

FACHARBEIT  
im Grundkurs Physik

Messung der kosmischen Strahlung –  
Myonenlebensdauer und -Rate

Verfasserin: Fabiola Buschendorf

Kurslehrer: Frank Knefel

Themenstellung am: 10. Februar 2012

Abgabetermin: 23. April 2012

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b> .....	<b>3</b>
<b>2 Geschichtlicher Hintergrund</b> .....	<b>3</b>
2.1 Entdeckung der kosmischen Strahlung.....	4
2.2 Entdeckung des Myons.....	6
<b>3 Theoretischer Hintergrund</b> .....	<b>6</b>
3.1 Standardmodell der Teilchenphysik.....	6
3.2 Die schwache Wechselwirkung .....	8
3.3 Entstehung der Myonen.....	8
3.4 Eigenschaften kosmischer Myonen und Myon-Paradoxon.....	9
3.5 Nachweismethode Cherenkov-Effekt.....	10
3.6 Der Photoeffekt.....	11
<b>4 Der Photomultiplier</b> .....	<b>12</b>
<b>5 Versuchsdurchführung</b> .....	<b>12</b>
5.1 Versuchsaufbau.....	13
5.2 Untergrundmessung.....	13
5.3 Signalmessung.....	14
5.4 Auswertung.....	14
<b>7 Anhänge</b> .....	<b>18</b>
Erklärung.....	25

## 1 Einleitung

Diese Arbeit handelt von einem Versuch, der die Existenz von kosmischen Myonen mit Hilfe eines Detektors nachweist, mit dem Ziel die Eintreffrate und die Lebensdauer dieses Teilchens zu bestimmen. Der hier verwendete Detektor wird im Allgemeinen „Kamiokande“ genannt, eine Abwandlung des „Super-Kamiokande-Experiments“, welches mithilfe des Cherenkoeffektes Neutrinos untersucht. Der Cherenkoeffekt wird im Verlauf der Arbeit noch erläutert.

Zunächst wird ein Blick auf die geschichtliche Entwicklung der (Astro-) Teilchenforschung geworfen, um dann das im Zentrum dieser Facharbeit stehende „Myon“ näher zu erklären. Darüber hinaus werden verschiedene Technologien zur Untersuchung der kosmischen Strahlung und wichtige physikalische Phänomene (wie z.B. der Photoeffekt) erläutert. Diese Grundlagen dienen dem Verständnis des zentralen Versuchs.

Ich habe dieses Thema gewählt, weil mich die Astro- und Teilchenphysik sehr interessiert und ich mein Wissen in diesem Bereich erweitern möchte.

## 2 Geschichtlicher Hintergrund

Das Myon ist ein Elementarteilchen, welches auf der Erde in der kosmischen Strahlung detektiert werden kann. Es wird auch als die „harte Komponente“ der Strahlung bezeichnet, weil es eine große Reichweite in Materie (z.B. in der Erdatmosphäre) hat.<sup>1</sup>

Die Idee der „Kamiokande“ war es, das Super-Kamiokande-Experiment im kleinen Maßstab nachzustellen. Dieses Experiment befindet sich 1000 m tief in der stillgelegten „Kamioka-Mine“ in Japan, in die ein stählerner Tank mit ca. 50.000 Tonnen Wasser, ausgestattet mit rund 13.000 Photomultipliern (PMT, Photoelektronenvervielfacher) eingebaut wurde. Auch in der „Kamiokande“, einer mit Folie ausgelegten Thermoskanne und einem aufgeschraubten Photomultiplier, befindet sich Wasser in dem Myonen durch den Cherenkoeffekt

---

1 Vgl. Berger, C.: Elementarteilchenphysik, S. 20

nachgewiesen werden können.<sup>2</sup> Es wird eine Thermoskanne genutzt, da sie ideal gegen äußere Einflüsse isoliert ist.

## 2.1 Entdeckung der kosmischen Strahlung

Die kosmische Strahlung wurde 1912 von Viktor Franz Hess entdeckt (Nobelpreis 1936). Seine Messungen mit Heißluftballons in Höhe von 5 km zeigen, dass sich die ionisierende Strahlung verstärkt, je höher die Messung angesetzt wird (siehe Abb. 5 im Anhang).<sup>3</sup> Zu diesen gewagten Flügen motivierte ihn ein Problem, das dem Physiker von damals stark beschäftigte. Ende des 19. Jahrhunderts beschäftigten sich Forscher mit der Elektrizität der Atmosphäre. Zur Untersuchung dessen stellten sie einen Metallzylinder her, der so effektiv gegen die Erde isoliert war, dass er fähig sein sollte seine elektrische Ladung zu halten. Die Forscher luden den Zylinder elektrisch auf, mussten dann aber feststellen, dass der Körper nach einiger Zeit seine Ladung wieder verlor.<sup>4</sup>

Schon Jahrhunderte vor diesem Versuch, im Jahre 1785, zeigte Coulomb, dass ein elektrisch geladener Metallkörper, der in der Luft aufgestellt ist, seine Ladung verliert. Diesen Effekt nannte er „Elektrizitätsstreuung“. Er behauptete auch, dass dieses Phänomen nicht aufgrund mangelnder Isolierung auftritt, sondern durch die Leitung der Elektrizität durch die Luft erfolgt.<sup>5</sup>

Erst im späten 19. Jahrhundert, bei der Untersuchung der Radioaktivität, wurde herausgefunden, dass durch radioaktive Strahlung (bzw. „Ionisierende Strahlung“) die Leitfähigkeit der Atmosphäre erhöht werden kann. Die neutral geladenen Moleküle in der Luft werden durch die Strahlung in negative und positive Ionen gespalten und somit von z.B. dem geladenen Metallzylinder abgestoßen bzw. angezogen. Dadurch wird dieser langsam entladen.<sup>6</sup>

Es wurde vermutet, dass diese Ionisierung durch energiereiche Teilchen aus dem Kosmos verursacht wurde, also musste die Leitfähigkeit der Luft mit grö-

2 Vgl. <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/about/intro-e.html>, 10.4.12, S. 1

3 Vgl. Grupen, C.: Astroparticle Physics, S. 3

4 Vgl. Federmann, G.: Viktor Hess und die Entdeckung der Kosmischen Strahlung, S. 7

5 Vgl. ebenda

6 Vgl. Federmann, G.: Viktor Hess und die Entdeckung der Kosmischen Strahlung, S. 8

berer Höhe ansteigen, welches Viktor F. Hess durch seine Messungen im Heißluftballon bestätigen konnte. Im Jahre 1924 etablierte sich durch den amerikanischen Physiker Robert Millikan der Begriff „kosmische Strahlung“.<sup>7</sup>

Da nun feststand, dass die Leitfähigkeit der Luft auf Ionisation durch die kosmische Strahlung beruht, beschäftigten sich 1929 die beiden deutschen Forscher Werner Kolhörster und Walter Bothe mit der Frage, aus welchen Teilchen sie bestehe. Damals wurde vermutete sie wäre eine hochenergetische  $\gamma$ -Strahlung, also wollten die beiden diese Vermutung durch Experimente mithilfe zweier Geiger-Müller-Zählrohre bestätigen. Dieses Zählrohr ist ein Detektor für unter anderem Gammastrahlung und besteht aus einem Metallrohr, in dem sich ein Gas befindet (meistens ein Edelgas). Trifft in dieses mit Gas gefüllte Rohr ionisierende Strahlung ein, werden die Gasatome ionisiert und setzen Elektronen frei, die sich in dem elektrischen Feld des Rohrs zur Anode hinbewegen und dort nachgewiesen werden können.<sup>8</sup>

Wird dann ein Elektron durch ein  $\gamma$ -Teilchen aus seinem Atom geschlagen, kann es im ersten Zählrohr detektiert und durch seinen schnellen Flug fast gleichzeitig auch im zweiten Zählrohr nachgewiesen werden. Um die Energie des Elektrons zu bestimmen, trennten sie die beiden Zählrohre durch Goldbarren und stellten fest, dass sich ganze 75% der sogenannten „Koinzidenzen“ (zeitliches/räumliches Zusammentreffen von Ereignissen) durch diesen nicht aufhalten ließen. Die „Koinzidenzzählung“ verhalf den Physikern zu dem Schluss, dass ein so energiereiches Elektron, welches beide Rohre und den Goldbarren durchqueren kann, nicht durch einen Stoß mit einem  $\gamma$ -Teilchen stammen kann, sondern ein Teilchen aus der kosmischen Strahlung sein musste. Sie konnten damit beweisen, dass die sekundäre kosmische Strahlung, die von der primären kosmischen Strahlung durch Wechselwirkung mit unserer Atmosphäre erzeugt wird, aus elektrisch geladenen Teilchen besteht.<sup>9</sup>

---

7 Vgl. <http://www.weltderphysik.de/gebiet/astro/kosmische-strahlung/die-energiereichsten-himmelskoerper/>, 10.4.12, S. 1

8 Vgl. Federmann, G.: Viktor Hess und die Entdeckung der Kosmischen Strahlung, S. 74 f.

9 Vgl. Federmann, G.: Viktor Hess und die Entdeckung der Kosmischen Strahlung, S. 75 f.

## 2.2 Entdeckung des Myons

Ende des 20. Jahrhunderts fand Carl David Anderson mithilfe von sogenannten Nebelkammern heraus, dass die sekundäre kosmische Strahlung aus Elektronen und deren „böser Zwillings“ dem positiv geladenen *Positron* besteht. In einer Nebelkammer kann die Bahn eines Teilchens visualisiert und somit identifiziert werden.<sup>10</sup> Zusammen mit Viktor F. Hess bekam er dafür 1936 den Nobelpreis.<sup>11</sup>

Trotzdem traten noch weitere Ungereimtheiten auf. Anderson beobachtete in der Nebelkammer weitere Teilchen, die genau wie das Elektron und das Positron negativ bzw. positiv geladen waren, jedoch eine viel höhere Masse aufwiesen. Diese Masse der neuen Teilchen liegt zwischen denen der Elektronen und Protonen. Nach einigen Jahren der Forschung fand Anderson mit seinem Kollegen Seth Neddermeyer heraus, dass die Masse des neuen Teilchens etwa 250 mal so groß war wie die des Elektrons und nannten es „Myon“.<sup>12</sup> Wie genau sich das Myon aus der primären kosmischen Strahlung ergibt wird im nächsten Kapitel erläutert.

## 3 Theoretischer Hintergrund

### 3.1 Standardmodell der Teilchenphysik

Durch die Entdeckung der kosmischen Strahlung wurde es möglich, das sogenannte „Standardmodell der Teilchenphysik“ zu entwickeln. In diesem Modell sind alle bis jetzt entdeckten Elementarteilchen aufgelistet, das heißt alle fundamentalen Teilchen aus denen unsere Materie besteht. Dies sind zum einen die drei Familien der Leptonen: das Elektron  $e^-$ , das Myon  $\mu^-$  und das Tauon  $\tau^-$  mit den jeweils zugehörigen Neutrinos  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$  (siehe Tabelle 1). Durch moderne Teilchenbeschleuniger wurde auch das Tauon entdeckt, welches die gleichen Eigenschaften wie ein Elektron besitzt, aber viel schwerer ist und da-

10 Vgl. [http://www.solstice.de/grundl\\_d\\_tph/exp\\_detek/exp\\_detek\\_01.html](http://www.solstice.de/grundl_d_tph/exp_detek/exp_detek_01.html), 10.4.12, S. 1

11 Vgl. Federmann, G.: Viktor Hess und die Entdeckung der Kosmischen Strahlung, S. 77

12 Vgl. Federmann, G.: Viktor Hess und die Entdeckung der Kosmischen Strahlung, S. 78 f.

her noch schneller zerfällt als das Myon.<sup>13</sup>

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$$

Tabelle 1: Leptonen

Neutrinos sind Teilchen, die eine sehr geringe Masse aufweisen (z.B. Elektron-Neutrino  $> 3$  eV). Sie sind elektrisch neutral und treten in Zerfalls- oder Umwandlungsprozessen in Erscheinung, wie zum Beispiel beim Beta-Zerfall oder dem Zerfall des Myons.<sup>14</sup>

Zum anderen zählen zu dem Standardmodell die Quarks: Up und Down, Charm und Strange und Top und Bottom (siehe Tabelle 2).

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

Tabelle 2: Quarks

Sie bilden die Hadronen, das heißt Teilchen, die aus drei Quarks (Baryonen) oder einem Quark und einem Antiteilchen bestehen (Mesonen).<sup>15</sup> Ein Beispiel für ein Baryon ist das Proton. Es besteht aus zwei Up-Quarks und einem Down-Quark. Ein Vertreter der Mesonen ist das Pion, welches aus einem Up und einem Anti-Down-Quark besteht. Die anderen Quarks konnten nur durch große Teilchenbeschleuniger entdeckt werden. Auch sie sind sehr massereich, weshalb die meisten von ihnen zerfallen, bevor sie sich aneinander binden und somit als Hadron bezeichnet werden. Die Leptonen und Quarks werden als Fermionen zusammengefasst. Neben ihnen gibt es noch die Bosonen. Sie werden auch Austauschteilchen genannt, da durch sie die Fermionen untereinander wechselwirken können.<sup>16</sup> Für den im Rahmen dieser Facharbeit durchgeführten Versuch ist die *schwache Wechselwirkung* besonders wichtig.

<sup>13</sup> Vgl. Berger, C.: Elementarteilchenphysik, S. 391

<sup>14</sup> Vgl. Berger, C.: Elementarteilchenphysik, S 21, 22, 23

<sup>15</sup> Vgl. Berger, C.: Elementarteilchenphysik, S. 391

<sup>16</sup> Vgl. Berger, C.: Elementarteilchenphysik, S 17, 26, 27, 28, 34

Wechselwirkung	Austauschteilchen
schwache	$W^\pm, Z^0$
starke	Gluonen $g$
elektromagnetische	Photonen $\gamma$

Tabelle 3: Die Wechselwirkungen und ihre Austauschteilchen<sup>17</sup>

### 3.2 Die schwache Wechselwirkung

In der theoretischen Physik werden die verschiedenen Grundkräfte auf den Austausch virtueller Eichbosonen zurückgeführt. Diese Teilchen werden als „virtuell“ bezeichnet, weil sie nur in einem kurzlebigen Zwischenzustand auftreten und daher schwer zu beobachten sind. Hier kann als Beispiel wieder der Beta-Zerfall herangeführt werden. Ein Neutron zerfällt schwach, das heißt durch Austausch eines  $W^-$  in ein Elektron und ein Antielektron-Neutrino. Das  $W^\pm$ -Boson nimmt also die Ladung und den Impuls des zerfallenen Teilchens auf und gibt sie an das Elektron und das Antielektron-Neutrino ab. Außerdem entsteht bei diesem Zerfall noch ein Proton. Somit bleibt auch die Ladung des Neutrons erhalten.

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

Bei Zerfällen von Neutrinos wird das neutrale  $Z^0$ -Boson ausgetauscht. Es hat eine Masse von 91,188 GeV und eine Lebensdauer von  $2,638 \cdot 10^{-25}$  Sekunden.

Die Lebensdauer des  $W^\pm$ -Bosons beträgt etwa  $3,10 \cdot 10^{-25}$  Sekunden, mit einer Ruhemasse von ca. 80,42 GeV.<sup>18</sup>

### 3.3 Entstehung der Myonen

Wie bereits erwähnt, entstehen Myonen aus der primären kosmischen Strahlung. Diese kosmische Strahlung ist zu etwa 85 % aus Protonen, zu 12 % aus  $\alpha$ -Teilchen (Heliumkerne) und zu etwa 3 % aus schwereren Atomkernen (Lithi-

<sup>17</sup> Vgl. Berger, C.: Elementarteilchenphysik, S. 38

<sup>18</sup> Vgl. Berger, C.: Elementarteilchenphysik, S. 41 f., 355

um, Beryllium, Bor) aufgebaut. Sie trifft permanent auf die Erde und stellt keine sonderliche Bedrohung dar. Obwohl die Strahlung schon vor 100 Jahren entdeckt wurde, ist ihr Ursprung noch nicht völlig geklärt. Allgemein wird angenommen, dass Supernovae (Sternexplosionen), Quasare (Kerne einer aktiven Galaxie) und die Sonne ihre hauptsächlichen Ursachen sind.<sup>19</sup>

Trifft z.B. ein Proton wie in Abb. 6 (siehe Anhang) in ca. 40 km Höhe auf die Oberfläche der Atmosphäre, wechselwirkt es dort mit den Gasmolekülen der Luft. Dadurch erzeugen sie einen sogenannten Teilchenschauer, oder auch Teilchenkaskade genannt, der größtenteils aus Hadronen, Pionen  $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$  und Kaonen  $K^+$ ,  $K^-$  besteht und *sekundäre kosmische Strahlung* genannt wird. Diese Teilchen sind nicht elementar, das heißt sie bestehen aus weiteren Komponenten und zerfallen deshalb wieder:



Daraus entstehen wiederum die Myonen. Sie sind auch nicht elementar und verlieren auf dem Weg durch die Atmosphäre aufgrund von *Ionisation* und *Anregung* (d.h. Stöße mit Atomen) ihre Energie und zerfallen selbst über die schwache Wechselwirkung, das heißt unter Abgabe eines  $W^\pm$  - Bosons.



Sie sind mit etwa 80 % aller geladener Teilchen der größte Teil der sekundären kosmischen Strahlung.<sup>20</sup>

### 3.4 Eigenschaften kosmischer Myonen und Myon-Paradoxon

Das Myon ist sozusagen der „große Bruder“ des Elektrons. Es trägt ebenfalls die Ladung  $-1e$ , besitzt aber eine Masse von  $0,1056 \text{ GeV}$ , welches dem 207-fachen der Masse des Elektrons entspricht. Die hohe Masse verleiht dem Teilchen ein hohes Durchdringungsvermögen von Materie. Das Myon nimmt nur an der schwachen Wechselwirkung - dem Austausch von  $W^\pm$  - Bosonen wäh-

<sup>19</sup> Vgl. Grupen, C.: Astroparticle Physics, S. 77 f., 85

<sup>20</sup> Vgl. Grupen, C.: Astroparticle Physics, S. 143 f., 147, 151

rend seines Zerfalls - teil. Alle anderen Eigenschaften, so wie z.B. der Radius, entsprechen dem des Elektrons, nur mit größerer Masse.<sup>21</sup>

Wenn das Teilchen in etwa 9 km Höhe durch den Zerfall eines Protons entsteht, hat es eine Geschwindigkeit von 99,8 % der Lichtgeschwindigkeit und seine Lebensdauer beträgt in etwa  $2,197 \cdot 10^{-6}$  Sekunden.<sup>22</sup> Demnach würde es nach einem Weg von ca. 645 Metern zerfallen. Warum können wir es trotzdem auf der Erdoberfläche messen und untersuchen? Dieses Dilemma wird „*Myon-Paradoxon*“ genannt. Die Erklärung dafür lieferte Albert Einstein mit seiner speziellen Relativitätstheorie. Die in ihr beschriebene *Zeitdilatation* sagt aus, dass ein Körper der sich mit über 10 % der Lichtgeschwindigkeit bewegt, in seinem *Inertialsystem* ein anderes Zeitgefühl, als ein aussenstehender und ruhender Beobachter hat. Betrachtet der Aussenstehende das Myon, wie es mit seiner Geschwindigkeit in Richtung Erdboden fliegt, würden er sagen es komme nur etwa 645 Meter weit. Aus der Sicht des Myons *dehnt* sich aber die Zeit und der zurückgelegte Weg des Teilchens kann mit der Formel  $s = \gamma \cdot c \cdot t$  berechnet wer-

den, wobei  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v_z/c)^2}}$  der *Lorentzfaktor* ist. Die Zeit des Myons verstreicht  $\gamma$  – mal so schnell wie die Zeit des Aussenstehenden auf der Erde.<sup>23</sup> Somit kann es bei relativistischer Berechnung eine größere Strecke in den 2,197 Sekunden, die es aus der Sicht des Beobachters existiert, zurücklegen. Demnach ist  $\gamma \approx 16$  und  $s \approx 10,5$  km, das heißt das Myon kann auf Meereshöhe gemessen werden. Das Myon-Paradoxon ist somit eine Bestätigung der speziellen Relativitätstheorie.

### 3.5 Nachweismethode Cherenkov-Effekt

Um die Teilchen in der Thermoskanne nachweisen zu können, wird der Cherenkov-Effekt genutzt. Um den Effekt anschaulicher zu erklären, wird er mit dem Überschallflug verglichen.

Ein sich mit der Geschwindigkeit  $v$  bewogender Jet verdichtet das Medium

21 Vgl. Berger, C.: Elementarteilchenphysik, S. 20 f.

22 Vgl. Tipler, P. A., Llewellyn, R. A.: Moderne Physik, S. 43

23 Vgl. Hemme, H.: Die Relativitätstheorie, S.81, 88

„Luft“ vor sich her, die hierdurch ausgelösten Schallwellen breiten sich mit Schallgeschwindigkeit kugelförmig aus. Fliegt der Jet schneller als die Schallgeschwindigkeit, durchbricht er die „Schallmauer“ (siehe Abb. 7 im Anhang) und ein Mach'scher Kegel<sup>24</sup> bildet sich wie in Abb.8 (siehe Anhang).

Der Cherenkov-Effekt ist dem Überschallflug sehr ähnlich. Hierbei ist das Medium in der Thermoskanne Wasser. Durchquert ein geladenes Teilchen mit der Geschwindigkeit  $\beta$  das Medium mit dem Brechungsindex  $n$  schneller als Licht, dann strahlt es die sogenannte *Cherenkov-Strahlung* ab – vergleichbar mit dem Mach'schen Kegel. Dieser Effekt kommt zustande, weil das Teilchen kurzzeitig die benachbarten Wasseratome polarisiert und diese dadurch zu elektrischen Dipolen werden. Durch die zeitliche Veränderung des Dipolfeldes emittieren sie Photonen, die vom Photomultiplier detektiert werden. Wie in Abb. 9 (siehe Anhang) dargestellt, findet der Effekt nur statt, wenn die Geschwindigkeit des Teilchens größer ist als die Lichtgeschwindigkeit innerhalb des Mediums.<sup>25</sup> Im Wasser ist die Geschwindigkeit des Lichts langsamer (-25%) als im Vakuum, da der Brechungsindex von Wasser  $n=1,33$  beträgt.<sup>26</sup> Ein Myon kann also die Cherenkov-Strahlung hervorrufen. Wenn das Teilchen zerfällt, entsteht unter anderem ein Elektron. Dieses Elektron ist ebenfalls im Wasser schneller als Licht und erzeugt auch die Cherenkov-Strahlung.

### 3.6 Der Photoeffekt

Der PMT arbeitet mit dem *Photoeffekt*. Das von dem Myon ausgesendete Lichtsignal *Photon* wird von den verspiegelten Wänden der Thermoskanne reflektiert und trifft auf die Scheibe des PMT. Dort liegt die *Photokathode*, in der das Photon ein Elektron aus einer Atomhülle löst, indem es seine gesamte Energie abgibt. Dieses Elektron hat nun die Energie  $E_e = E_\gamma - E_B$ , also die Energie des Photons abzüglich seiner Bindungsenergie an den Atomrumpf. Die erforderliche Energie, um ein Elektron aus der Atomhülle zu lösen, wird *Aus-*

24 Vgl. Grehn, J., Krause, J.: Metzler Physik, S. 128

25 Vgl. Grupen, C.: Teilchendetektoren, S. 238 f.

26 Vgl. Grehn, J., Krause, J.: Metzler Physik, S. 326

*trittsarbeit* genannt.<sup>27</sup>

#### **4 Der Photomultiplier**

Damit kein Licht eindringt, ist der Detektor fest auf die Kanne geschraubt und taucht mit der Scheibe in das Wasser ein. Das schwache Lichtsignal der Teilchen in der Thermoskanne wird durch den Photoeffekt in ein elektrisches Signal umgewandelt.

Das *Photoelektron* wird im Vakuum des PMT (siehe Abb. 10 im Anhang) beschleunigt und trifft auf die erste Dynode, eine Elektrode aus einem Material mit geringer Austrittsarbeit (z.B. Berylliumoxid). Die daraufhin drei bis fünf Sekundärelektronen werden wieder beschleunigt und treffen auf die nächste Dynode. Zwischen den Dynoden liegt eine Potentialdifferenz von etwa 150 V bis 200 V, wodurch den Elektronen eine Energie zugeführt wird, die es ihnen erlaubt weitere Teilchen aus den folgenden Dynoden zu lösen. Dies wird durch eine Reihe von Widerständen realisiert. So entsteht nach ca. sieben Dynoden ein Strom, der an der Anode gemessen werden kann.<sup>28</sup> Je nachdem, wie niedrig die Detektionsschwelle am Messgerät eingestellt wurde, können beispielsweise Impulse ab 2,3 mV als das Signal eines Myons gelten und werden auf dem USB-Stick gespeichert.

#### **5 Versuchsdurchführung**

Bevor mit dem Versuch begonnen wird, ist es wichtig zu wissen, dass hier mit Hochspannung gearbeitet wird. Es dürfen keine Änderungen am Aufbau des Experiments vorgenommen werden, ohne nicht vorher gründlich überprüft zu haben, ob der Strom abgeschaltet wurde. Der Photomultiplier darf während des Betriebes auf keinen Fall in Tages- oder Umgebungslicht gehalten werden. Bevor die Geräte aufgebaut werden, muss für die Messung ein dunkler Raum oder Schrank gefunden werden, der gleichzeitig eine Stromquelle für die Hochspannung bietet.

---

<sup>27</sup> Vgl. Grehn, J., Krause, J.: Metzler Physik, S. 214, 215, 492

<sup>28</sup> Vgl. Kleinknecht, K.: Detektoren für Teilchenstrahlung, S. 104

## 5.1 Versuchsaufbau

Die Geräte werden nach dem Schema in Abb. 11 (siehe Anhang) aufgebaut. Der Photomultiplier muss vorsichtig auf die Thermoskanne geschraubt werden. Er muss unbedingt vorsichtig behandelt werden und darf auf keinen Fall herunter fallen. Der PMT wird durch ein Hochspannungskabel (MHV-Kabel) mit der Hochspannungsquelle und durch ein BNC-Kabel mit dem Messgerät verbunden. Die Kabel dürfen nicht verwechselt werden. Man unterscheidet sie über den Kupferdraht im Stecker des Hochspannungskabels, der kürzer ist als der Kupferdraht im Stecker des BNC-Kabels.

## 5.2 Untergrundmessung

Vor der eigentlichen Messung der Myonen muss eine Untergrundmessung durchgeführt werden. Das Untergrundrauschen kann durch verschiedene umliegende Materialien hervorgerufen werden. Auch bei zu hoher Raumtemperatur können sich Elektronen aus den Dynoden des PMT lösen.

Der Photomultiplier befindet sich auf der leeren Kanne und ist durch die Kabel mit den weiteren Geräten verbunden. Der USB-Stick wird in die Messelektronik gesteckt. Alle Geräte werden inklusive einer Notstromversorgung an das Stromnetz angeschlossen. Im Falle eines kurzen Stromausfalls würde der Versuch also nicht unterbrochen werden und die Geräte würden keinen Schaden davon tragen. Nun wird die Hochspannungsversorgung und die Messelektronik eingeschaltet. Die Spannung sollte langsam auf etwa 800 V gedreht werden und die Detektionsschwelle auf 2,3 mV eingestellt sein. Um sicher zu gehen, dass kein Licht in die Kanne eindringt wird die Thermoskanne mit einem schwarzen Tuch abgedeckt. Der PMT muss etwa 15 Minuten vorwärmen, dann kann die Messung gestartet werden. Dies wird über den Regler an der Messelektronik eingestellt. Nach etwa zwei Stunden kann die Messung gestoppt (über den Regler), die Hochspannung langsam herunter gedreht und die Geräte können ausgeschaltet werden.

### 5.3 Signalmessung

Für die Signalmessung muss der Photomultiplier von der Hochspannungsquelle und der Messelektronik getrennt und vorsichtig von der Kanne geschraubt werden. Nun wird in die Thermoskanne Wasser gefüllt, bis der PMT mit dem Fenster in das Wasser eintauchen kann. Wie auch bei der Untergrundmessung muss der PMT richtig angeschlossen werden, die Geräte angeschaltet und entsprechend einjustiert werden und der PMT mit dem Tuch abgedeckt und etwa 15 Minuten vorgewärmt werden. Die Messung muss bei gleicher Detektionsschwelle wie bei der Untergrundmessung durchgeführt werden. Weil mit der Signalmessung gleichzeitig die Lebensdauer der Myonen gemessen werden soll, werden die Geräte erst nach zwei Wochen ausgeschaltet, um zu gewährleisten, dass mehrere Zerfallsereignisse in der Thermoskanne aufgezeichnet wurden. Die Hochspannung wird langsam heruntergedreht und die Geräte werden ausgeschaltet.

### 5.4 Auswertung

Die Daten des USB-Sticks müssen auf den Rechner übertragen und die Auswertungssoftware heruntergeladen werden. Eine genaue Beschreibung welche Programme nötig sind und wo sie heruntergeladen werden können ist im Anhang zu finden. Durch das Auswertungsprogramm werden die Histogramme

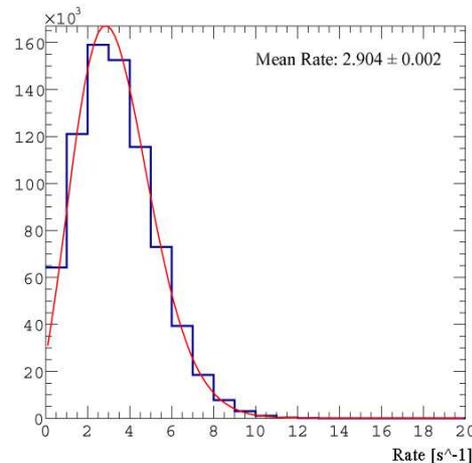
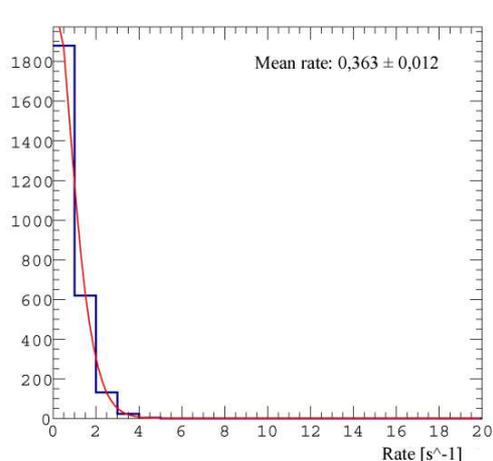


Abbildung 1: Untergrundmessung

Abbildung 2: Myonenmessung

für die Lebensdauer und Rate der Myonen erzeugt.

In Abb. 1 ist die Messung des Untergrundrauschens zu sehen. Auf der x-Achse ist die Rate der gemessenen Signale pro Sekunde abgebildet und auf der y-Achse die Anzahl dieser Signale. Die mittlere Untergrundrate beträgt

$0,363 \pm 0,012 \frac{1}{s}$ . In Abb. 2 ist die eigentliche Myonenmessung zu sehen. Die

Achsenbeschriftung ist der Untergrundmessung identisch. Der Graph zeigt,

dass in der Thermoskanne insgesamt  $2,904 \pm 0,002 \frac{1}{s}$  Einfälle detektiert wur-

den. Wird der Mittelwert aus den gesamten Teilcheneinfällen abzüglich dem der Untergrundmessung genommen, dann ergibt sich daraus die mittlere Ein-

fallsrate der Myonen  $2,541 \frac{1}{s}$ .

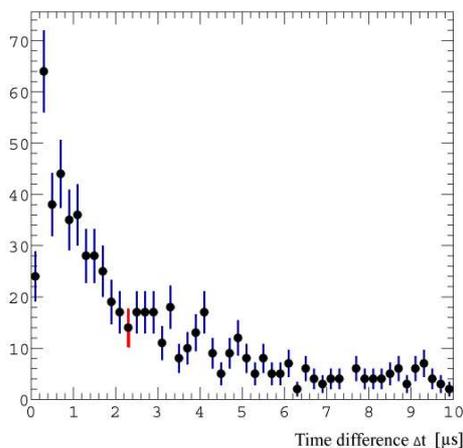


Abbildung 3: Myonen Zerfälle

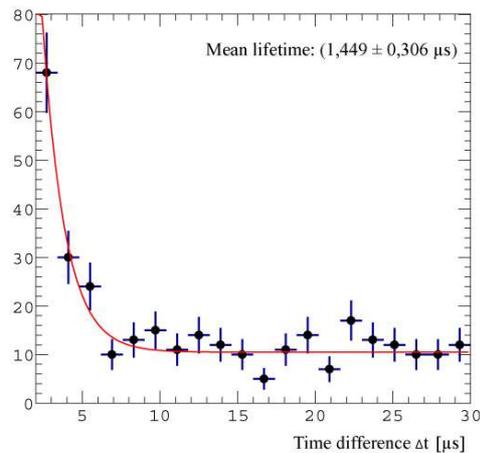


Abbildung 4: Myonen Lebensdauer

In Abb. 3 und 4 wird die Anzahl der Myonenzerfälle in einer bestimmten Zeitspanne dargestellt. Die x-Achse bildet die Zeitdifferenz zwischen dem Lichtsignal des eintreffenden Myons in die Thermoskanne und dem Lichtblitz des Elektrons welches aus dem zerfallenden Myon hervorgeht. Auf der y-Achse ist die Anzahl dieser Ereignisse zu sehen. Beispielsweise wurden in Abb. 4 zehn bis 18 Myonen gemessen, die in einer Zeit von ca.  $2,2 \mu s$  zerfallen sind (rot markiert). Die Werte der Zeitdifferenzen unter  $2 \mu s$  sind extrem hoch, weshalb

angenommen wird, dass sie nicht von Myonen Zerfällen stammen, sondern durch zufällig aufeinander folgende Impulse verursacht wurden. Die Häufigkeit der Doppelimpulse nimmt ab einer Zeitdifferenz von ca.  $5 \mu\text{s}$  stark ab und bleibt daraufhin nahezu konstant. Diese Werte stammen aus dem Untergrundrauschen, weshalb für die Berechnung der Myonen Lebensdauer nur ein Ausschnitt von 2,1 bis  $10 \mu\text{s}$  betrachtet wird. Das Auswertungsprogramm nimmt aus diesem Bereich eine sinnvolle Anzahl an Werten und berechnet daraus die Lebensdauer des Teilchens.<sup>29</sup> In dieser Messung beträgt sie  $1,449 \pm 0,306 \mu\text{s}$ . Vergleicht man dies mit dem Literaturwert von  $2,197 \mu\text{s}$ , muss festgestellt werden, dass die Messung mit einer Abweichung von 34,1 % nicht erfolgreich war. Grund dafür könnte das Untergrundrauschen sein, welches bloß vage aus der Lebensdauerermessung gefiltert wurde. Es ist möglich, dass dadurch häufig Zeitdifferenzen von unter  $2,2 \mu\text{s}$  gemessen wurden.

Während der Auswertung erschienen noch weitere Probleme: Die Lebensdauerermessung musste wiederholt werden, weil die Datei auf dem USB-Stick beschädigt war. Eventuell war kein Speicherplatz mehr auf dem Stick frei. Auch die Untergrundmessung musste wiederholt werden, da die Messelektronik beim ersten Start nicht reagierte. Die Auswertung war langwierig und komplizierter als gedacht, da die Auswertungssoftware große Linux Vorkenntnisse erfordert.

---

<sup>29</sup> Vgl. Maike Jekel - Ausarbeitung eines Gesamtexperimentierkonzeptes zur Kamiokanne, S. 52 f.

## 6 Literaturverzeichnis

Berger, Christoph: Elementarteilchenphysik: Von den Grundlagen zu den modernen Experimenten. Berlin<sup>2</sup> 2006

Federmann, Georg: Diplomarbeit: Viktor Hess und die Entdeckung der kosmischen Strahlung. Wien 2003

<http://www.federmann.co.at/vfhess/>

Grehn, Joachim/Krause, Joachim: Metzler Physik. Braunschweig<sup>4</sup> 2009

Gruppen, Claus: Astroparticle Physics. Berlin, Heidelberg 2005

Gruppen, Claus: Teilchendetektoren. Heidelberg 1993

Hemme, Heinrich: Die Relativitätstheorie: Einstein - relativ – einfach. Augsburg<sup>2</sup> 1999

Kleinknecht, Konrad: Detektoren für Teilchenstrahlung. Heidelberg<sup>4</sup> 2005

Tipler, Paul Allan, Llewellyn, Ralph A.: Moderne Physik. Oldenbourg, München 2003

Informationen über das Super-Kamiokande-Experiment in Japan:

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html>

Verschiedene Artikel über die Geschichte der Physik und neuste Forschung:

<http://www.weltderphysik.de/gebiet/astro/kosmische-strahlung/die-energiereichsten-himmelskoerper/>

Naturphänomene und Anregungen für den Physikunterricht:

<http://www.solstice.de/>



Anhang III<sup>32,33</sup>

Abbildung 8: Jet mit Überschallgeschwindigkeit

Schallmauer und Mach'scher Kegel

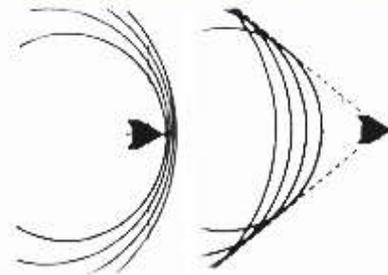


Abbildung 7: Schallmauer und Mach'scher Kegel

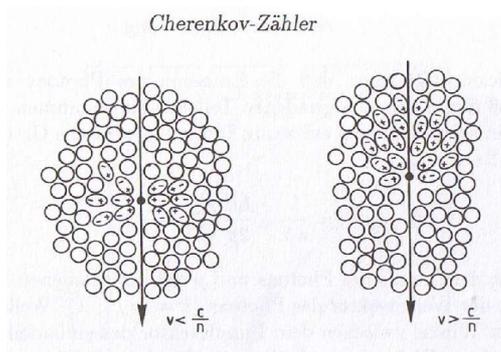
Anhang IV<sup>34</sup>

Abbildung 9: Cherenkov-Effekt

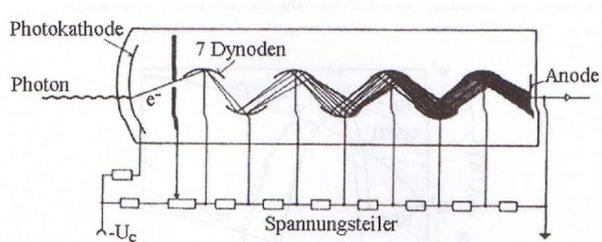
Anhang V<sup>35</sup>

Abbildung 10: Prinzip des Photomultipliers

32 <http://www.msv-it.de/INDEX.PHP>, 10.4.12, S.1

33 <http://experimentis.de/PagesErkl/203AkuPhaeno.html>, 10.4.12, S.1

34 Grupen, C.: Teilchendetektoren, S. 239

35 Kleinknecht, K.: Detektoren für Teilchenstrahlung, S. 104

## Anhang VI

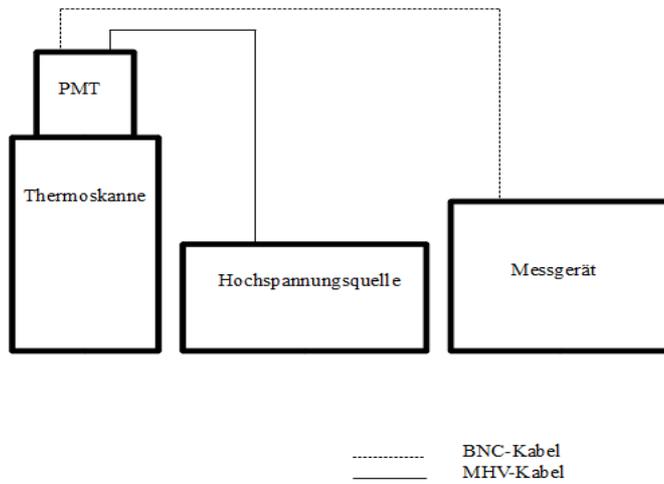


Abbildung 11: Versuchsaufbau



Abbildung 12: Versuchsaufbau



Abbildung 13: Bildschirm des Messgeräts

## Anhang VII

# Kamiokanne – Anleitung für Schulversuche

## Hinweis:

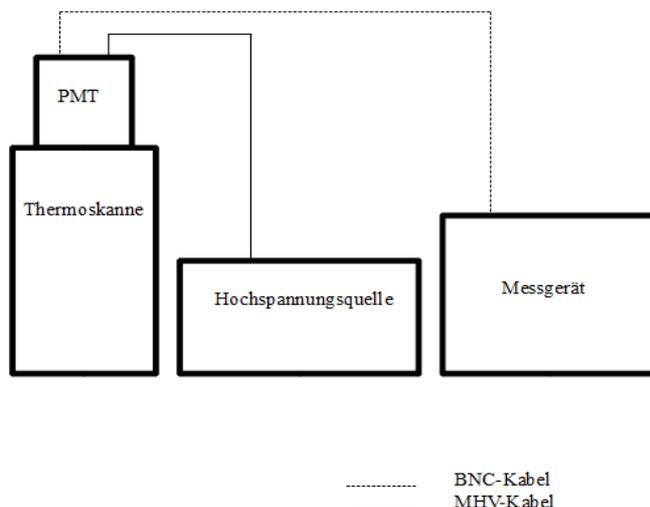
- Den Photomultiplier (PMT) niemals bei Tages- oder Umgebungslicht, sondern nur im aufgeschraubten und lichtdichten Zustand betreiben.
- Es wird mit Hochspannung experimentiert, deshalb sollte beim Versuchsaufbau immer eine befugte Aufsichtsperson anwesend sein.

## Voraussetzungen:

- Voraussetzung für die Verwendung der Auswertungssoftware ist ein Rechner mit Linux, auf dem das Programm GCC Compiler (C++) installiert ist. Dieses Programm findet man über die normale Softwareinstallation des Linuxsystems (Paketmanagement).
- Außerdem muss das Programm „make“ installiert sein (Paketmanagement).
- Das Programm „ROOT“ in Binärversion aus dem Internet herunterladen und entpacken: [root.cern.ch/drupal/content/downloading-root](http://root.cern.ch/drupal/content/downloading-root)
- Auswertungsprogramm herunterladen unter: [kamiokanne.uni-goettingen.de/kamiokanne.htm](http://kamiokanne.uni-goettingen.de/kamiokanne.htm)  
→ analysis example
- Ein USB Stick mit etwa 200 MB freiem Speicherplatz.

## Messvorbereitungen:

- Da der Photomultiplier sehr Lichtempfindlich ist, muss für die Messung ein dunkler Raum oder Schrank gefunden werden, der gleichzeitig eine Stromquelle für die Hochspannung bietet.



**Aufbau:**

- Den Photomultiplier mit der Hochspannungsquelle und dem Messgerät verbinden (CH1 IN für Kanal A).
- Darauf achten, dass das MHV Kabel in den dafür vorgesehenen Ausgang am PMT geschraubt wird und nicht mit dem BNC Kabel verwechselt wird.

**Ratenmessung:****1. Untergrundmessung (ohne Wasser)**

- Den USB Stick in die Messelektronik stecken.
- Den Photomultiplier auf die leere Kanne schrauben.
- Die Hochspannungsversorgung und die Messelektronik einschalten. Die Hochspannung langsam auf etwa 800 V drehen.
- Den PMT etwa 15 min. vorwärmen.
- Die Detektionsschwelle mittels Drehen des Reglers einjustieren, so dass ca. 2-3 Pulse pro 10s detektiert werden (Anzeige „Puls“ / akustisches Signal). Ein guter Richtwert für die Ratenmessung ist **3,5mV**.
- Die Messung starten (Regler drücken → drehen → „Messung starten“) und nach ca. 1h wieder beenden (Regler drücken → drehen → „Messung stoppen“).
- Die Hochspannung langsam herunter drehen, Messelektronik und HV-Gerät ausschalten.

**2. Signal + Untergrundmessung (mit Wasser)**

- Den Photomultiplier auf die mit Wasser gefüllte Kanne aufschrauben. Der PMT muss mit dem Fenster in das Wasser eintauchen.
- Die Schritte aus (1) wiederholen (inkl. Vorwärmen). Die Messung muss bei **identischer Schwelle** durchgeführt werden.
- Die Messung etwa 2-3 Tage durchführen.
- Die Hochspannung langsam herunter drehen, Messelektronik und HV-Gerät ausschalten.

**3. Auswertung**

- Die Dateien des USB Sticks entpacken und auf dem Rechner speichern.
- Einen Terminal starten (Terminalfenster in dem man Befehlszeilen für das Linuxsystem eingeben kann).
- über folgende Befehle informieren: („`_`“ bedeutet Leertaste)

1. `cd` in ein Verzeichnis wechseln

2. **ls -l** Verzeichnisse und Daten anzeigen
  3. **cd ..** Ein Verzeichnis zurückgehen
- mit **cd** in das Verzeichnis des ROOT Programms wechseln.
  - eingeben: **chmod 777 -R \*** (es werden alle Programme für jeden ausführbar gemacht).
  - im ROOT Verzeichnis eingeben: **./bin/thisroot.sh**  
Dieser Befehl muss immer wieder ausgeführt werden wenn eine Datei ausgewertet werden soll. Er dient dazu das Programm mit dem System bekannt zu machen. Es ist zu PATH hinzugefügt worden, welches eine Umgebungsvariable für Pfade ist. Alle Bibliotheken werden zu LD\_LIBRARY\_PATH hinzugefügt.
  - Mit **cd** in das Kamiokande Verzeichnis wechseln .
  - **make** eingeben.  
Es werden ausführbare Programme für das System erzeugt z.B. `kanne_lifetime`, oder `kanne_rate`.
  - mit **./kanne\_rate <Kanal> <Datei1> <Datei2>** grafische Darstellung der Daten erzeugen, wobei `<Datei1>` der Pfad zur Messdatei aus (1) ist und `<Datei2>` der Pfad zur Datei aus (2). Der Kanal entspricht dem für die Messung verwendeten Kanal.  
Beispiel: `./kanne_rate A CAP1.DAT CAP2.DAT`
  - Es werden Raten für die mittleren Raten des Untergrunds, Signal+Untergrund und Signtrate nach Subtraktion des Untergrunds ausgegeben. Außerdem wurden Histogramme für die Untergrundmessung und die Signal+Untergrundmessung erzeugt.
  - Diese Dateien mit der Endung „.eps“ können nun mit einem Dokumentenbetrachter geöffnet werden. Ein Doppelklick auf die Datei sollte reichen.

## Lebensdauermessung:

### 1. Messung (mit Wasser)

- Den Photomultiplier auf die mit Wasser gefüllte Kanne aufschrauben (wie in Ratenmessung (2)).
- Die Hochspannungsversorgung und die Messelektronik einschalten. Die Hochspannung langsam auf etwa 800 V drehen.
- Den PMT etwa 15 min. vorwärmen.
- Die Detektionsschwelle mittels Drehen des Reglers auf einen Richtwert von 2,3 mV einjustieren, um die Ausgangsrate und damit die Detektionswahrscheinlichkeit der Sekundärpulse durch Elektronen zu erhöhen .
- Die Messung starten (Regler drücken → drehen → „Messung starten“) und nach ca. einer Woche wieder beenden (Regler drücken → drehen → „Messung stoppen“).
- Die Hochspannung langsam herunter drehen, Messelektronik und HV-Gerät ausschalten.

## 2. *Auswertung*

- Für die Auswertung der Lebensdauer sind die gleichen Schritte wie bei der Auswertung der Rate von Nöten.
- mit `./kanne_lifetime <Kanal> <Datei>` grafische Darstellung der Daten erzeugen, wobei `<Datei>` der Pfad zur Messdatei ist. Der Kanal entspricht dem für die Messung verwendeten Kanal.  
Beispiel: `./kanne_lifetime A CAP3.DAT`
- Es werden Histogramme für die mittlere Lebensdauer der Myonen ausgegeben.
- Diese Dateien mit der Endung „.eps“ können nun mit einem Dokumentenbetrachter geöffnet werden. Ein Doppelklick auf die Datei sollte reichen.

**Erklärung**

Ich erkläre, dass ich die Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt  
und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und  
Hilfsmittel benutzt habe.

A handwritten signature in black ink, reading 'Buschendorf'. The script is cursive and fluid, with the 'B' and 'd' having prominent loops.

Fabiola Buschendorf