

**Netzwerk Teilchenwelt**  
– **Jugendliche und Lehrkräfte erfahren aktuelle Forschung**  
- Experimente mit kosmischen Teilchen -

**Martin Hawner\*\*+, Sascha Schmeling+, Carolin Schwerdt°, Thomas Trefzger\***

\*Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik, Campus Hubland Nord, Emil-Hilb-Weg 22, 97074 Würzburg

+CERN, CH-1211 Genève 23

°DESY Zeuthen, Platanenallee 6, 15738 Zeuthen

[martin.hawner@cern.ch](mailto:martin.hawner@cern.ch), [sascha.schmeling@cern.ch](mailto:sascha.schmeling@cern.ch), [carolin.schwerdt@desy.de](mailto:carolin.schwerdt@desy.de),  
[thomas.trefzger@physik.uni-wuerzburg.de](mailto:thomas.trefzger@physik.uni-wuerzburg.de)

### **Kurzfassung**

Das bundesweit agierende Netzwerk Teilchenwelt ist ein Netzwerk zur Förderung von Teilchenphysik in der Gesellschaft. Hierbei werden vor allem Jugendliche und Lehrkräfte angesprochen, die anhand zweier authentischer Projekte lernen können, wie (Astro-)Teilchenphysiker Erkenntnisse gewinnen. Neben den bereits etablierten Teilchenphysik Masterclasses können die Zielgruppen im Cosmic Projekt mehr über die Messung von kosmischen Teilchen lernen. Im folgenden Beitrag werden neben dem Format des Projekts auch beide Experimente und mögliche Messungen detaillierter vorgestellt. Weiterhin wird auf die Evaluation der Wirksamkeit der Veranstaltungen eingegangen. Hierbei soll untersucht werden inwiefern eine physikbezogene Interessensteigerung durch das Cosmic Projekt hervorgerufen werden kann. Ebenfalls soll ein Vergleich zwischen den Durchführungen in außerschulischen Lernorten und dem Lernort Schule gezogen werden.

### **1. Das Netzwerk Teilchenwelt**

Das Netzwerk Teilchenwelt ist ein Zusammenschluss mehrerer Universitäten und Forschungsinstituten, die sich zum Ziel gesetzt haben Astroteilchen- und Teilchenphysik in der Öffentlichkeit zu fördern (vgl. [1]). Dabei wird der Schwerpunkt auf zwei Veranstaltungen gelegt, nämlich den neu entwickelten Astroteilchenphysik-Masterclasses im Rahmen des Cosmic Projekts und den schon länger eingesetzten Teilchenphysik-Masterclasses. Beide Formate bieten Jugendlichen und Lehrkräften die Möglichkeit Themen der aktuellen Forschung hautnah zu erleben. Hierbei werden zum Beispiel auch reizvolle Experimente wie das ATLAS-Experiment am CERN oder das IceCube-Experiment am Südpol vorgestellt, welche alleine durch ihre Größe und moderne Technik beeindruckend oder auch schon durch den interessanten Standort bestechen.

Bei den Teilchenphysik Masterclasses können echte LHC-Daten, die an Experimenten wie dem ATLAS- oder CMS-Experiment aufgenommen wurden, ausgewertet werden.

Im Rahmen des Cosmic Projekts stehen zwei verschiedene Versuche zur Verfügung, mit denen kosmische Teilchen von Jugendlichen selbständig gemessen werden können.

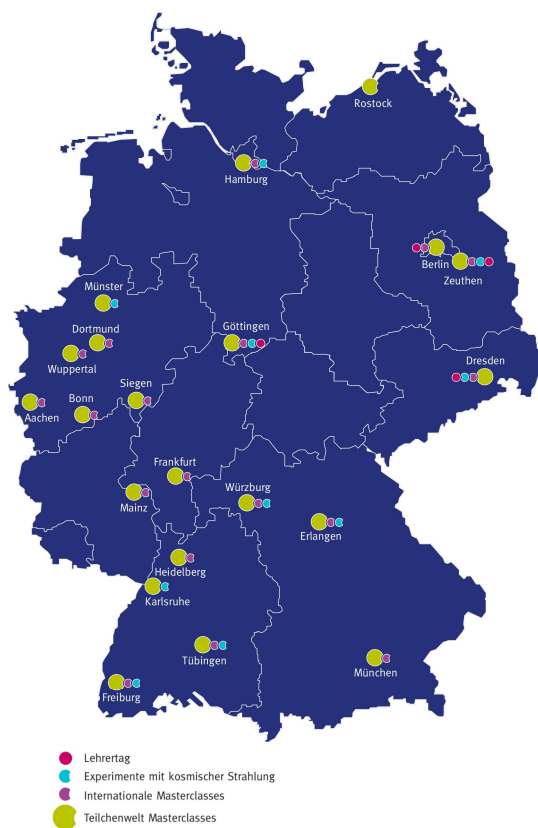
Im Folgenden wird lediglich auf das Cosmic Projekt eingegangen. Weitere Informationen zum Netzwerk

Teilchenwelt und den Teilchenwelt-Masterclasses finden sich jedoch unter [2] und [3].

### **2. Das Cosmic Projekt**

An derzeit 14 deutschen Instituten (siehe Abb. 1) sowie am CERN in Genf haben Jugendliche die Möglichkeit mit den beiden Experimenten, der „Kamiokanne“ (in Anlehnung an das KAMIOKANDE-Experiment in Japan, vgl. [4] und [5]) und dem Szintillationszähler zu arbeiten. Weiterhin besteht für Lehrkräfte die Möglichkeit die Detektoren auszuleihen und somit in die schulische Lernumgebung zu integrieren. Damit fungiert das Cosmic Projekt ähnlich wie die Teilchenphysik-Masterclasses als „mobiles Schülerforschungslabor“ [6].

Die Jugendlichen und Lehrkräfte können verschiedenen Fragestellungen nachgehen. Der zeitliche Rahmen ist dabei zum Teil sehr unterschiedlich und hängt nicht nur von der Art der Untersuchung, sondern auch von der jeweiligen Vertiefung ab. Dadurch ergeben sich verschiedene Möglichkeiten zum Einsatz der Detektoren. Von eintägigen Veranstaltungen an Schulen und Institutionen für ganze Klassen über Unterrichtseinheiten von mehreren Stunden bis hin zu Projektwochen oder monatelangen Forschungsarbeiten einzelner Jugendlicher kann der Bedarf gedeckt werden. Anhand der Detektoren lassen sich einige Phänomene aus der Schulphysik verdeutlichen sowie sehr viel Neues erlernen.



**Abb.1:** 14 von insgesamt 22 Netzwerk Teilchenwelt Standorten bieten Astroteilchenphysik-Projekte an.

Neben dem Kennenlernen des Phänomens der kosmischen Teilchen, welche einen nicht zu vernachlässigenden Anteil an der natürlichen Strahlung haben, soll vor allem die Neugier an Astroteilchenphysik und Naturwissenschaften im Allgemeinen geweckt werden. Weiterhin nutzen die beiden Detektoren Nachweismethoden, die ebenfalls in der heutigen Forschung eine bedeutende Rolle spielen. Somit können die Jugendlichen ein authentisches Experiment durchführen, wodurch der Umgang mit modernen Experimentiertechniken geübt wird und wissenschaftliche Mess- und Analysemethoden eingesetzt werden.

### 3. Die Experimente

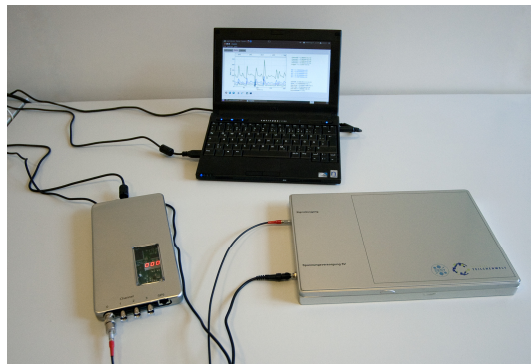
Bei den Experimenten handelt es sich um zwei verschiedene Aufbauten, die im Prinzip das Gleiche messen können. Unterschiede bestehen allerdings in den verwendeten Materialien.

Im Folgenden werden beide Experimente genauer vorgestellt.

#### 3.1. Das Szintillationszähler-Experiment

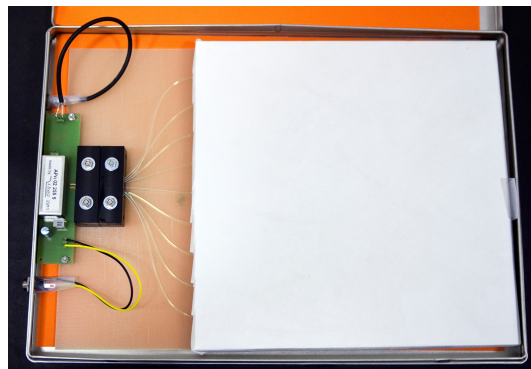
Das Szintillationszähler-Experiment (siehe Abb.2) setzt sich aus drei Szintillatorplatten, an denen Lichtleiter und Silizium-Photomultiplier (SiPM) angebracht sind, zusammen. Die Signale der SiPMs werden an die Datenerfassungskarte (engl.: data acquisition card, kurz: DAQ-Karte) weitergeleitet.

Sie dient als Schnittstelle zwischen Szintillator und Computer und bereitet die Daten so auf, dass sie per Computer ausgewertet werden können.



**Abb.2:** Das Szintillationszähler-Experiment. Auf dem Bild ist nur ein Szintillationszähler (rechts im Bild) angeschlossen. Bis zu drei können an die DAQ-Karte (links im Bild) angeschlossen werden.

Die drei Szintillatorplatten bestehen jeweils aus einem  $200 \times 200 \times 12,5 \text{ mm}^3$  großen Plastikszintillator (siehe auch Abb.3). Fliegt etwa ein kosmisches Myon durch den Detektor, so werden die Atome angeregt und senden beim Übergang in den Grundzustand Lichtquanten aus. Mithilfe der Lichtleiter werden diese zum SiPM weitergeleitet. Der SiPM ist im Gegensatz zu herkömmlichen Photomultipliern (engl.: photomultiplier tube, kurz: PMT) wesentlich kleiner und benötigt eine niedrigere Versorgungsspannung (um die 70V). Das somit erzeugte und verstärkte elektronische Signal wird an die DAQ-Karte weitergegeben. Diese ergänzt das elektronische Signal um eine Zeitinformation und kann je nach eingestellter Schwellenspannung Signale mit zu geringer Intensität (Untergrundrauschen) herausfiltern. Die DAQ-Karte wurde vom QuarkNet-Projekt des Fermilab (USA) übernommen. (Dort werden schon seit Jahren Experimente mit kosmischen Teilchen an Instituten und Schulen gemacht und das dort entwickelte Cosmic-Ray e-Lab erhält regen Zuspruch (vgl. [7]).)



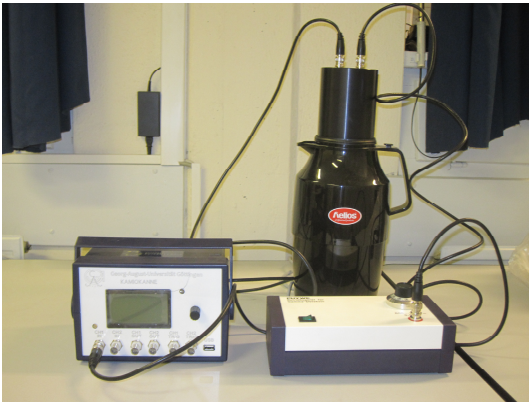
**Abb.3:** Innenansicht des Szintillationszählers. Man erkennt v.l.n.r. ein Hochspannungsmodul, den eingebauten Photomultiplier, Lichtleiter und den in Papier gehüllten Szintillator.

Mit Hilfe einer am DESY Zeuthen entwickelten Software können die Daten mit einem Computer aufgenommen und analysiert werden. Auch ist eine eigenständige Analyse der Rohdaten möglich.

Weitere Informationen zum Szintillationszähler-Experiment finden sich unter [8]. Technische Details zur Datenverarbeitung können unter [9] nachgelesen werden.

### 3.2. Das Kamiokannen-Experiment

Die Kamiokannen wurden zunächst an der Universität Mainz entworfen und in [10] dokumentiert. Nach mehrjähriger Weiterentwicklung werden sie an der Universität Göttingen zur Serienreife gebracht.



**Abb.4:** Das Kamiokannen Experiment. Eine weitere Thermoskanne mit Photomultiplier könnte an die Messelektronik angeschlossen werden.

Das Kamiokannen-Experiment besteht aus zwei mit Wasser gefüllten Thermoskannen, die als Detektionsvolumen dienen (siehe Abb. 4). Der Nachweis von energiereichen Teilchen erfolgt über den Cherenkov-Effekt. Fliegt etwa ein kosmisches Myon durch eine der Thermoskannen hindurch, so wird Cherenkov-Licht erzeugt. (Dies passiert allerdings nur unter der Voraussetzung, dass sich das Teilchen schneller als Licht in Wasser bewegt.) Die schwachen Lichtsignale werden anschließend von den aufgesetzten PMTs registriert. Hierbei werden herkömmliche „Photomultiplier Tubes“, welche mit Hochspannung versorgt werden, verwendet. Mit Hilfe der Messelektronik, können die vom PMT gelieferten Signale ausgelesen und auf einem USB-Stick gespeichert werden. Auch hier ist eine Schwellenspannung zur Unterdrückung von Untergrundrauschen einstellbar. Anschließend können die gespeicherten Daten bei einer ausführlicheren Analyse am Computer ausgewertet werden.

### 4. Mögliche Messungen

Im Cosmic Projekt des Netzwerk Teilchenwelt werden einige Beispieleexperimente, die man mit den beiden Detektoren durchführen kann, vorgeschlagen. Dies gilt auch für die zeitlich eingeschränkten Cosmic-Masterclasses. In längerfristigen Projekten an Universitäten oder Schulen, werden die Jugendlichen allerdings dazu ermuntert eigenständig Hypo-

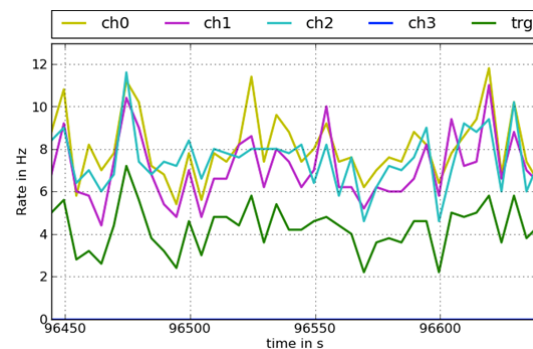
thesen aufzustellen, welche anschließend getestet werden können. Hierbei wird bewusst auf den Forschungsdrang und die Kreativität der Schüler gesetzt.

Im Folgenden werden beispielhaft am Szintillationszähler-Experiment die „Standardmessungen“ vorgestellt. Grundsätzlich sind ähnliche Messungen mit den Kamiokannen möglich.

### 4.1. Ratenmessung

Die Ratenmessung ist eine grundlegende Messung im Bereich der Astroteilchenphysik. Zum Beispiel können große Astroteilchenphysikexperimente anhand der Bestimmung der Myonenzahl in einem Teilchenschauer auf die Art des Primärteilchens schließen. Bei den Experimenten des Cosmic Projekts kann die Ratenmessung den stochastischen Charakter der kosmischen Strahlung darlegen.

Zum Einstieg eignet sich eine Variation der Messzeiten zur Bestimmung der Rate. Hierbei kann etwa eine Messung von 10 Sekunden ein signifikant unterschiedliches Ergebnis als eine Messung von drei Minuten ergeben. Aus diesen Beobachtungen können vertiefende Diskussionen über Produktion und Herkunft der kosmischen Myonen als auch den Messeigenschaften des Detektors geführt werden.



**Abb.5:** Ratenmessung mit dem Szintillationszähler-Experiment. Bei der Aufnahme sind drei Szintillationszähler angeschlossen. In grün wird der Triggerkanal angezeigt.

Ein weiterer Versuch ist zum Beispiel eine Messung mit festgelegter Messzeit mehrmals zu wiederholen. Anschließend kann die Häufigkeit gemessener Raten gezählt werden und in einem Diagramm aufgetragen werden. Die erzeugte Kurve sollte einer Poissonverteilung ähneln.

### 4.2. Winkelverteilung der kosmischen Strahlung

Die Frage aus welcher Richtung die meisten kosmischen Myonen kommen, ist eine interessante Fragestellung, die ebenfalls mit dem Detektor beantwortet werden kann. Hierbei ist eine Ratenmessung bei verschiedenen Winkelausrichtungen der zueinander parallelen Detektoren notwendig. Die Messzeit pro gewählter Winkelseinstellung sollte dabei jeweils konstant und nicht zu kurz (mindestens fünf Minuten) gewählt werden, da bei vertikaler Ausrichtung der Platten kaum noch Signale registriert werden

und somit große Schwankungen bei zu kurzer Messzeit vorkommen können. Ebenfalls spielt das Rauschen bei geringer Rate eine größere Rolle. Bei diesem Experiment wird im Zweier- oder Dreierkoinzidenzmodus gemessen. Das heißt, der Triggerkanal zeichnet nur Daten auf, wenn ein Signal innerhalb kürzester Zeit (ca. 50 ns) in zwei oder drei Detektoren registriert wurde.

Als Vorübung kann hier zunächst der Plattenabstand variiert werden. Hierbei wird beobachtet, dass bei größerem Plattenabstand die Rate sinkt. Dies ist auf die Verkleinerung des Messbereichs zurückzuführen. Folglich wird die Messung der Winkelabhängigkeit genauer, wenn man einen großen Plattenabstand wählt. Um den Effekt zu zeigen, reichen erfahrungsgemäß aber schon ca. 30 cm Plattenabstand.

Es empfiehlt sich, das Ergebnis danach gründlich zu diskutieren, da die Winkelverteilung von vielen Faktoren abhängt. Vertiefend kann hierbei ebenfalls das Phänomen der Nordlichter und der Ost-West-Asymmetrie der kosmischen Strahlung im Kontext des Erdmagnetfeldes diskutiert werden.

#### 4.3. Durchdringungsvermögen von kosmischen Myonen

Die Frage, von welchen Materialien Myonen überhaupt gestoppt werden können, kann von Jugendlichen ebenfalls mit den Detektoren beantwortet werden. Hierfür können verschiedene oder gleiche Materialien unterschiedlicher Dicke über den Detektor gehalten werden. Je nach Material nimmt die Rate mehr oder weniger stark ab oder bleibt sogar unverändert. Eine einfache Weise dies zu testen, ist in verschiedenen Stockwerken zu messen. Dies kann gut in Universitäts- oder Schulgebäuden durchgeführt werden.

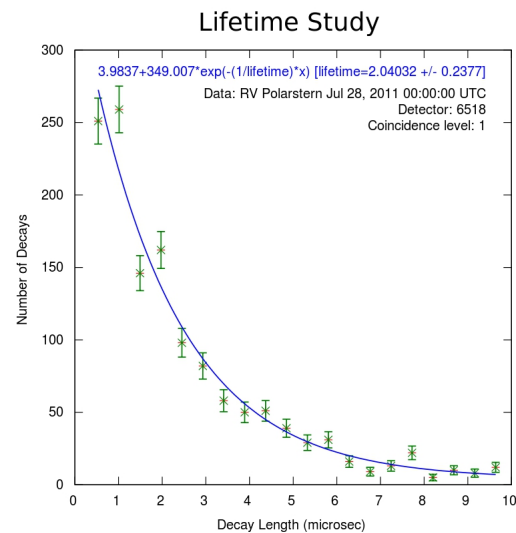
#### 4.4. Lebensdauerermessung von Myonen

Eine sehr interessante Messung ist die Lebensdauerermessung der Myonen. Bei dieser faszinierenden Aufgabe wird schnell festgestellt, dass die Myonen eigentlich gar nicht auf der Erdoberfläche ankommen dürften, da sie nach klassischer Rechnung nur etwa 600 m weit fliegen, wenn man ihre Geschwindigkeit mit annähernd Lichtgeschwindigkeit abschätzt. Dieses Paradoxon kann mit Hilfe der Relativitätstheorie erklärt werden. Der Versuch eignet sich somit hervorragend zur experimentellen Bestätigung dieser. Weiterhin kann eine Verbindung zu physikalischen Zerfallsgesetzen hergestellt werden.

Um die Lebensdauerermessung durchzuführen, wird der Detektor so eingestellt, dass ein Myon, welches im Detektor gestoppt wird und kurze Zeit später zerfällt, beobachtet werden kann. Dazu benutzt man alle drei Szintillatorplatten und wählt die Schaltung so, dass ein Myon nur dann registriert wird, wenn es durch die erste und zweite, nicht aber durch die dritte Platte fliegt. Alle Myonen, die diese Bedingung erfüllen, lösen ein 20  $\mu$ s langes Zeitfenster aus, innerhalb dessen auf ein zweites Signal in Platte 2 gewartet wird. Dieses zweite Signal stammt vom

Zerfallsprodukt des Myons. Der zeitliche Abstand zwischen Signal 1 und Signal 2 wird die individuelle Lebensdauer  $\tau_i$  des Myons genannt. Diese Zeiten müssen nun von einer Vielzahl von Myonen gesammelt werden. Da das Steckenbleiben von Myonen im Detektor recht selten vorkommt, ist mindestens eine Messzeit von 24 Stunden nötig.

Um zu verstehen, wie aus diesen Daten die Lebensdauer herausgelesen werden kann, macht man sich am besten klar, dass der Zerfall eines Myons wie ein radioaktiver Zerfall funktioniert. Die Menge der gestoppten Myonen kommt aus einer imaginären Probe. Dabei spielt es keine Rolle, wie weit die Myonen vom Detektor entfernt sind oder wann sie entstanden sind, da bei einer radioaktiven Probe auch nur diejenigen Kerne registriert werden, welche gerade zerfallen. Die restlichen Kerne können prinzipiell beliebig weit vom Detektor entfernt sein, was in unserem Fall für die Myonen zutrifft (siehe auch [11]).



**Abb.6:** Lebensdauerermessung von Myonen. Es wurde ein Messbereich bis 10  $\mu$ s gewählt und in 20 Intervalle unterteilt.

Mit dem Einfang von Myonen und dem Messen der Zeit vom Eintreffen im Detektor bis zum Zerfall wird die Aktivität

$$A(t) = A_0 e^{-t/\tau} \quad \{1\}$$

gemessen. Nun kann eine Häufigkeitsverteilung aufgestellt werden, in dem man zählt, wie viele Myonen im Intervall zwischen 1 und 2  $\mu$ s, 2 und 3  $\mu$ s, 3 und 4  $\mu$ s etc. zerfallen sind. (Die Intervalle können ebenfalls kleiner gewählt werden.) Diese Häufigkeitsverteilung der Anzahl zerfallener Myonen entspricht der Aktivität und verläuft erwartungsgemäß exponentiell (siehe Abb.6). Anhand der Werte kann die Halbwertszeit  $T_{1/2}$  oder anhand eines Fits die Lebensdauer der Myonen ausgelesen werden. Beide Zeiten können über folgende Formel ineinander umgerechnet werden.

$$T_{1/2} = \tau \ln 2 \quad \{2\}$$



In Abb.6 ist eine Verteilung der gemessenen Zeiten dargestellt. Es wurde mit Hilfe eines Programms der Cosmic Ray e-Lab Homepage [7] eine e-Funktion gefittet und die entsprechende Lebensdauer zu  $\tau = 2.04032 \pm 0.2377 \mu\text{s}$  bestimmt.

### 5. Evaluation

Das Projekt wird durch eine Evaluationsstudie begleitet, die die Wirksamkeit der Veranstaltungen untersucht, wobei sich auf die eintägigen Formate beschränkt wird. Hierbei wird das Hauptaugenmerk auf interessensteigernde Faktoren gelegt, wobei sich hauptsächlich auf das situationale Interesse nach Krapp (vgl. [12]) konzentriert wird. In zahlreichen Studien zu außerschulischen Lernorten, die sich mit naturwissenschaftlichen Themen beschäftigen, wurden bereits ein Anstieg des aktuellen Interesses beobachtet (vgl. z.B. [13], [14]). Dabei werden auch verschiedene Rahmen diskutiert, welche vor allem von der Frage der langfristigen Steigerung des Interesses, also des persönlichen Interesses, motiviert wurde. Dieser Frage sind zum Beispiel Glowinski [14] und Guderian [15] nachgegangen, die sich mit mehrmaligen Besuchen der Schülerlabore und deren Unterrichtseinbindung auseinandersetzen. Auch Scharfenberg [16] untersuchte im Bereich der Biologie ein Schülerlabor und zog hier unter anderem den Vergleich zwischen einer Lehrinheit am Schülerlabor und in der Schule, wobei vor allem auf die motivierenden Faktoren Wert gelegt wurde. Bei dem Vergleich der Lernorte hat allerdings keine experimentelle Betätigung der Jugendlichen stattgefunden. Die angedachte Studie im Cosmic Projekt kann aufgrund der Handlichkeit der Detektoren ebenfalls in der Schule durchgeführt werden, so dass hier unter der Berücksichtigung der experimentellen Einheiten ein direkter Vergleich zwischen schulischem und außerschulischem Lernort gezogen werden kann.

Zusammenfassend sollen folgende Forschungsfragen untersucht werden:

- a) Ist eine Steigerung des physikbezogenen Interesses zu beobachten? Welche Eigenschaften des Cosmic Projekts sind gegebenenfalls dafür verantwortlich?
- b) Ist bezüglich des Interesses ein Unterschied zwischen den Veranstaltungen im schulischen und außerschulischen Kontext festzustellen? Welche Faktoren stehen damit im Zusammenhang?

### 6. Ausblick

Eine Pilotstudie soll bis Ende September 2012 durchgeführt werden. Nach eventueller Modifikation ist anschließend eine einjährige Erhebung für die Hauptstudie geplant.

Weiterhin werden Begleitmaterialien für die Experimente erstellt und weiterentwickelt, die den Umgang mit den Detektoren vereinfachen sollen. Dabei werden zum einen physikalische Grundlagen und

Funktionsweisen der Detektoren erklärt, zum anderen Messungen vorgestellt und Hinweise zur Auswertung gegeben.

### 7. Literatur

- [1] Netzwerk Teilchenwelt Homepage: <http://www.teilchenwelt.de> (Stand: 5/2012)
- [2] Gedigk, Kerstin; Glück, Anne; Kobel, Michael (2011): Netzwerk Teilchenwelt – Ein mobiler Lernort für Teilchenphysik. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, Heft 2, Jahrgang 60, 2011, S. 29-33
- [3] Bilow, Uta; Jende, Konrad; Kobel, Michael; Pospiech, Gesche (2011): Das Konzept „Masterclass“ – Schüler beschäftigen sich mit dem LHC. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, Heft 2, Jahrgang 60, 2011, S. 22-28
- [4] Homepage des KAMIOKANDE Experiments: <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/kam/kamiokande.html> (Stand: 5/2012)
- [5] Homepage des Super-Kamiokande Experiments: <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html> (Stand: 5/2012)
- [6] Gedigk, Kerstin; Kobel, Michael, Pospiech, Gesche (2011): Jugendliche erleben aktuelle Teilchenphysikforschung – Untersuchung der Wirkung auf physikbezogene Interessen. In: GDGP Jahresband 2011
- [7] Homepage des Fermilab Cosmic Ray e-Lab: <http://www.i2u2.org/elab/cosmic/> (Stand: 5/2012)
- [8] Homepage des Schülerlabors „Physik Begreifen“ am DESY Zeuthen: [http://physik-begreifen-zeuthen.desy.de/angebote/kosmische\\_teilchen/](http://physik-begreifen-zeuthen.desy.de/angebote/kosmische_teilchen/) (Stand: 5/2012)
- [9] Rylander, Jeff; Jordan, Tom; Paschke, Jeremy; Berns, Hans-Gerd (2010): QuarkNet Cosmic Ray Muon Detector User’s Manual – Series “6000” DAQ. <http://www.i2u2.org/elab/> (Stand: 5/2010)
- [10] Fuidl, Matthias (2003): Kosmische Myonen in Schulversuchen. Staatsexamensarbeit, Universität Mainz, <http://www.iph.uni-mainz.de/551.php> (Stand: 5/2012)
- [11] Mühry, Heini; Ritter, Patrick (2002): Wie man Myonen einfängt und ihre Lebensdauer misst. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule. 4/51. Jg., 2002, S. 23-27
- [12] Krapp, Andreas (1998): Entwicklung und Förderung von Interessen im Unterricht. In: Psychologie in Erziehung und Unterricht. 44. Jg., S.185-201

- [13] Engeln, Katrin (2004): Schülerlabors: authentische, aktivierende Lernumgebungen als Möglichkeit, Interesse an Naturwissenschaften und Technik zu wecken. Dissertation, Logos-Verlag Berlin
- [14] Glowinski, Ingrid (2007): Schülerlabore im Themenbereich Molekularbiologie als Interesse fördernde Lernumgebung. Dissertation, Universität Kiel
- [15] Guderian, Pascal (2007): Wirksamkeitsanalyse außerschulischer Lernorte – Der Einfluss mehrmaliger Besuche eines Schülerlabors auf die Entwicklung des Interesses an Physik, Dissertation, Humboldt-Universität zu Berlin
- [16] Scharfenberg, Franz-Josef (2005): Experimenteller Biologieunterricht zu Aspekten der Gentechnik im Lernort Labor: empirische Untersuchung der Akzeptanz, Wissenserwerb und Interesse. Dissertation, Universität Bayreuth