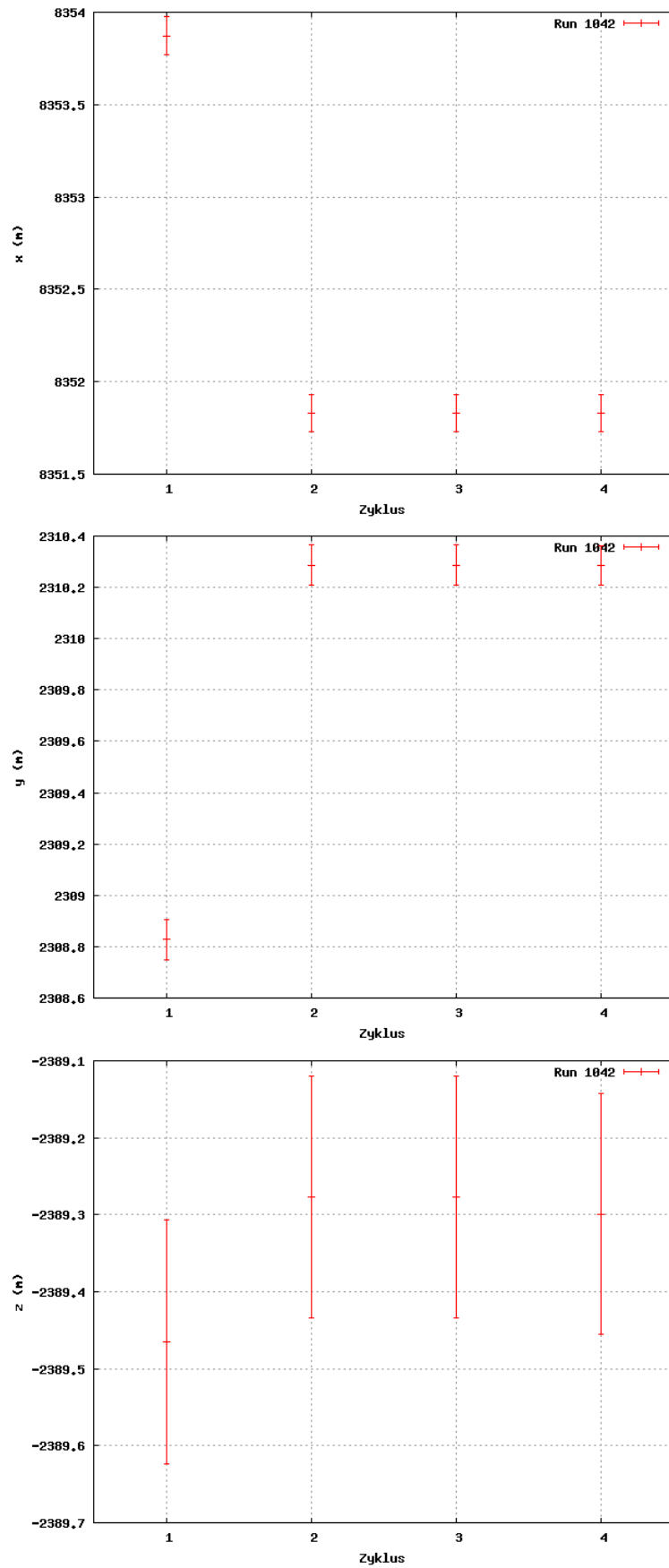


Abbildung A.32: Positionierungsergebnisse Run 1042 mit Hilbert-Transformation

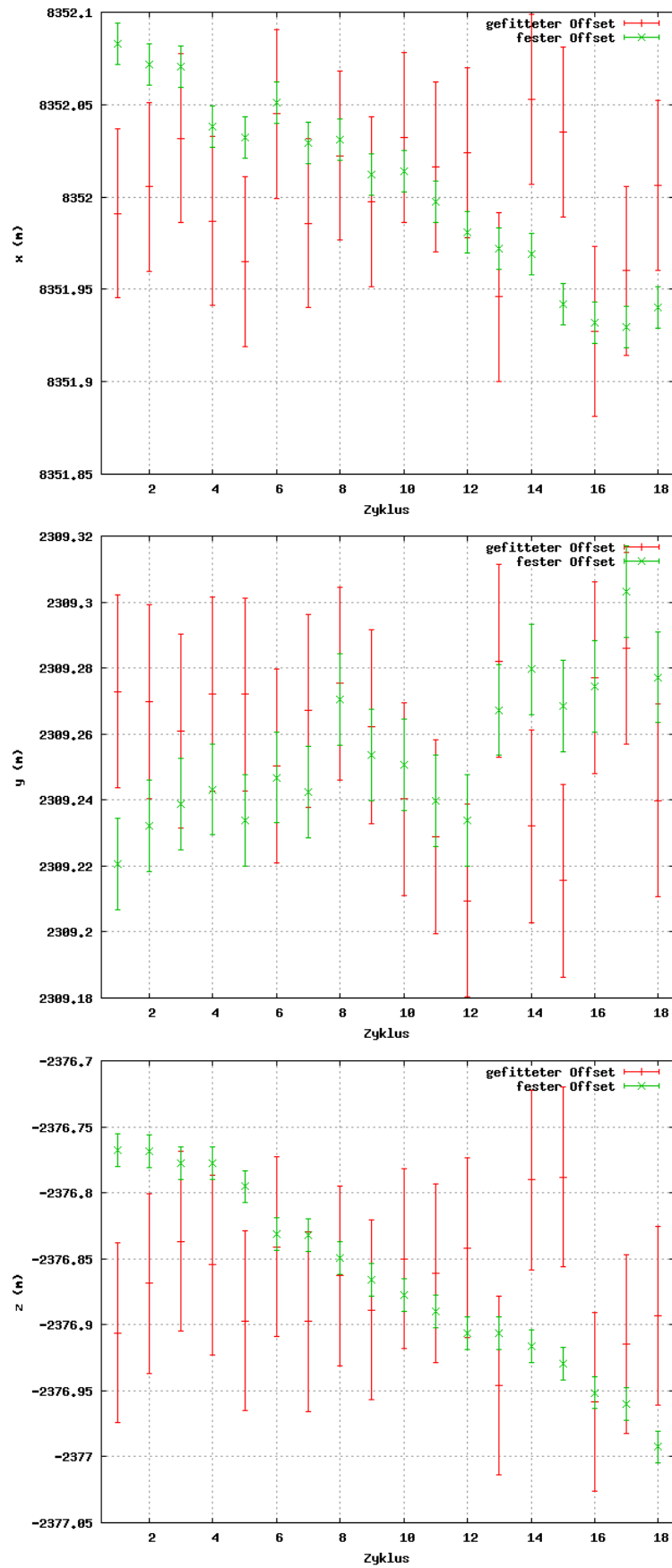


Abbildung A.33: Positionierungsergebnisse Run 1064 mit Hilbert-Transformation

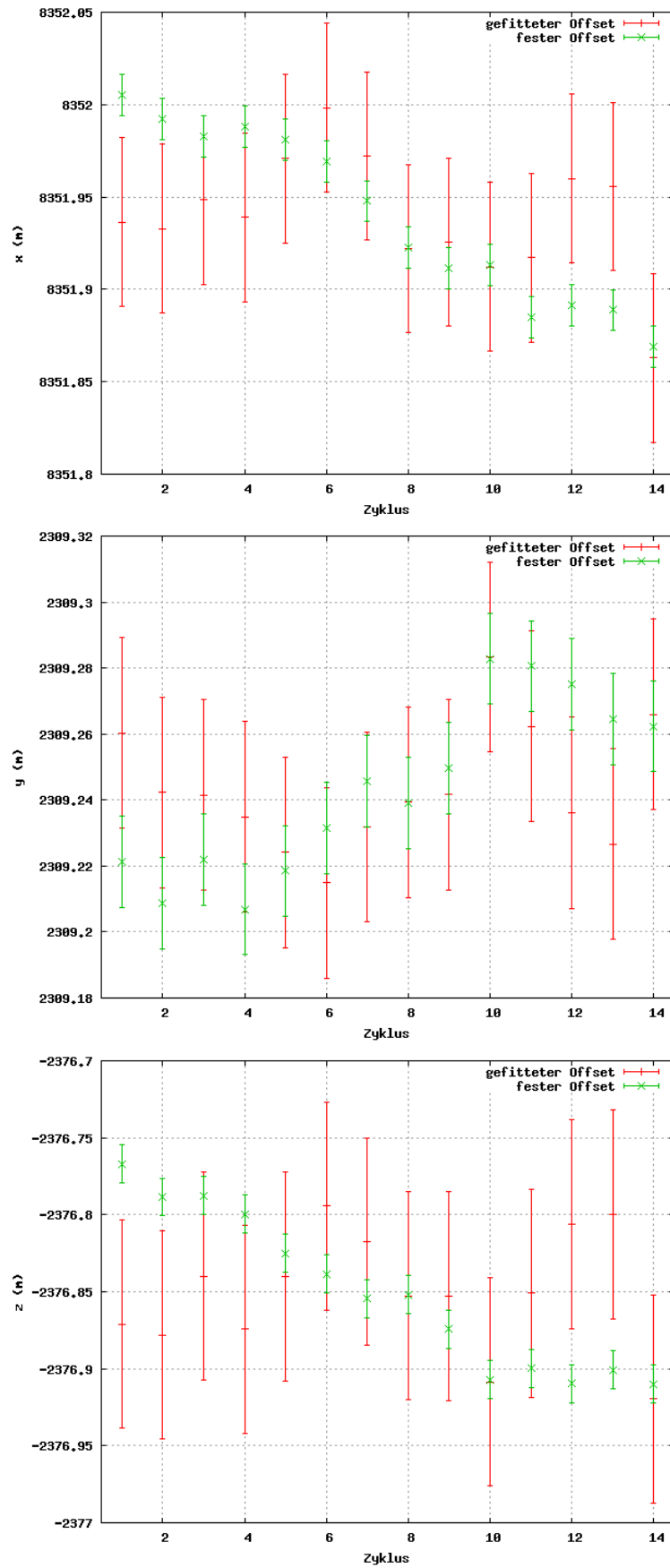


Abbildung A.34: Positionierungsergebnisse Run 1065 mit Hilbert-Transformation

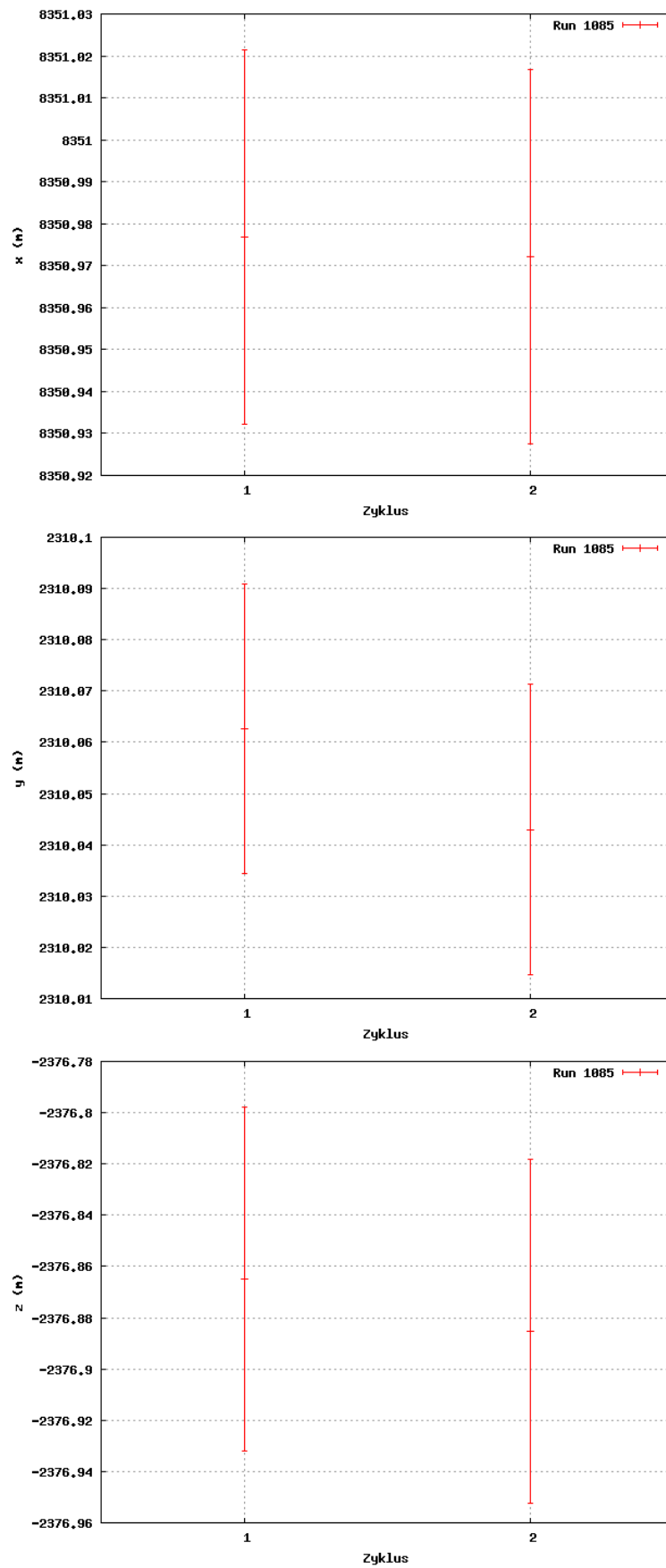


Abbildung A.35: Positionierungsergebnisse Run 1085 mit Hilbert-Transformation

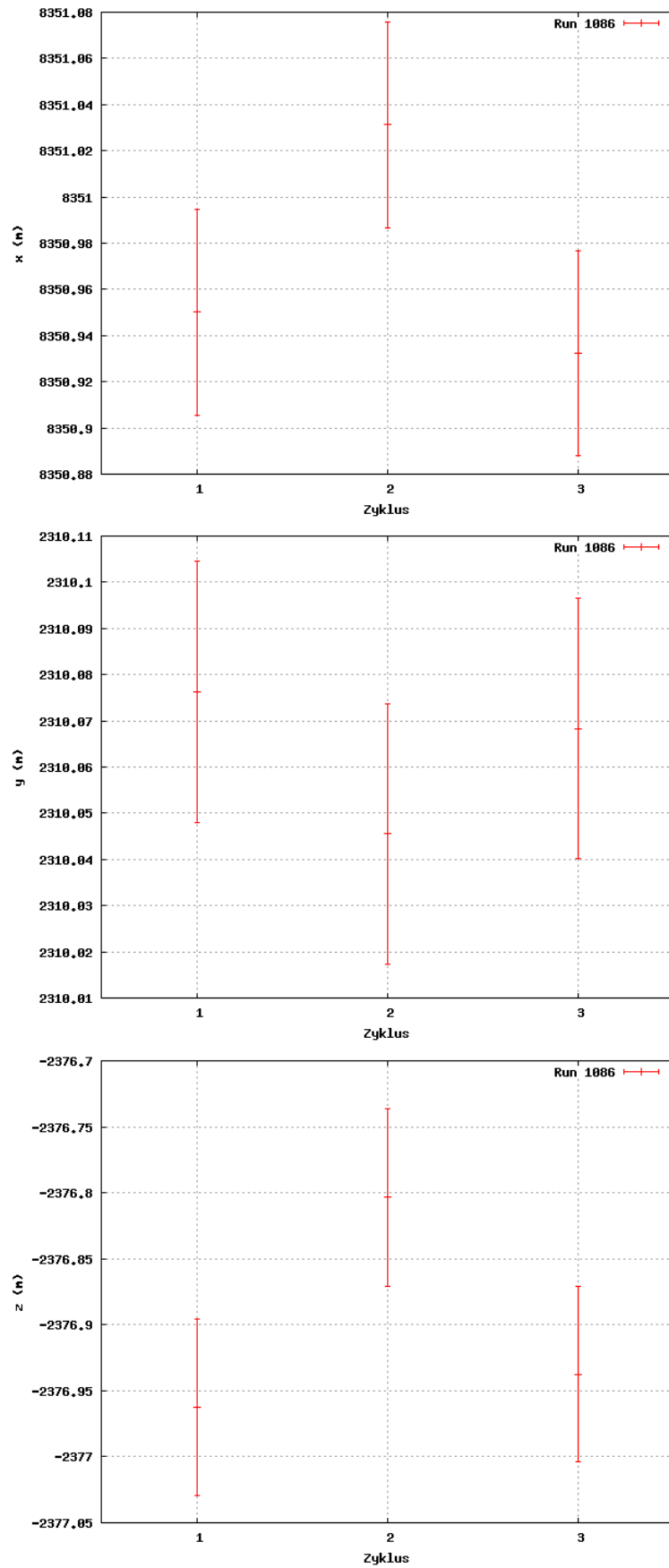


Abbildung A.36: Positionierungsergebnisse Run 1086 mit Hilbert-Transformation

Literatur

- [Adr+14] S. ADRIÁN-MARTÍNEZ u. a. *Deep sea tests of a prototype of the KM3NeT digital optical module*. 2014. eprint: [arXiv:1405.0839](https://arxiv.org/abs/1405.0839).
- [ANT11] ANTARES-GRUPPE ERLANGEN. *ANTARES Gallery*. 18. März 2011. URL: <http://www.antares.physik.uni-erlangen.de/~antares/gallery2/>.
- [Ask+79] G. A. ASKARIYAN u. a. „Acoustic Detection of High Energy Particle Showers in Water“. In: *Nuclear Instruments and Methods* (1979).
- [Col] The KM3NeT COLLABORATION. *KM3NeT Operations ELOG*. URL: <http://elog.km3net.de/Operations/>.
- [Col11] The KM3NeT COLLABORATION. *KM3NeT Technical Design Report for a Deep-Sea Research Infrastructure in the Mediterranean Sea Incorporating a Very Large Volume Neutrino Telescope*. Techn. Ber. The KM3NeT Collaboration, 2011.
- [Col14a] The KM3Net COLLABOARION. *Images of designs and prototypes*. 31. März 2014. URL: <http://www.km3net.org/images.php>.
- [Col14b] ANTARES COLLABORATION. *ANTARES Internal Pages*. 2014. URL: <http://antares.in2p3.fr/internal/>.
- [Enz14] Alexander ENZENHÖFER. *minutes of weekly run meeting on April 3, 2014*. ANTARES ELOG. 3. Apr. 2014.
- [Har06] Bettina HARTMANN. „Reconstruction of Neutrino-Induced Hadronic and Electromagnetic Showers with the ANTARES Experiment“. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2006.
- [J A+10] ANTARES collaboration: J. A. AGUILAR u. a. „AMADEUS - The Acoustic Neutrino Detection Test System of the ANTARES Deep-Sea Neutrino Telescope“. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment Volumes 626-627, 2011, 128-143* (2010). DOI: 10.1016/j.nima.2010.09.053. eprint: [arXiv:1009.4179](https://arxiv.org/abs/1009.4179).
- [JW04] Fred JAMES und Matthias WINKLER. *Minuit User's Guide*. 2004.
- [Kal13] Oleg KALEKIN. *The KM3NeT digital optical module. IPRD13, Siena*. Okt. 2013.
- [Kar13] Robert KARL. „Characterization and Analysis of Acoustical Sensor Devices for KM3NeT and ANTARES“. Masterarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, März 2013.
- [KM314a] Ulrich F. Katz for the KM3NET COLLABORATION. *News from KM3NeT*. 2014. eprint: [arXiv:1403.4065](https://arxiv.org/abs/1403.4065).

- [KM314b] KM3NET-PROJEKT. *Design, prototyping, engineering and construction*. 10. März 2014. URL: <http://km3net.org/technology.php>.
- [KM314c] KM3NET-PROJEKT. *Facilities of the KM3NeT Research Infrastructure*. 10. März 2014. URL: <http://km3net.org/RI-facilities.php>.
- [KM314d] KM3NET-PROJEKT. *KM3NeT sees first light*. 10. März 2014. URL: <http://km3net.org/images/press-releases/2013-06-03.pdf>.
- [Lan99] Charan LANGTON. *Signal Processing & Simulation Newsletter*. 1999. URL: <http://complextoreal.com/tutorials/tutorial-7-hilbert-transform-and-the-complex-envelope/>.
- [LF94] Paul A. LYNN und Wolfgang FUERST. *Introductory Digital Signal Processing with Computer Applications*. 2. Aufl. Chichester, New York, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto: John Wiley und Sons, 1994. ISBN: 0 471 97631 8.
- [Nef13] Max NEFF. „Studies on the Selection of Neutrino-like Signals for the Acoustic Detection Test Device AMADEUS“. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2013.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Bipolarer Puls gemäß Gleichung 2.2	9
3.1	Skizze des ANTARES-Aufbaus[ANT11] – unten: Neue Position der Instrumentation Line (blau)	11
3.2	Künstlerische Ansicht einer möglichen Realisierung einer KM3NeT-Einheit[Col14a]	12
3.3	Das PPM-DOM von unten[Col14a]	13
3.4	Der Piezosensor des PPM-DOM[Col14a]	13
3.5	Das Hydrophon des PPM-DOM[Col14a]	14
3.6	Position von Hydrophon und DOM an der IL[Adr+14]	14
4.1	1. Pingerzyklus von Run 691 des PPM-DOM	16
4.2	Schematische Darstellung der Signalform eines ANTARES-Pingers[Kar13, S. 53]	17
4.3	Schematische Darstellung der Triangulation[Kar13, S. 5]	19
5.1	Datennahmelücken Run 691 Zyklus 2 (Piezo)	23
5.2	Die Run Control des PPM-DOM[Col14b]	24
5.3	Clipping Run 691 Zyklus 1 Line 6 (Piezo)	25
5.4	Artefakte Run 691 Zyklus 1 Line 12 (rot: Datenpunkte, grau: interpolierte Verbindungs- linien)	25
5.5	Ungefiltertes Hydrophonsignal Run 896 Zyklus 1	26
5.6	FFT des Hydrophonsignals (Run 896 Zyklus 1)	27
6.1	Ankunftszeitenbestimmung (rot) mittels Schwellenwertmethode Run 896-1 Pinger 11 (Piezo)	30
6.2	Die komplexe Einhüllende[Lan99]	31
6.3	Effekt bei Run 896-1, Pinger 1	34
8.1	Geometrische Herleitung der Gleichung 8.1	45
8.2	Abhängigkeit der Amplitude vom Einfallswinkel	45
A.1	Positionierungsergebnisse Run 691 mit Schwellenwertmethode	52
A.2	Positionierungsergebnisse Run 826 mit Schwellenwertmethode	53
A.3	Positionierungsergebnisse Run 834 mit Schwellenwertmethode	54
A.4	Positionierungsergebnisse Run 866 mit Schwellenwertmethode	55
A.5	Positionierungsergebnisse Run 896 mit Schwellenwertmethode	56
A.6	Positionierungsergebnisse Run 897 mit Schwellenwertmethode	57
A.7	Positionierungsergebnisse Run 920 mit Schwellenwertmethode	58
A.8	Positionierungsergebnisse Run 1042 mit Schwellenwertmethode	59
A.9	Positionierungsergebnisse Run 1064 mit Schwellenwertmethode	60
A.10	Positionierungsergebnisse Run 1065 mit Schwellenwertmethode	61
A.11	Positionierungsergebnisse Run 1085 mit Schwellenwertmethode	62
A.12	Positionierungsergebnisse Run 1086 mit Schwellenwertmethode	63
A.13	Positionierungsergebnisse Run 691 mit Kreuzkorrelation	64
A.14	Positionierungsergebnisse Run 826 mit Kreuzkorrelation	65

A.15 Positionierungsergebnisse Run 834 mit Kreuzkorrelation	66
A.16 Positionierungsergebnisse Run 866 mit Kreuzkorrelation	67
A.17 Positionierungsergebnisse Run 896 mit Kreuzkorrelation	68
A.18 Positionierungsergebnisse Run 897 mit Kreuzkorrelation	69
A.19 Positionierungsergebnisse Run 920 mit Kreuzkorrelation	70
A.20 Positionierungsergebnisse Run 1042 mit Kreuzkorrelation	71
A.21 Positionierungsergebnisse Run 1064 mit Kreuzkorrelation	72
A.22 Positionierungsergebnisse Run 1065 mit Kreuzkorrelation	73
A.23 Positionierungsergebnisse Run 1085 mit Kreuzkorrelation	74
A.24 Positionierungsergebnisse Run 1086 mit Kreuzkorrelation	75
A.25 Positionierungsergebnisse Run 691 mit Hilbert-Transformation	76
A.26 Positionierungsergebnisse Run 826 mit Hilbert-Transformation	77
A.27 Positionierungsergebnisse Run 834 mit Hilbert-Transformation	78
A.28 Positionierungsergebnisse Run 866 mit Hilbert-Transformation	79
A.29 Positionierungsergebnisse Run 896 mit Hilbert-Transformation	80
A.30 Positionierungsergebnisse Run 897 mit Hilbert-Transformation	81
A.31 Positionierungsergebnisse Run 920 mit Hilbert-Transformation	82
A.32 Positionierungsergebnisse Run 1042 mit Hilbert-Transformation	83
A.33 Positionierungsergebnisse Run 1064 mit Hilbert-Transformation	84
A.34 Positionierungsergebnisse Run 1065 mit Hilbert-Transformation	85
A.35 Positionierungsergebnisse Run 1085 mit Hilbert-Transformation	86
A.36 Positionierungsergebnisse Run 1086 mit Hilbert-Transformation	87

Tabellenverzeichnis

4.1	Frequenzen der Pinger in der Reihenfolge der Auslösung	18
4.2	Positionen der Pinger im UTM-Koordinatensystem mit WGS84	18
6.1	Anzahl der im Signal vorhandenen Pinger je Zyklus	33
6.2	Anzahl der nicht erkannten Pinger bei der Schwellenwertmethode je Zyklus . . .	34
6.3	Anzahl der nicht erkannten Pinger bei der Kreuzkorrelation je Zyklus	35
6.4	Anzahl der nicht erkannten Pinger bei der Hilberttransformation je Zyklus . . .	35
6.5	Durchschnittliche Minuit-Fehler bei der Schwellenwertmethode (in Metern) . . .	36
6.6	Durchschnittliche Minuit-Fehler bei der Kreuzkorrelation (in Metern)	36
6.7	Durchschnittliche Minuit-Fehler bei der Hilberttransformation (in Metern) . . .	37
6.8	Standardabweichung bei der Schwellenwertmethode (in Metern)	38
6.9	Standardabweichung bei der Kreuzkorrelation (in Metern)	38
6.10	Standardabweichung bei der Hilberttransformation (in Metern)	38
7.1	Durchschnittliches t_{sync} je Run und Ankunftszeitenbestimmungsmethode (in Sekunden)	41
7.2	Durchschnittliche Minuit-Fehler bei der Schwellenwertmethode (Offset gemittelt, in Metern)	42
7.3	Durchschnittliche Minuit-Fehler bei der Kreuzkorrelation (Offset gemittelt, in Metern)	42
7.4	Durchschnittliche Minuit-Fehler bei der Hilberttransformation (Offset gemittelt, in Metern)	42
7.5	Standardabweichung bei der Schwellenwertmethode (Offset gemittelt, in Metern) .	43
7.6	Standardabweichung bei der Kreuzkorrelation (Offset gemittelt, in Metern) . . .	43
7.7	Standardabweichung bei der Hilberttransformation (Offset gemittelt, in Metern) .	43
8.1	Minuit-Fehlerwerte für Schwellenwertmethode für vollständige und unvollständige Zyklen (in Metern) – Erklärung der Spalten: siehe Text	46
8.2	Minuit-Fehlerwerte für Kreuzkorrelation für vollständige und unvollständige Zyklen (in Metern) – Erklärung der Spalten: siehe Text	46
8.3	Minuit-Fehlerwerte für Hilberttransformation für vollständige und unvollständige Zyklen (in Metern) – Erklärung der Spalten: siehe Text	47

Erklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich diese Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Erlangen, den 17. September 2014

Bernhard Scherl