

Untersuchung von Biolumineszenz im ANTARES Neutrino-teleskop

Bachelorarbeit aus der Physik

Vorgelegt von

Maximilian Schandri

3. August 2015

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg



Betreuer: Dr. Thomas Eberl

Inhaltsverzeichnis

1	ANTARES	2
1.1	Motivation von Neutrino Detektoren	2
1.2	Aufbau und Funktion von ANTARES	2
1.3	Motivation für die Untersuchung von Biolumineszenz	3
2	Biolumineszenz	5
2.1	Entstehung und Funktionen von Biolumineszenz	5
2.2	Biolumineszenz bei ANTARES	5
3	Peakdefinition	7
3.1	Peaksuche auf einzelnen OMs	7
3.2	Peaksuche auf Stockwerken	8
4	Betrachtete Daten des ANTARES-Detektors	10
5	Korrelation biolumineszenter Ereignisse auf übereinander liegenden Stockwerken	12
5.1	Beschreibung der Berechnung des Korrelationskoeffizienten . .	12
5.2	Fehler der Korrelationskoeffizienten	16
5.3	Nullprobe des Korrelationskoeffizienten	17
5.4	Korrelationslänge von Biolumineszenz bei ANTARES	19
5.5	Diskussion der Korrelationslänge	21
6	Zusammenfassung und Ausblick	23
A	Zusätzliche Korrelationshistogramme	26
B	Anordnung der Lines des ANTARES-Detektors	28

1 ANTARES

1.1 Motivation von Neutrino Detektoren

Kosmische Teilchen sind grob gegliedert in geladene Teilchen (z.B. Proton und Elektron), Photonen (z.B. sichtbarer Spektralbereich oder Röntgenstrahlung) und Neutrinos. Über die Messung der Energien und Richtungen dieser Teilchen kann man im Prinzip Rückschlüsse auf deren Quellen ziehen. Die geladenen Teilchen bzw. die Photonen werden auf ihrem Weg zur Erde von Magnetfeldern abgelenkt bzw. von Materie absorbiert. Dies macht sie ungeeignet für die Beobachtung ihrer Quellen bei größeren Distanzen zum Detektor. Neutrinos hingegen unterliegen nur der schwachen Wechselwirkung und haben dadurch einen geringen Wirkungsquerschnitt. Deshalb ist ihr Energieverlust auf dem Weg zur Erde, sowie ihre Richtungsänderung gering. Der daraus resultierende Nachteil für die Astroteilchenphysik ist deren schwere Nachweisbarkeit. [1]

Deswegen werden Detektoren mit großen Volumen gebaut, um die Wahrscheinlichkeit eines Neutrinonachweises zu erhöhen.

1.2 Aufbau und Funktion von ANTARES

ANTARES ist ein Unterwasser-Neutrinodetektor. Er befindet sich 40 km vor der Küste von Toulon, in einer Tiefe von 2475 m unter der Meeresoberfläche. Das grundlegende Prinzip des Detektors ist der Nachweis des Cherenkov-Lichts erzeugt von geladenen Teilchen. Diese Teilchen sind Produkte aus den so genannten Charged-Current- und Neutral-Current-Wechselwirkungen von einem Neutrino mit der Materie in der Umgebung des Detektor.

Cherenkov-Licht kommt zustande, indem sich ein geladenes Teilchen in einem Medium bewegt, welches einen Brechungsindex n hat. Ist die Geschwindigkeit v des Teilchens größer als die Lichtgeschwindigkeit des Mediums $c_n = c/n$, so sendet es elektromagnetische Strahlung aus. Die Detektion des Lichts erfolgt mithilfe eines Optischen Moduls (OM), welches einen Photomultiplier (PMT) beinhaltet. Eine Gruppe von drei, im 45° Winkel nach unten schauenden OMs und die dazugehörige Ausleseelektronik bilden ein Stockwerk (engl. „Storey“). Eine „Line“ besteht aus 25 miteinander verbundenen Stockwerken. Der Abstand der Storeys beträgt 14.5 m, wobei das Erste 100 m vom Grund des Meeres entfernt ist. Der Detektor besteht aus 12 solcher Lines, wobei die zwölfte Line aus nur 20 Storeys und weiteren Instrumenten zur akustischen Detektion besteht. Die Lines sind oktagonale am Meeresboden angeordnet. Zusätzlich gibt es eine „Instrumentation Line“ auf der Instrumente zur Messung von Umgebungseigenschaften angebracht sind.

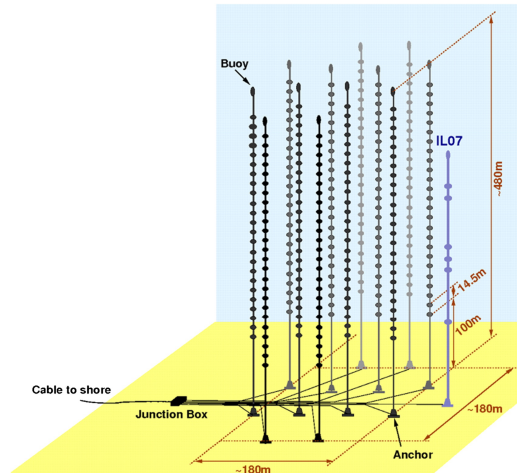


Abbildung 1: schematischer Aufbau des Neutrindetektors ANTARES, die Punkte auf den Lines symbolisieren die Stockwerke. Die Instrumentation Line wird mit IL07 bezeichnet [2]

Die Datenaufnahme erfolgt mit dem „all-data-to-shore“ Prinzip. Hier wird jedes Signal von einem PMT, das eine vorgegebene Schwelle (normalerweise 0.3 Photoelektronen) überschreitet, digitalisiert und zu einer Computer Farm an der Küste gesendet. Die Digitalisierung erfolgt über zwei „Analogue Ring Sampler“ (ARS), um die Totzeit der Datenaufnahme zu minimieren. Ein Computer bekommt die Zählraten jedes PMTs, des gesamten Detektors, welche innerhalb eines Zeitfensters von 104.858 ms aufgenommen wurden. Dieses Zeitfenster wird auch „Timeslice“ (TS) genannt. Auf diesen Computern werden Trigger angewandt, um mögliche Neutrino-Ereignisse zu finden. Nur wenn ein solches Physik-Ereignisse gefunden wird, werden die gesamten Raten der einzelnen OMs für diesen TS gespeichert. Hier sind nur die Zählraten von Interesse, weswegen nicht genauer auf die Trigger eingegangen wird. Genauer werden in dieser Arbeit nur die sogenannten „Off-Shore“ Raten verwendet. Diese ist nur die Zählrate wie oft die Spannung am Ausgang des PMTs eine einstellbare Schwelle überschreitet. Für weiterführende Informationen zu dem Aufbau und zu der Funktionsweise des ANTARES-Detektors wird auf [2] verwiesen.

1.3 Motivation für die Untersuchung von Biolumineszenz

Für die Untersuchung von Physik-Ereignissen im ANTARES Detektor wird nach Korrelationen von Cherenkov-Photonen gesucht. Die perfekte Bedin-

gungen hierfür wären, dass die aufgenommenen Raten nur von Cherenkov-Licht stammen. Es werden jedoch unter anderem auch Raten von biolumineszenten Ereignissen, welche in den folgenden Kapiteln näher beschrieben werden, detektiert. Deswegen ist es wichtig die Eigenschaften und Ursachen von Biolumineszenz zu analysieren, um die Auswirkungen auf den Detektor zu verstehen und die Störungen in den Daten minimieren zu können, welche von biolumineszenten Lebewesen stammen.

2 Biolumineszenz

2.1 Entstehung und Funktionen von Biolumineszenz

Biolumineszenz nennt man das Licht, welches von lebenden Organismen während einer chemischen Reaktion produziert wird. Diese Reaktion ist meistens die Oxidation eines licht-emittierenden Moleküls, allgemein Luciferine genannt, welche durch ein Enzym, die sogenannten Luciferasen, kontrolliert wird. Es gibt viele unterschiedliche, Spezies abhängige Luciferasen, wohingegen Luciferine konserviert sind. Konserviert bedeutet, dass der grundlegende Aufbau von Luciferinen bei verschiedenen Gattungen gleich beziehungsweise ähnlich ist. Es gibt auch Photoproteine. Hierbei handelt es sich um eine Art Luciferase, die bereits mit Luciferin und Sauerstoff chemisch verbunden ist. Ein Photoprotein emittiert Licht, sobald es sich mit einem Ion, beispielsweise Ca^{2+} oder Mg^{2+} , bindet. [3]

Manche biolumineszente Organismen können nicht nur entscheiden *wann* sie leuchten, sondern sie können auch die *Intensität*, die *Winkelverteilung* und die *Farbe* des ausgestrahlten Lichts regulieren. Die Zweckmäßigkeit von Biolumineszenz kann sowohl defensiv als auch offensiv sein. Ein Jäger kann Licht dazu verwenden, um seine Beute anzulocken, zu verwirren oder um sie sichtbar zu machen. Die Beute hingegen versucht, durch ein helles Leuchten seinen Räuber zu erschrecken oder durch das Abwerfen von leuchtendem Material dem Räuber abzulenken, um somit entkommen zu können. Kommunikation, wie zum Beispiel das Finden eines Partners, ist ebenfalls eine Funktion von Biolumineszenz. [3]

2.2 Biolumineszenz bei ANTARES

Wasser ist im blauen Wellenlängenbereich am transparentesten. Da Lebewesen in der Tiefsee ihre Lichtsignale möglichst weit schicken wollen, leuchten sie bevorzugt in Wellenlängen zentriert um 475 nm [4]. Aus demselben Grund ist ANTARES bei diesen Wellenlängen sensitiv. Der dominierende Grund warum Tiere, vorallem kleinere Organismen, im Detektor anfangen zu leuchten, ist möglicherweise, dass sie aufgrund der vorherrschenden Meeressströmung gegen Teile des Detektors gedrückt werden. Das Leuchten als Resultat des Abwehrverhaltens findet also sehr nahe am Detektor statt. Wenn dies nahe an den OMs geschieht, verursacht das große Ausschläge in den Raten. Deswegen bildet die Biolumineszenz einen großen Störfaktor.

Bei den aufgenommenen Zählraten der OMs sieht man, dass die Raten in zwei Teile aufgespalten sind. Es gibt eine relativ konstante Rate, welche einerseits auf den Zerfall von ^{40}K und andererseits auf die Anwesenheit von

biolumineszenten Mikroorganismen, wie Bakterien, zurückzuführen ist [5]. Diese Rate nennt man „Baseline“. Auf der Baseline sieht man sogenannte „Bursts“ bzw. „Peaks“. Bei einem Burst steigen die Raten schnell deutlich höher als die Baseline an und fallen nach einem Maximum exponentiell ab (siehe Abb. 2). Dies wird von makroskopischen Organismen, wie zum Beispiel Garnelen oder Quallen, verursacht [6]. Diese Bursts werden hier weiter untersucht. Im nachfolgenden Teil wird beschrieben, wie nach solchen Peaks gesucht wurde.

3 Peakdefinition

Um eine gute Analyse der Bursts zu gewährleisten, muss man sich sinnvolle Regeln überlegen, welche einen Peak finden. Die hier verwendete Peakdefinition ist im Folgenden erläutert.

3.1 Peaksuche auf einzelnen OMs

Die zur Verfügung gestellten Raten waren in Zeitfenster eingeteilt, sodass in ihnen eine bestimmte Anzahl (in diesem Fall 10000 oder 50000) an Physik-Ereignissen enthalten waren. Die Größenordnung dieser Fenster lag im Bereich mehrer hundert Sekunden.

Das Hauptkriterium eines Peaks ist, dass seine Raten einen bestimmten Wert überschreiten müssen und sich somit von der Baseline abheben. Hier wurde für diese Grenze der doppelte Mittelwert der Raten des ganzen Zeitfensters gewählt. Hat man eine solche Rate gefunden, beziehungsweise einen TS mit einer Rate, die das Limit überschreitet, verlangt man, dass die Rate des nachfolgenden TS die Rate des Ersten nochmals überschreitet. Hinzu kommt noch, dass nur nach einer Rate über der besagten Grenze gesucht wird, wenn vorher bei mindestens zehn aufeinanderfolgenden TS die Rate *unter* der Grenze liegt. Dadurch wird sichergestellt, dass Ausreißer in den Raten als Peak registriert werden. Die Anfangszeit eines Peaks ist als die Zeit festgelegt, bei der die Rate das erste mal die Grenze überschreitet. Ein Beispiel, eines so gefundenen Peaks, ist in der nachfolgenden Abbildung gezeigt.

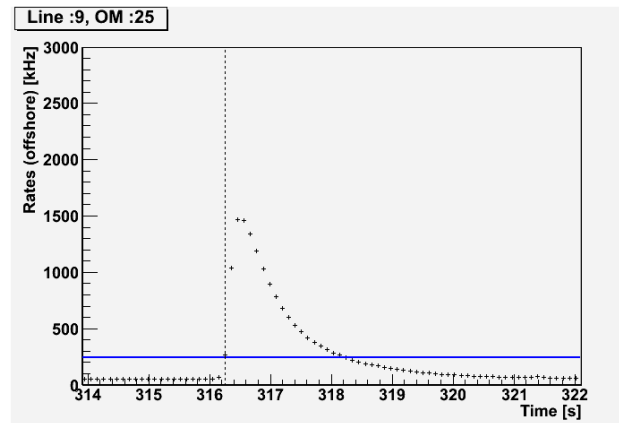


Abbildung 2: Beispiel eines Peaks, die durchgezogene Linie ist der Threshold des OMs, die gestrichelte Linie veranschaulicht die Anfangszeit des Peaks

Wie man in der Abbildung 2 sieht, steigen die Raten bei einem Peak sehr schnell, innerhalb von wenigen TS, an. Das Abklingen des Bursts dauert jedoch länger und kann bis zu zirka 4 Sekunden dauern. Hier wurden keine genaueren Analysen zur Höhe oder Breite der Peaks gemacht, dennoch sieht man hier [6], dass es Lebewesen im Mittelmeer gibt welche bis zu 6.5 Sekunde leuchten.

Mögliche Fehler dieser Peakdefinition sind zum Beispiel, dass ein unkorrelierter Doppelpeak als einzelner erkannt wird. Der zweite Peak wird somit nicht berücksichtigt. Wird das Maximum eines Peaks schon innerhalb eines TS erreicht, ist die nachfolgende Rate bereits wieder kleiner. Dadurch würde dieser Peak nicht als solcher erkannt werden.

3.2 Peaksuche auf Stockwerken

Da die Raten der OMs, welche auf demselben Stockwerk sitzen, stark korrelieren, macht es Sinn, Peaks von einem ganzen Stockwerk zu suchen. Um diese Peaks zu definieren, muss Folgendes gegeben sein.

Als Erstes betrachten wir nur Stockwerke mit drei funktionierenden OMs, welche in der folgenden Arbeit als geeignete Stockwerke bezeichnet werden. Wobei „funktionierend“ hier bedeutet, dass die mittlere Rate der OMs 20 kHz überschreitet. Bei solchen Stockwerken sucht man nun auf den einzelnen OMs nach Peaks, so wie es oben beschrieben wurde. Findet man auf mindestens zwei OMs des Stockwerks zum gleichen Zeitpunkt einen Peak, gilt dieser Peak auch als Peak des Stockwerk. Dadurch wird versucht, Ereignisse heraus zu filtern, welche durch den direkten Zusammenstoß von kleineren Organismen mit einem OM zustande gekommen sind. In der nächsten Abbildung ist ein Beispiel eines Peaks von einem Stockwerk dargestellt.

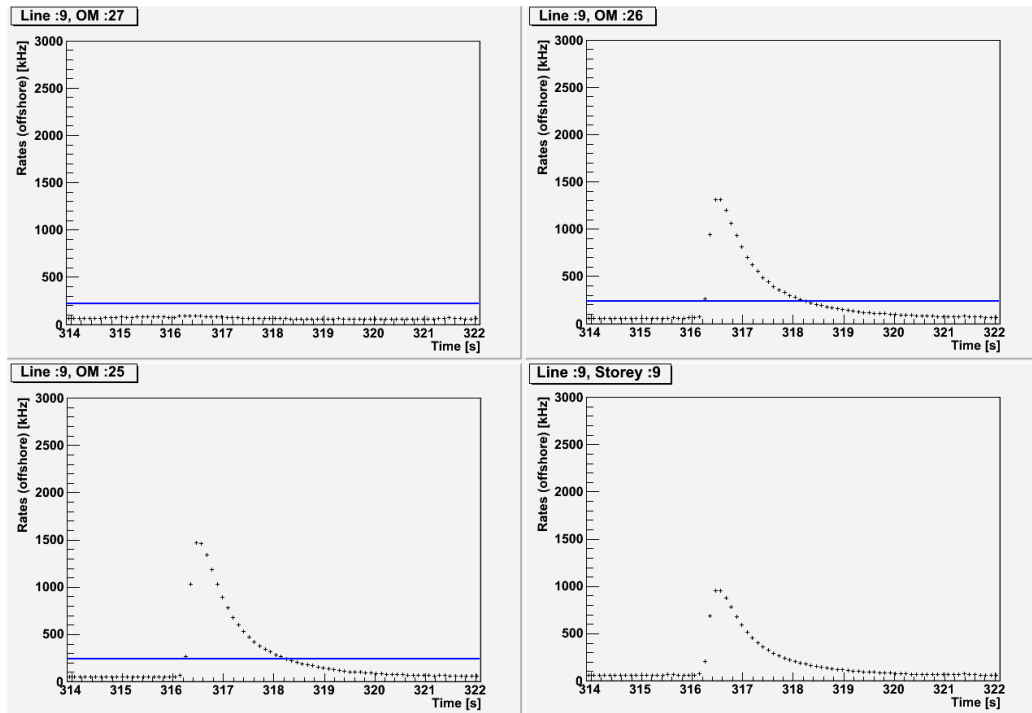


Abbildung 3: Beispiel eines Peaks des Stockwerks 9 auf der Line 9, welches aus den OMs 25,26,27 besteht. Die blaue Linien sind die Thresholds der jeweiligen OMs. Unten rechts sind die Raten des Stockwerks aufgetragen, also das arithmetische Mittel der Raten der 3 OMs

Ein möglicher Fehler dieser Art der Suche ist zum Beispiel, wenn ein Peak auf zwei OMs erkannt wird, jedoch auf einem der beiden OMs das Maximum so gering ist, dass das Überschreiten des Thresholds einen Timeslice später erfolgt als bei dem anderen OM.

4 Betrachtete Daten des ANTARES-Detektors

Die Biolumineszenz ist stark abhängig von der Meeresströmung und der Jahreszeit. Bei schnellerer Meeresströmung steigt die Baseline-Rate nur gering, wohingegen die „Burstfraction“ stark zunimmt. Die Burstfraction ist der Anteil der Raten, welche die Baseline-Rate mehr als 20% übersteigen. Im Frühling und Sommer sind die Baseline-Rate und die Burstfraction höher als im Herbst bzw. Winter. Hinzu kommt noch, dass die Burstfraction abhängig von der mittleren Rate ist. Steigt also die Mean-Rate, so steigt auch die Burstfraction. Es tritt zwar eine Sättigung in dieser Relation auf, aber diese ist erst ab einer mittleren Rate von zirka 600 kHz erkennbar, was die hier vorhandenen Mean-Raten noch nicht erreichen. [7]

Aufgrund der Abhängigkeit der Geschwindigkeit von der mittleren Rate, sind nur 4 unterschiedliche Kombinationen möglich.

- (1) hohe Baseline-Rate, niedrige Mean-Rate, niedrige Geschwindigkeit
- (2) hohe Baseline-Rate, hohe Mean-Rate, hohe Geschwindigkeit
- (3) niedrige Baseline-Rate, niedrige Mean-Rate, niedrige Geschwindigkeit
- (4) niedrige Baseline-Rate, hohe Mean-Rate, hohe Geschwindigkeit

Um ein Teil diese verschiedenen Bedingungen zu berücksichtigen, wurden mehrere Runs aus verschiedenen Zeiträumen genommen (s.Abb. 4).

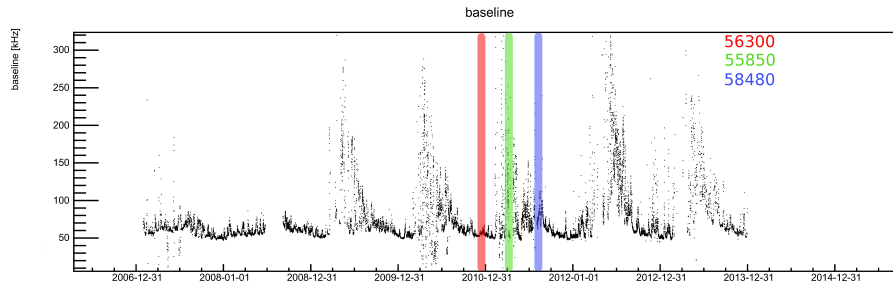


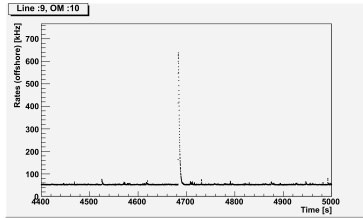
Abbildung 4: Graphik zeigt die verschiedenen Baseline-Raten über zirka sieben Jahre hinweg. Farblich markiert sind die ungefähren Zeiten der Runs 56300, 55850 und 58480

In der folgenden Tabelle sind für die verschiedenen Runs die Baseline-Rate, das Sigma der Baseline, die Burstfraction, die Mean-Rate und die Geschwindigkeit der Meeresströmung aufgelistet. Die Baseline-Rate wird durch das Auswerten eines Histogramms der Raten eines Runs errechnet, indem eine Gausfunktion über die niedrigsten Werte bis hin zum Maximum der Verteilung gelegt wird. Das Sigma bezieht sich auf diese Gausfunktion. Man hat durch diese Runs drei der vier möglichen Kombinationen abgedeckt.

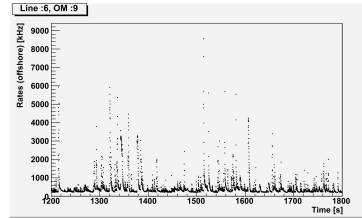
Run-Nummer	5360X	5585X	58480
Datum	03.12.2010	09.03.2011	06.07.2011
Baseline [kHz]	53 ± 1	$228 \pm 6 - 312 \pm 14$	68 ± 2
σ_{Base}	1	6-14	2
Burstfraction [%]	6	37 - 49	46
Mean [kHz]	62	406-589	238
Geschwindigkeit [cm/s]	1	6-7	7
Kombination	(3)	(2)	(4)

Tabelle 1: Eigenschaften der verwendeten Daten. Bei 5360X steht das X für 0, 1, 3 und 5 und bei 5585X steht das X für 0, 7, 8 und 9. Hier hat man mehrere zeitlich nahe Runs genommen um genug Daten zu haben.

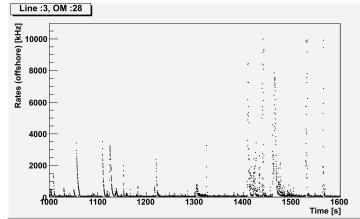
Beispielhaft sind in den folgenden Abbildungen zufällig ausgewählte Ausschnitte der drei Datensätze zu sehen, um die Unterschiede zu veranschaulichen.



(a) 053601



(b) 055858



(c) 058480

Abbildung 5: 10 Minuten Ausschnitte aus den verwendeten Daten. Bei (a) sind deutlich weniger Peaks als bei (b) und (c). Bei (c) sind viele kleine und große Peaks vorhanden.

5 Korrelation biolumineszenter Ereignisse auf übereinander liegenden Stockwerken

Um zu überprüfen, ob Biolumineszenz der selben Quelle auf mehreren Stockwerken zu sehen ist, kann man sich den Korrelationskoeffizienten (KK) von Raten aus einem festen Zeitintervall auf unterschiedlichen Stockwerken ausrechnen. Wie genau das hier getan wurde, wird im Folgenden erläutert.

5.1 Beschreibung der Berechnung des Korrelationskoeffizienten

Für die Überprüfung von einer Korrelation der Peaks auf übereinanderliegenden Stockwerken, wurden zuerst sieben aufeinanderfolgende geeignete Stockwerke gesucht. Bei dem untersten dieser Stockwerke wurden die Peaks, wie oben beschrieben, gesucht. Anschließend wurde die zeitliche Position des dazugehörigen Maximums ermittelt. Dafür wurde ab der bereits bekannten Startzeit des Peaks nach einer Rate gesucht, welche kleiner ist als die Vorherige. Dies wurde auf den zusammengeführten Raten des ganzen Stockwerks durchgeführt. Hat man eine Rate gefunden, welche niedriger war als die vorangegangene Rate, wurde die Position der vorherigen Rate als Maximum des Peaks festgehalten.

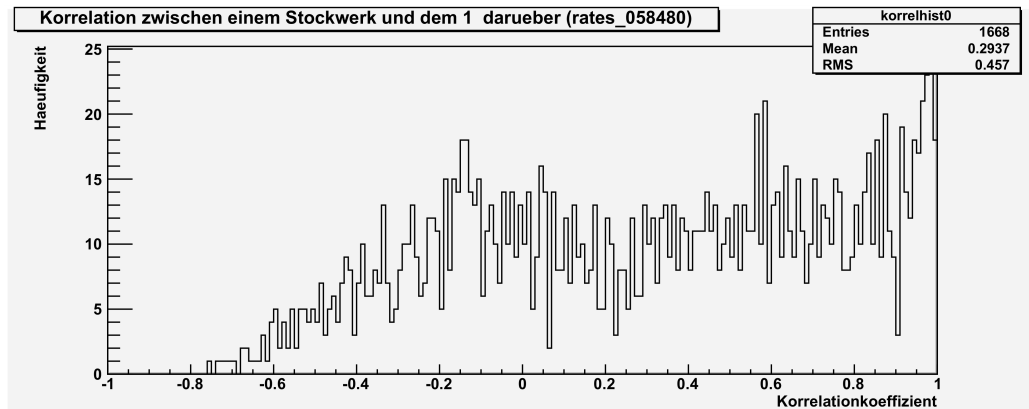
Nun vergleicht man die Raten in einem Zeitfenster um das Maximum. Das Zeitfenster wurde von 5 TS vor, bis 40 TS nach dem Maximum gewählt. Insgesamt ergibt sich somit eine Länge von 46 TS. Diese Grenzen wurden aufgrund der Form des Peaks gewählt (s.Abb.2). In dem gewählten Zeitintervall von 46 TS wird, jeweils bei den darüber liegenden Stockwerken, nach Korrelationen gesucht.

Für die Berechnung des KK wurde folgende Formel benutzt.

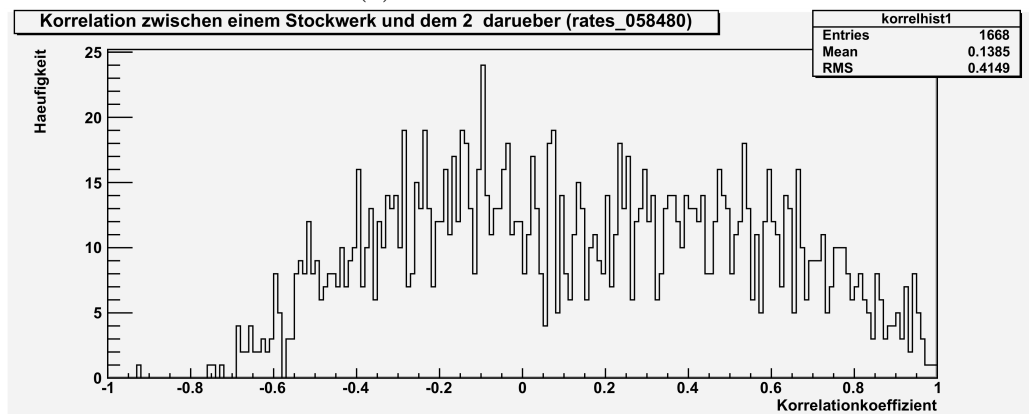
$$korr = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Hier stehen die x_i und y_i für die Raten des untersten bzw. eines der darüber liegenden Stockwerke. \bar{x} ist das arithmetische Mittel von allen x_i und die Summen gehen jeweils über alle x- bzw. y-Werte in dem Zeitfenster.

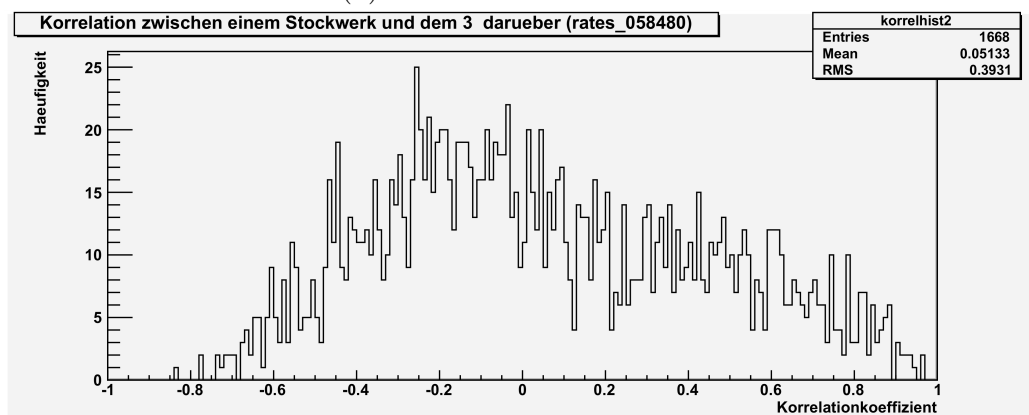
Es wurde für einen Peak auf dem untersten Stockwerk und dem damit verbundenen Zeitfenster, jeweils ein KK für jedes der sechs darüber liegenden Stockwerk berechnet. In den folgenden Abbildungen werden beispielhaft die Histogramme der KK für verschiedene Stockwerke der verschiedenen Runs gezeigt.



(a) ein Stockwerk darüber



(b) zwei Stockwerke darüber



(c) drei Stockwerke drüber

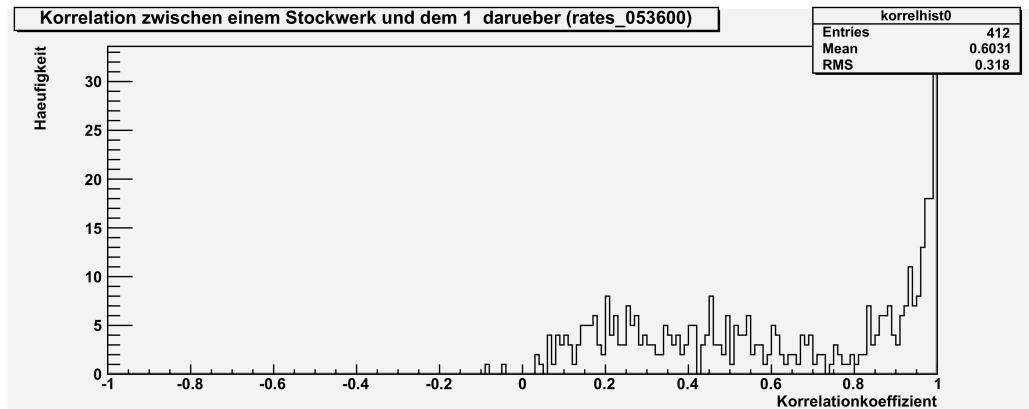
Abbildung 6: Run 058480: Die Häufigkeit der Korrelationskoeffizienten für alle gefundenen Peaks auf dem unteren Stockwerk mit den jeweiligen Zeitfenstern auf den darüberliegenden Stockwerken

In Abbildung 6 sieht man eine deutliche Abnahme der Anzahl von großen KK je weiter die Stockwerke voneinander entfernt liegen. Viele Ereignisse werden nur von zwei übereinander liegenden Stockwerken gesehen. Mit Hilfe eines Vergleichs der Histogramme aus Abbildung 6 mit dem Histogramm der Nullprobe (Abb. 9) kann gezeigt werden, dass sich die Formen der Verteilungen bei kleinen KK ähneln. Bei KK ab zirka 0.6 sind jedoch in Abbildung 6 vermehrt größere Ausprägungen zu beobachten.

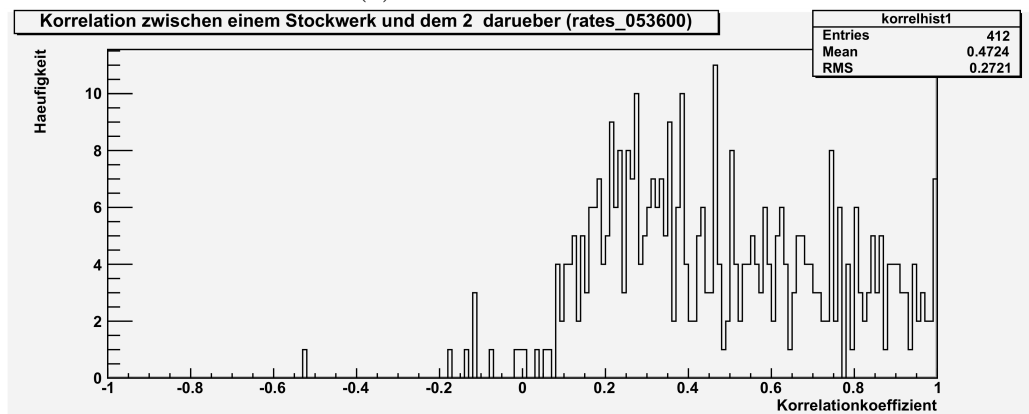
Für den Run 05360X sehen diese Histogramme entsprechend wie in Abbildung 7 aus. Im Vergleich zu Abbildung 6 fällt auf, dass es hier wenig bis keine negativen KK gibt. Eine Möglichkeit für diesen Unterschied ist, dass es im Gegensatz zu Run 058480 hier weniger Peaks pro Zeiteinheit gibt, welche den KK negativ beeinflussen können. Des Weiteren ist zu erkennen, dass in Abbildung 7(a) der prozentuale Anteil der KK über 0.6 zu den gesamten Einträgen genauso vorhanden ist. Hervorzuheben ist dabei, dass diese Häufigkeit unverhältnismäßig groß ist. Durch den erneuten Vergleich dieses Runs mit der dazugehörigen Nullprobe kann die oben durchgeführte Beobachtung bestätigt werden, dass sich die Nullprobe (s. Abb 10) ebenfalls nur bei KK größer 0.6 unterscheidet.

Aufgrund der sich deckenden Beobachtungen kann die Schlussfolgerung getroffen werden, dass Peaks vorhanden sind, welche auf mehreren Stockwerken erkennbar sind. Dies wird im Kapitel 5.4 genauer analysiert.

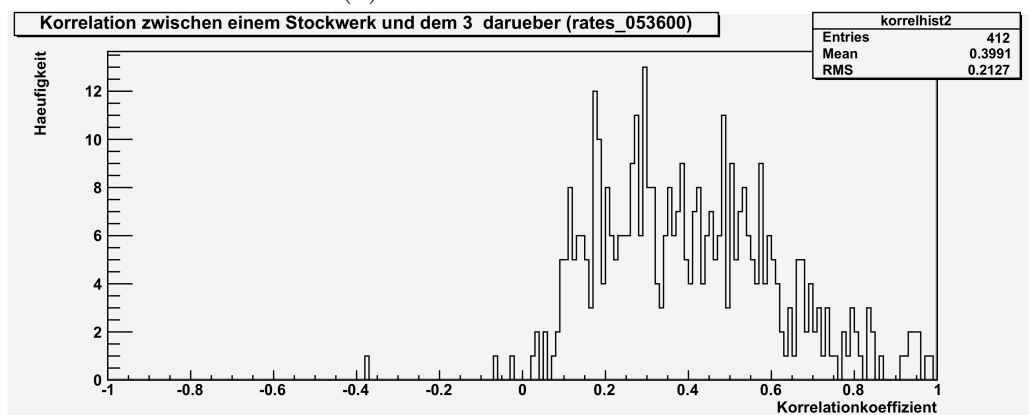
Das Histogramm der KK des Runs 5585X unterscheidet sich kaum von dem der Nullprobe dieses Runs (s. Anhang A).



(a) ein Stockwerk darüber



(b) zwei Stockwerke darüber



(c) drei Stockwerke drüber

Abbildung 7: Run 05360X: Die Häufigkeit der Korrelationskoeffizienten für alle gefundenen Peaks auf dem unteren Stockwerk mit den jeweiligen Zeitfenstern auf den darüberliegenden Stockwerken

5.2 Fehler der Korrelationskoeffizienten

Die Raten haben einen statistischen Fehler, welcher aus dem Zählen der Spannungsüberschreitung des PMTs, wie in 1.2 schon beschrieben wurde, resultiert. Die Zählrate $count_i$ ist der Mittelwert der beiden ARS für ein OM. Wird diese verdoppelt und durch die Zeit eines TS geteilt, erhält man die Rate des TS x_i in Hertz. Der Fehler der Zählrate ergibt sich aus der Wurzel des Wertes selbst, da es sich hierbei um einen poisson-verteilten Mittelwert handelt.

$$x_i = \frac{2 \cdot count_i}{0.104858s} \quad (2)$$

$$\delta_{x_i} = \frac{2}{0.104858s} \cdot \sqrt{count_i} \quad (3)$$

Durch gaußsche Fehlerfortpflanzung ergibt sich der Fehler für den KK δ_{korr} wie folgt.

$$\delta_{korr} = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial korr}{\partial x_i} \cdot \delta_{x_i} \right)^2 + \sum_i \left(\frac{\partial korr}{\partial y_i} \cdot \delta_{y_i} \right)^2} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial korr}{\partial x_i} &= \frac{N\dot{Z} - Z\dot{N}}{N^2} \\ N &= \sqrt{\sum_j (x_j - \bar{x})^2 \cdot \sum_j (y_j - \bar{y})^2} \\ \dot{N} &= \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_j (y_j - \bar{y})^2}{\sqrt{\sum_j (x_j - \bar{x})^2 \cdot \sum_j (y_j - \bar{y})^2}} \\ Z &= \sum_j (x_j - \bar{x}) \cdot (y_j - \bar{y}) \\ \dot{Z} &= y_i - \bar{y} \end{aligned} \quad (5)$$

Analog zur Ableitung des KK nach x_i wird die Ableitung nach y_i berechnet.

Die sich so ergebenden Fehler auf den KK sind bei allen drei Runs klein. Um dies zu verdeutlichen, ist in der folgenden Abbildung die Häufigkeitsverteilung der Fehler des Runs 058480 gezeigt. Da die Histogramme der anderen Runs ähnlich verteilt sind, aber weniger Statistik beinhalten, werden diese hier nicht aufgeführt.

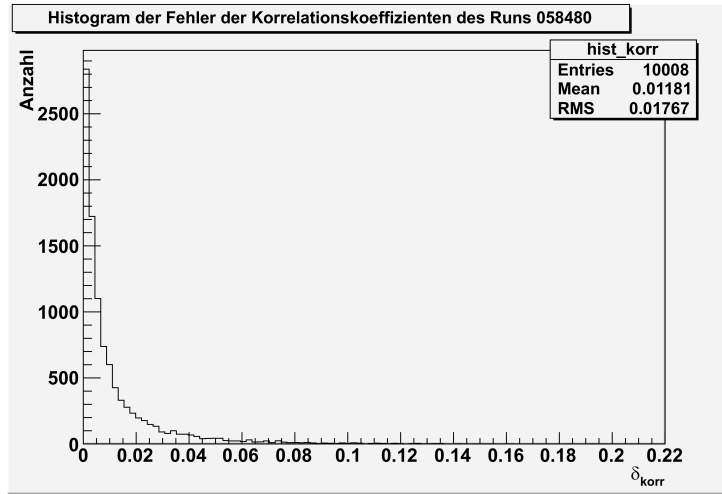


Abbildung 8: Histogramm mit den Fehlern der Korrelationskoeffizienten des Runs 058480

5.3 Nullprobe des Korrelationskoeffizienten

Um ein Maß dafür zu haben wie groß der Anteil der KK über 0.6 gegenüber der Anzahl aller KKs bei unkorrelierten Stockwerken ist, wurde eine Nullprobe durchgeführt.

Dazu wurden elf Line-Paare ausgewählt, mit dem Kriterium, dass deren Lines räumlich möglichst weit von einander entfernt liegen (s. Anhang B). Von den beiden Lines aus einem Line-Paar wurden zufällig jeweils vier geeignete Stockwerke, also drei funktionierende OMs, ausgesucht und miteinander verglichen. Dieser Vorgang wurde für alle elf Paare durchgeführt und 50 mal wiederholt. Von allen 50 Durchläufen wurde der prozentuale Anteil von KK größer 0.6 herausgefiltert. Diese Vorgehensweise wurde bei allen Runs angewandt. Die daraus resultierenden Mittelwerte mit Standardabweichungen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst. Die darauf folgenden Abbildungen (9,10,11) zeigen beispielhaft die Histogramme der KK von einem der 50 Durchläufe.

Run-Nummer	Mittelwert [kHz]	Standardabweichung [kHz]
05360X	0.061	0.018
05585X	0.076	0.012
058480	0.076	0.013

Tabelle 2: Mittelwerte der Anteile der Korrelationskoeffizienten über 0.6 zu allen Einträgen der Nullproben.

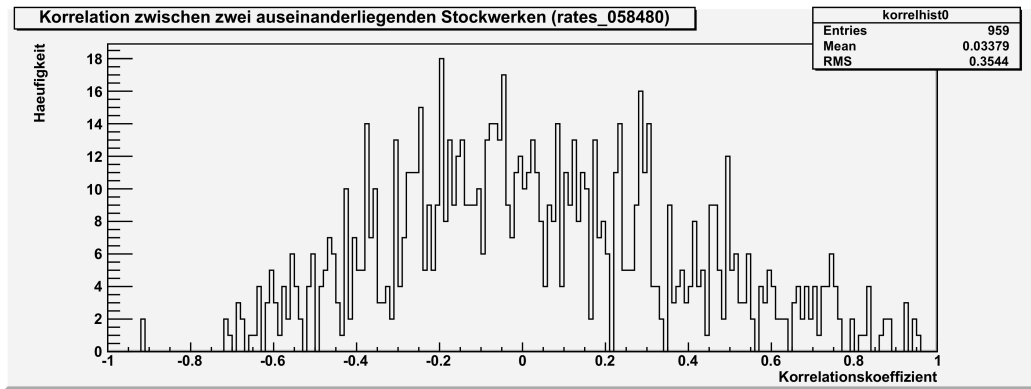


Abbildung 9: Histogramm der Korrelationskoeffizienten der Nullprobe des Runs 058480

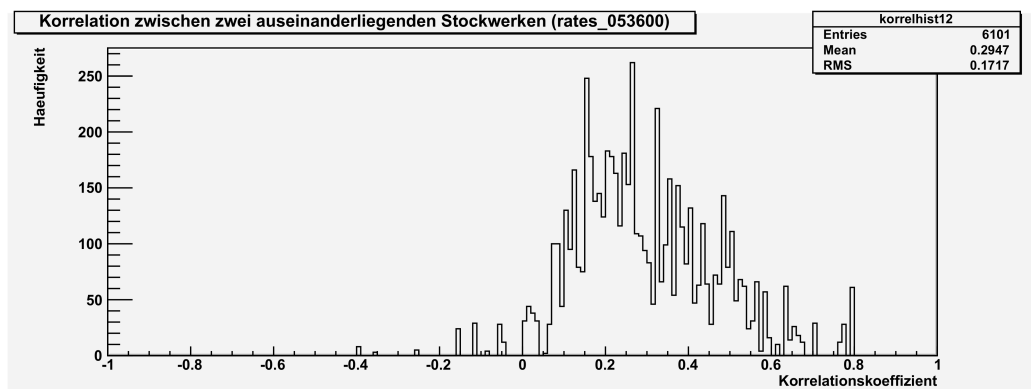


Abbildung 10: Histogramm der Korrelationskoeffizienten der Nullprobe des Runs 05360X

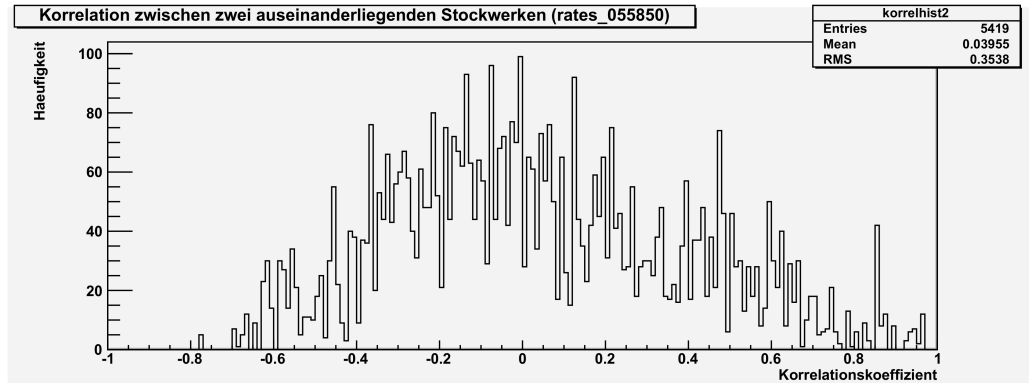


Abbildung 11: Histogramm der Korrelationskoeffizienten der Nullprobe des Runs 05585X

5.4 Korrelationslänge von Biolumineszenz bei ANTA-RES

Es folgt nun eine nähere Beobachtung der Beobachtung, welche in Abschnitt 5.1 gestellt wurde. In dieser wurde festgestellt, dass sich die Korrelationskoeffizienten zirka ab einem Wert von 0.6 von der Nullprobe unterscheiden.

Die Zeit, welche das Licht braucht, um die Strecke über 6 Stockwerke zurückzulegen, ist deutlich kürzer als die Dauer eines TS. Deshalb kann mit einer hohen Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass ein Peak, der im gleichen TS auf mehreren aufeinanderfolgenden Stockwerken ansteigt, von der selben Quelle verursacht wurde.

Trägt man das Verhältnis von KK, welche über 0.6 sind, gegen die Anzahl aller KK des jeweiligen Stockwerks auf, so ist zu sehen mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Peak, der auf dem untersten Stockwerk gefunden wurde, auf dem jeweiligen Stockwerk zu erkennen ist. Die Nullprobe legt die Grenze fest, bis zu welchem Wert des Verhältnisses noch von einer Korrelation ausgegangen werden kann, welche nicht dem Zufall entspringt. Dies wurde für alle drei Runs durchgeführt (s. Abb. 12).

Für die Berechnung der Fehler der geplotteten Werte der Wahrscheinlichkeiten wurde eine Binomialverteilung zugrunde gelegt. Die genaue Bestimmung des Fehlers wird anhand eines Beispiels erläutert. Haben von $n = 1000$ KK $m = 200$ einen Wert über 0.6, so ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein KK über 0.6 liegt, gegeben durch $p = m/n = 0.2$. Die Standardabweichung von m wird über folgende Formel berechnet.

$$\sigma = \sqrt{n \cdot p \cdot (1 - p)} = 160 \quad (6)$$

Anschließend wird σ zu m addiert bzw. von m subtrahiert und durch n geteilt, um die Abweichungen von der Wahrscheinlichkeit p zu bestimmen. Diese werden als Fehler auf das Verhältnis genommen.

$$p_{\pm} = \frac{m \pm \sigma}{n} \quad (7)$$

$$\delta_p = |p - p_{\pm}| = 0.16 \quad (8)$$

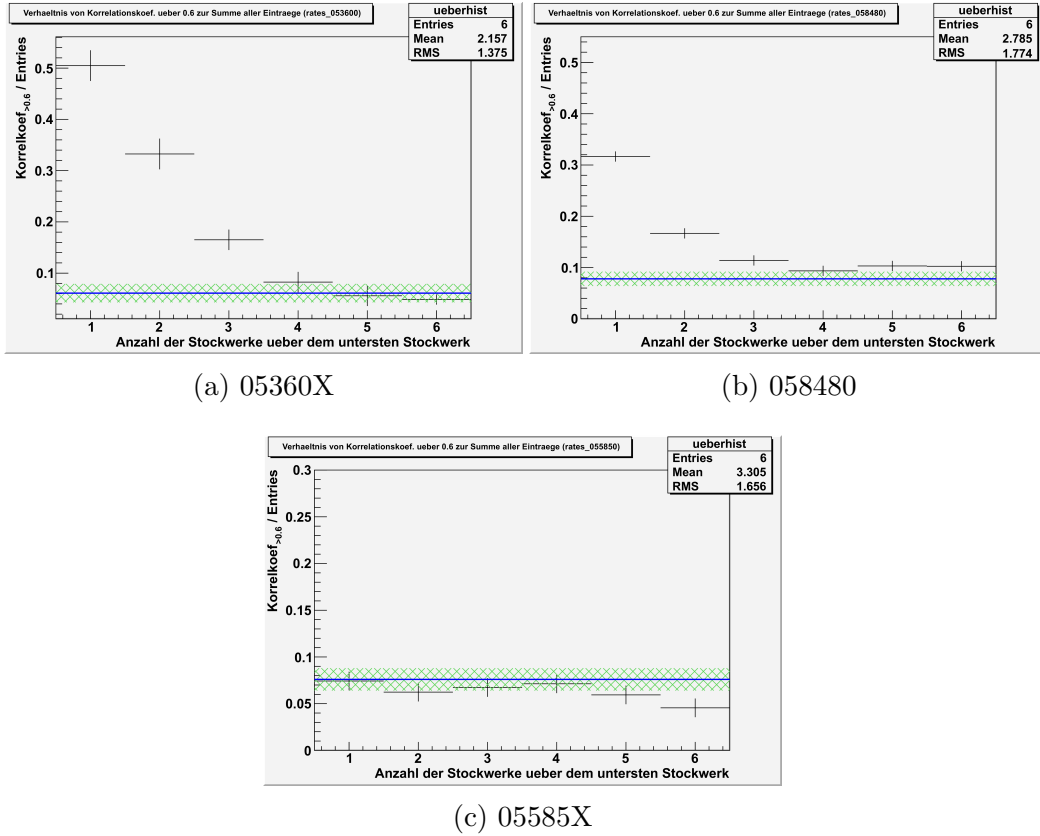


Abbildung 12: Verhältnisse von Korrelationskoeffizienten über 0.6 zur Anzahl aller Einträge von den drei verwendeten Runs. Die blaue Linien sind jeweils die Mittelwerte der Nullproben. Das grüne Gitter um die blaue Linie visualisiert die Standardabweichung.

Man sieht in der Abbildung 12, dass sich die Runs wieder stark voneinander unterscheiden. In der Abbildung 12(a) für die Runs 5360X erkennt man, dass es Peaks gibt, welche auch noch auf bis zu 3 Stockwerken darüber zu sehen sind. Das selbe, nur etwas abgeschwächt, kann man auch bei Run 58480 sehen. Hier sind manche Peaks bis zu 2 Storeys weit nach oben zu erkennen, wohingegen bei Run 5585X keine Korrelationen zwischen Stockwerken zu finden ist. Außerdem sind die Verhältnisse bei (a) deutlich größer als bei (b), was im nächsten Abschnitt besprochen wird.

5.5 Diskussion der Korrelationslänge

Die Absorptionslänge für Licht mit Wellenlängen um 472 nm beträgt zirka 55 m [8], was 3.8 Stockwerken entspricht. Das sieht man auch in den Daten aus Run 5360X, da hier über 3 Stockwerke sichtliche Korrelationen zu finden sind.

Dass bei dem Run 58480 eine deutliche Korrelation nur über 2 Stockwerke und eine geringe über 3 zu sehen ist, lässt sich dadurch erklären, dass es hier, aufgrund der hohen Strömungsgeschwindigkeit, bereits zu unruhig ist. Das heißt, dass es zu viele Peaks pro Zeitfenster gibt, welche unabhängig von dem, für den KK betrachteten, Peak sind. Dies beeinträchtigt die Berechnung des KK.

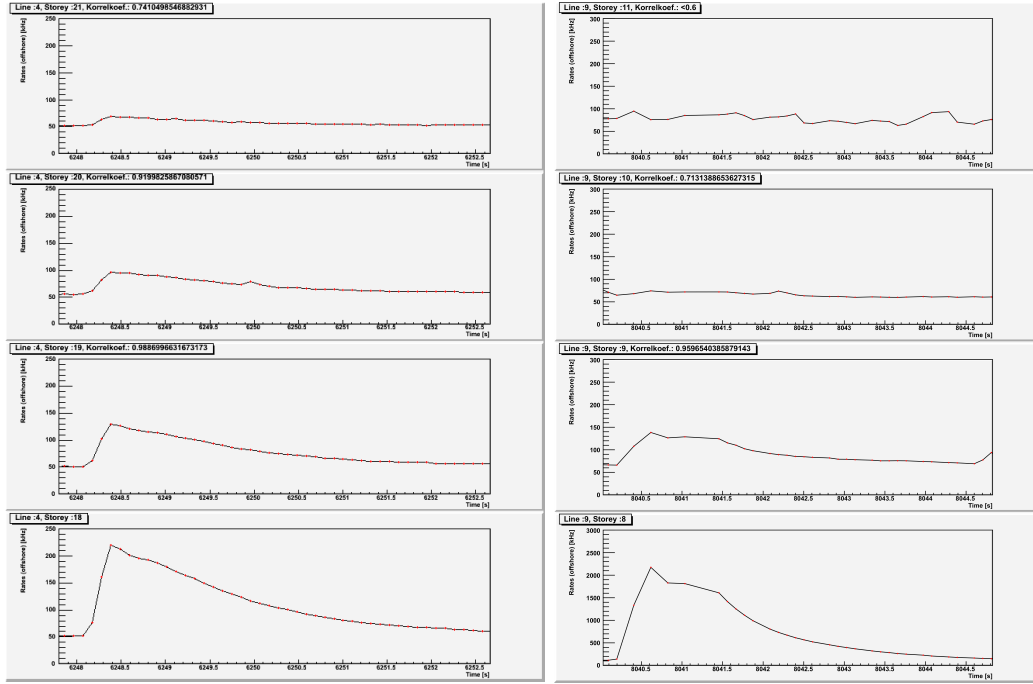
Aufgrund des hohen Sigmas des Runs 5585X von 10.7 kHz (Mittelwert über alle verwendeten Dateien des Datensatzes), was bedeutet, dass die Baseline zeitlich stark schwanken, werden hier keine Korrelationen gefunden. Dies ist darauf zurück zu führen, dass der Ausschlag des Peaks mit steigender Entfernung schwächer wird und somit von der Schwankung überdeckt werden. Auf den Rückgang des Ausschlages wird im Folgenden noch eingegangen.

Die prozentuale Anteile von KK über 0.6, der einzelnen Stockwerke, sind bei 5360X höher als bei 58480. Das bedeutet entweder, dass es im Vergleich zu Run 58480 im Run 5360X weniger Peaks gibt, welche nicht auf mehreren Stockwerken zu sehen sind, oder dass es mehr Peaks gibt, die auf mehreren Storeys zu sehen sind. Da man allerdings in einem festen Zeitraum weniger Peaks findet als im Run 58480, ist die erste der beiden Annahmen wahrscheinlicher. Einen möglichen Zusammenhang könnte man in der unterschiedlichen Meeresströmung finden.

Ein Erklärungsversuch ist, dass ein Großteil der Peaks, welche über mehrere Stockwerke erkennbar sind, von größeren Organismen kommen und der Rest der Peaks von den kleineren. Nimmt man des Weiteren an, dass die kleinen Lebewesen durch eine schnellere Meeresströmung dem Detektor nicht mehr ausweichen können, so würde mit ansteigender Geschwindigkeit des

Meeres die Anzahl an unkorrelierten Peaks zunehmen. Also wenn die Geschwindigkeit der Strömung zunimmt, nimmt die Anzahl an Peaks von kleinen Lebewesen zu und somit sinkt der Anteil an Peaks mit Korrelationen über einige Stockwerke.

In der Abbildung 13 (a) sieht man einen Peak, welcher über 3 Stockwerke weit zu sehen ist. Bei (b) wird ein Peak gezeigt, welchen man nur über 1 weiteres Stockwerk deutlich sehen kann. Die Rate des anfänglichen Peaks sagt dabei nicht aus, wie stark er noch in darüberliegenden Stockwerken zu sehen ist. In diesem Beispiel ist gerade der Peak mit der kleineren Maximalrate ((a): Höhe ca. 220 kHz) auf mehreren Stockwerken besser zu sehen, als der Burst mit dem größeren Maximum ((b): Höhe ca. 2200 kHz). Das liegt daran, dass es sich lediglich um Raten handelt, wie oft Photonen von den OMs registriert wurden. Ohne zu wissen, wie weit die Quelle von dem Stockwerk entfernt ist, kann also keine Aussage darüber getroffen werden, wie viele Photonen die Quelle insgesamt ausgesendet hat.



(a) Run: 53600

(b) Run: 58480

Abbildung 13: Ein Beispiel für Peaks, welche auf noch darüber liegenden Stockwerken erkennbar sind.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden in Daten des ANTARES-Detektors die Peaks von verschiedenen Runs auf Korrelationen über mehrere Stockwerke untersucht. Dafür musste zuerst eine Peakdefinition aufgestellt werden. Mit dieser hat man auf Stockwerken, welche geeignete Stockwerke über sich hatten, nach Peaks gesucht. Diese Peaks wurden auf Korrelationen bei Stockwerken oberhalb dem des Peaks überprüft.

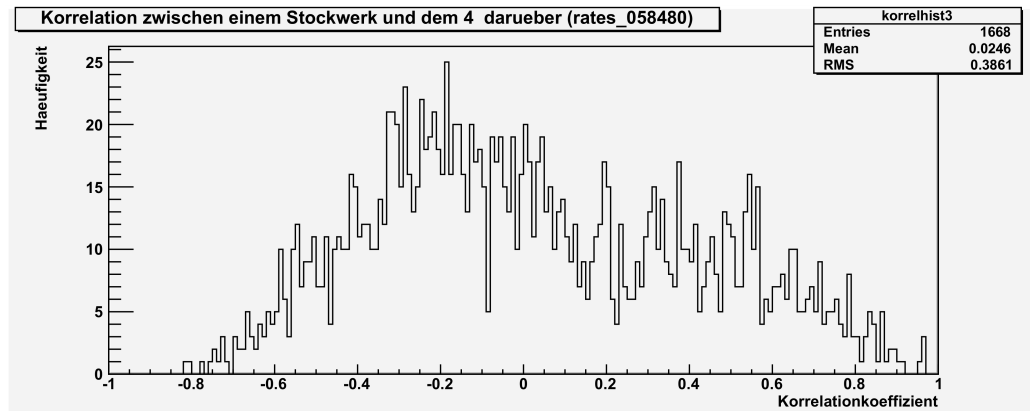
Als Ergebnis bleibt festzuhalten, dass es Peaks gibt, welche über mehrere Stockwerke zu sehen sind. Diese Erkenntnis wurde jedoch nicht bei allen Runs festgestellt. Nur bei den ruhigeren Runs wurden Korrelationen gesehen. Zusammenfassend kann man die Annahme beibehalten, dass es vermutlich zwei Arten von Peaks gibt. Einerseits existieren Peaks, welche über mehrere Stockwerke zu erkennen sind. Andererseits gibt es Peaks, die nur lokal auf einem Stockwerk zu sehen sind. Wobei man diese zwei Arten nicht anhand der Höhe des Peaks festmachen kann.

Weiterführende Untersuchungen könnten sein, dass man nach einem Kriterium forscht, durch welches die zwei Arten von Peaks klar unterschieden werden können. Außerdem könnte die Korrelation mit tiefergelegenen Stockwerken untersucht werden. Mithilfe einer anderen Peakdefinition könnten die Doppelpeaks untersucht werden. Je genauer man die Auswirkungen der biolumineszenten Ereignisse auf die Detektoren versteht, desto besser kann man diese Störfaktoren berücksichtigen. Zum Beispiel können bei den Rekonstruktionen von Neutrino-Ereignissen diese besser mitberechnet werden.

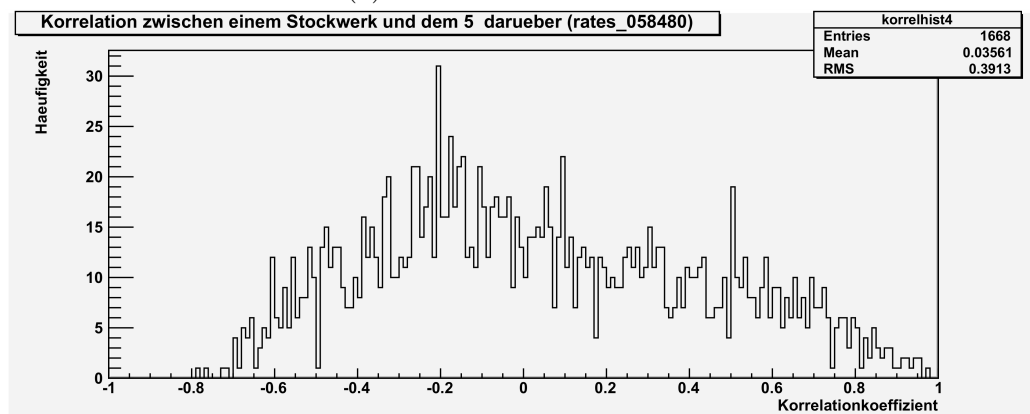
Literatur

- [1] Claus Grupen. *Astroparticle physics*. Springer Verlag, 2005.
- [2] The ANTARES Collaboration. Antares: The first undersea neutrino telescope. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 656: 11–38, November 2011.
- [3] Steven H.D. Haddock, Mark A. Moline, and James F. Case. Bioluminescence in the sea. *Annual Review of Marine Science*, 2(1):443–493, 2010. doi: 10.1146/annurev-marine-120308-081028. URL <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-marine-120308-081028>.
- [4] E. A. Widder. Bioluminescence in the ocean: Origins of biological, chemical, and ecological diversity. *Science*, 328(5979):704–708, May 2010.
- [5] ANTARES Collaboration: S. Escoffier. The ANTARES detector: background sources and effects on detector performance. *ArXiv e-prints*, 2007.
- [6] Amandine Heger Jessica Craig Alain F. Zuur Imants G. Priede, Alan Jamieson. The potential influence of bioluminescence from marine animals on a deep-sea underwater neutrino telescope array in the mediterranean sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 55:1474–1483, November 2008.
- [7] Oskar Schneider. Influence of bioluminescence on the antares data taking and track reconstruction. Master’s thesis, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, July 2013.
- [8] Harold Yepes-Ramirez. Water absorption length measurement with the antares optical beacon system. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 626-627:118–119, January 2011.

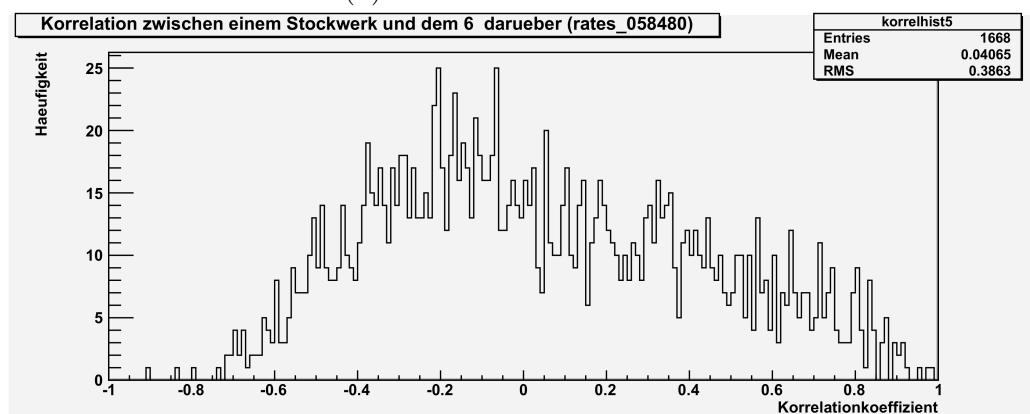
A Zusätzliche Korrelationshistogramme



(a) vier Stockwerke darüber

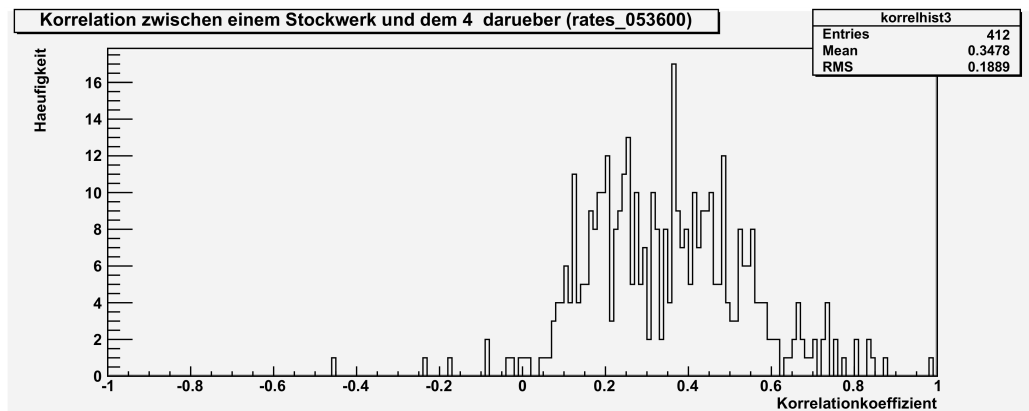


(b) fünf Stockwerke darüber

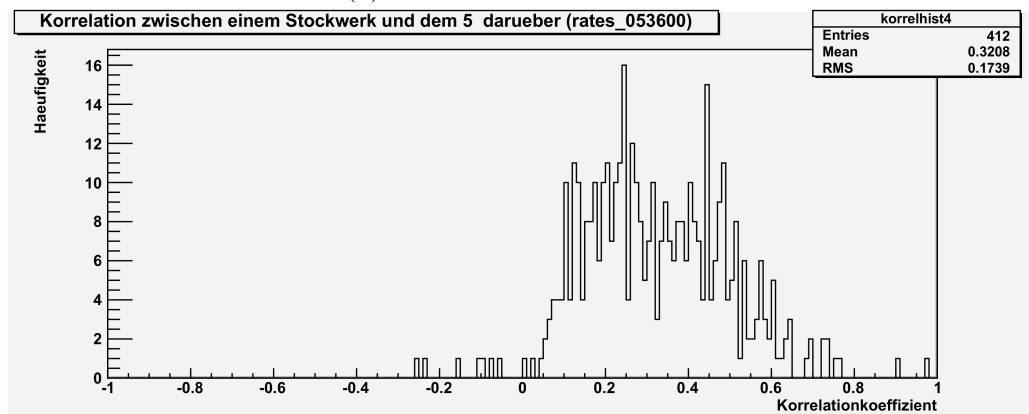


(c) sechs Stockwerke darüber

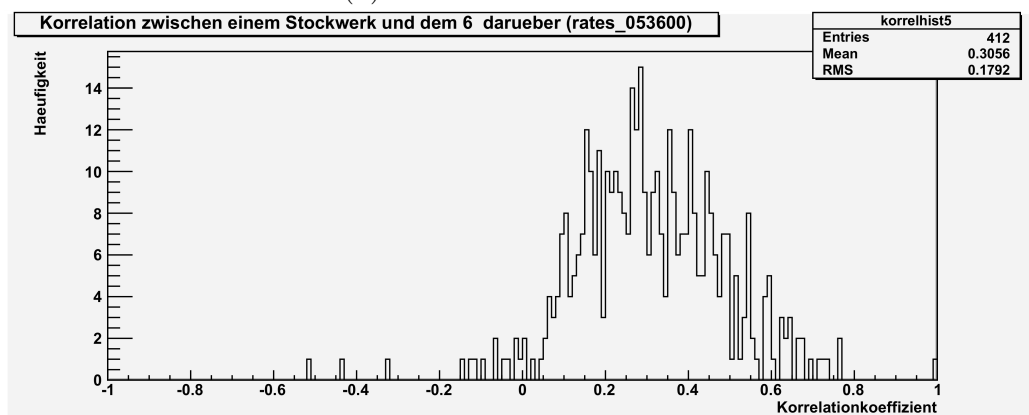
Abbildung A.1: Run 58480: Histogramme mit den Korrelationskoeffizienten für die Stockwerke 4,5 und 6 darüber



(a) vier Stockwerke darüber



(b) fünf Stockwerke darüber



(c) sechs Stockwerke darüber

Abbildung A.2: Run 5360X: Histogramme mit den Korrelationskoeffizienten für die Stockwerke 4,5 und 6 darüber

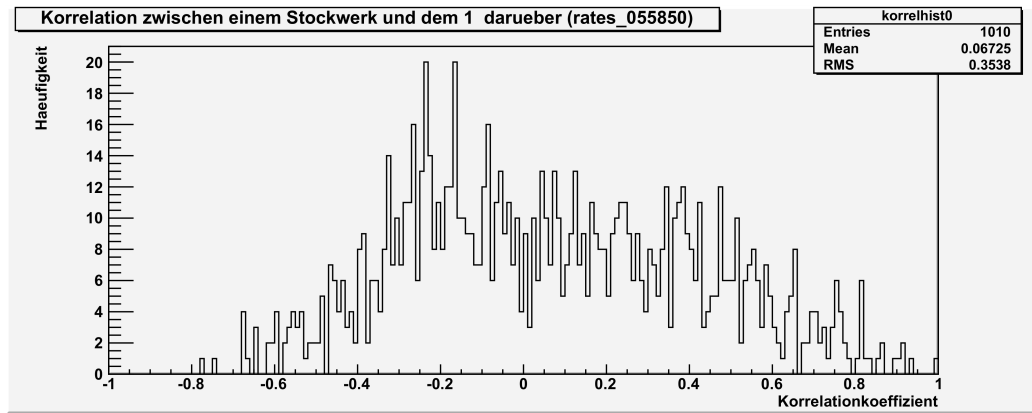


Abbildung A.3: Run 5585X: Histogramm mit den Korrelationskoeffizienten für das erste Stockwerk darüber. (repräsentativ für die Histogramme der höheren Stockwerke)

B Anordnung der Lines des ANTARES-Detektors

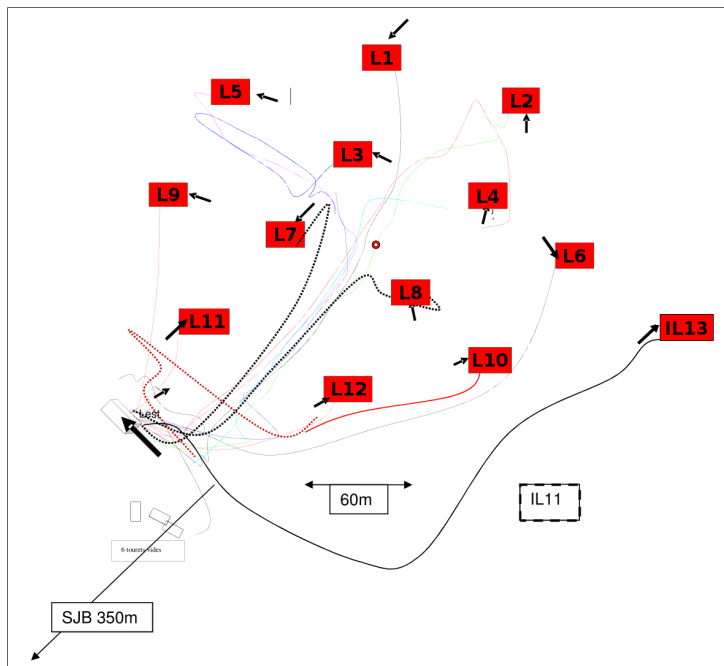


Abbildung B.1: Karte der Anordnung der Lines von ANTARES. Gewählte Line-Paare für die Nullprobe: (1,10);(2,11);(5,6);(1,8);(5,10);(2,7);(6,9);(5,8);(9,10);(1,11);(4,5)

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Bachelorarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt habe.

Erlangen, den 03.08.2015

Maximilian Schandri