

# Mehr Neutronen für's Geld

Instrument der A1-Kollaboration in Mainz erzielt hohe Nachweiseffizienz bei niedrigen Kosten.

Magdalena Rohrbeck

Der Nachweis von Neutronen gewinnt zunehmend Bedeutung in der Kern- und Teilchenphysik, da Details ihrer Wechselwirkung wichtige Informationen liefern können, beispielsweise in der Astroteilchenphysik zur Modellierung von Neutronensternen. Bislang sind diese Observablen jedoch wegen der Herausforderungen beim Nachweis der Neutronen experimentell nur ungenau bestimmt.

Mit den in der Teilchenphysik gebräuchlichen Detektoren ist Neutronen – verglichen mit geladenen Teilchen – nur schwer und indirekt beizukommen. Wegen ihrer fehlenden Ladung tauschen sie sich nicht über die Coulomb-Kraft mit Atomen oder Molekülen aus und können bei hohen Energien deshalb in Materie viele Zentimeter zurücklegen. Wenn sie wechselwirken, geschieht dies im Wesentlichen aufgrund der starken Kraft: Zwischen einem Neutron und einem Atomkern sind dabei unterschiedliche Prozesse möglich, beispielsweise elastische und inelastische Streuung oder Neutroneneinfang. In diesen Prozessen können sekundäre geladene Teilchen entstehen, die sich konventionell nachweisen lassen, z. B. durch Ausnutzung der Ionisation, die James Chadwick 1932 zur Entdeckung des Neutrons verhalf [1], oder der Szintillation [2]. Bei der Szintillation wird die Energie von geladenen Teilchen oder energiereichen Photonen in Lichtquanten im sichtbaren Spektralbereich konvertiert, die photosensitive Detektoren – meist Photomultiplier – registrieren. Als Szintillatormaterialien eignen sich spezielle anorganische Kristalle, organische Stoffe oder auch Gase.

Für den Nachweis von Neutronen mit Impulsen von etwa 1 bis  $10^3$  MeV/c bietet sich die elastische (n,p)-Streuung:  $n + p \rightarrow n' + p'$  an [3]. Abb. 1 zeigt den simulierten Nachweis eines Neutrons in einem Detektor, der aus einzelnen Szintillatorelementen besteht. Als Folge der Kernreaktion ändert das Neutron entweder seine Richtung ( $n'$ ), oder es entstehen sogar weitere Neutronen ( $n^*$ ). Diese haben dann meist eine niedrige Energie und erzeugen deshalb kein Signal im Szintillator. Ein Signal tritt dagegen dann auf, wenn die Kernreaktion durch elastische (n,p)-Streuung ein Rückstoßproton ( $p'$ ) hervorbringt, welches das Szintillatormaterial anregt.

Eine große Schwierigkeit beim Nachweis hochenergetischer Neutronen ist die geringe Nachweiseffizienz



In der Experimentierhalle der A1-Kollaboration am Institut für Kernphysik der Universität Mainz wird eine Probe mit einem vom Mainzer Mikrotron MAMI er-

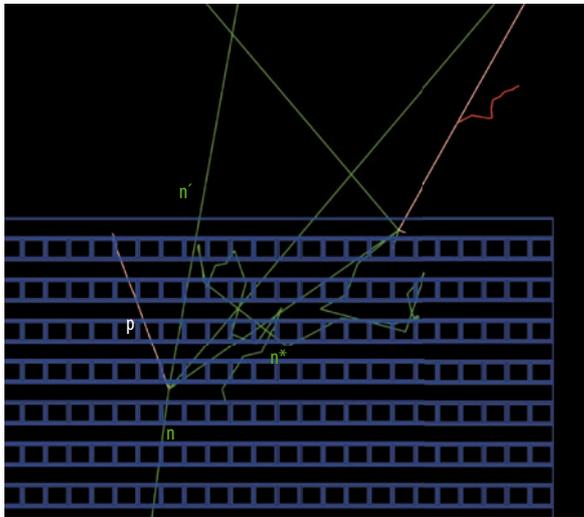
zeugten Elektronenstrahl beschossen. Die drei Spektrometer (rot, blau und grün) weisen die Teilchen nach.

der Detektoren. Die Wahrscheinlichkeit für ein einfallendes Neutron, im Szintillator ein Rückstoßproton zu erzeugen, beträgt typischerweise ungefähr ein Prozent pro Zentimeter. Um ein Neutron mit einer Effizienz von annähernd hundert Prozent nachzuweisen, ist ein entsprechend großes Volumen nötig. Die existierenden Detektoren erreichen dies aus Kostengründen meist nicht. In alternativen Designs wechseln sich Lagen aus Szintillator- und Konvertermaterial ab („Sandwich“). Als Konverter bieten sich Elemente mit

## KOMPAKT

- Im Gegensatz zu geladenen Teilchen sind Neutronen nur schlecht nachweisbar. Gegenwärtige Detektoren erreichen nur moderate Nachweiseffizienzen, da aus Kostengründen auf ein ausreichend großes Detektorvolumen verzichtet werden muss.
- Das in der Mainzer A1-Kollaboration entwickelte Konzept setzt daher statt Festkörperszintillatoren die schwerer zu handhabenden, aber günstigeren Flüssigszintillatoren ein.
- Deren Licht leiten wellenlängenschiebende Fasern zu Multi-Pixel Photon Countern aus Avalanche-Photodioden, die paarweise in den rund 2300 Modulen eine Neutronennachweiseffizienz von nahezu 100 % liefern.

M. Sc. Appl. Phys.  
Magdalena Rohrbeck, Universität Koblenz-Landau, Campus Koblenz, Gebäude G, Raum G432, Universitätsstraße 1, 56070 Koblenz – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung des Georg-Simon-Ohm-Preises 2013 auf der DPG-Jahrestagung in Dresden.



**Abb. 1** Diese Simulation zeigt den Nachweis eines Neutrons (n) in einem Szintillationsdetektor (blau). Das Neutron fliegt von unten in den Detektor und legt eine große Strecke zurück, bevor eine Kernreaktion stattfindet. Diese kann entweder zur Richtungsänderung (n'), zu neuen niederenergetischen Neutronen (n\*) oder zu einem Rückstoßproton (p') führen.

möglichst hoher Kernladungszahl an, wie Blei, Kupfer oder Eisen.

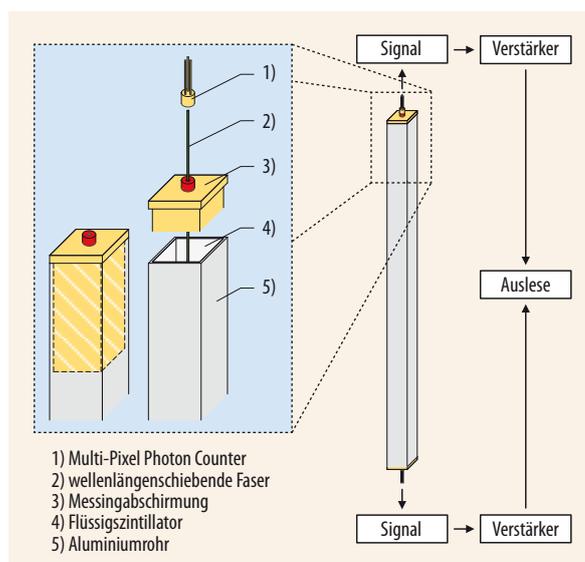
Um trotz geringer Nachweiseffizienz bei Experimenten eine akzeptable Ereignisrate zu erreichen, ist eine möglichst große Winkelakzeptanz notwendig. Dadurch erhöht sich jedoch auch die Rate an Untergrundereignissen und damit die Belastung der verwendeten Photomultiplier. Diese können typischerweise eine Million Ereignisse in der Sekunde detektieren. Eine starke Segmentierung des Detektors kann die Zählratenbelastung der einzelnen Photomultiplier reduzieren und ist außerdem für eine hohe Ortsauflösung wünschenswert. Doch auch die Anzahl der verwendeten Photomultiplier ist aus Kostengründen begrenzt.

Eine hohe Nachweiseffizienz bei hoher Zählratenbelastbarkeit ist nur mit einem Detektor möglich, der

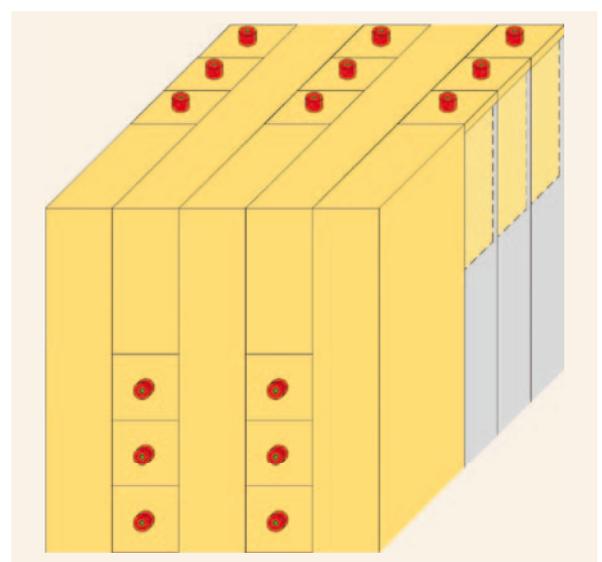
dank einer kostengünstigeren Alternative zu den Photomultipliern sowohl ein großes Volumen als auch eine starke Segmentierung aufweist. Ein solches Konzept wurde in der A1-Kollaboration am Institut für Kernphysik der Johannes Gutenberg-Universität Mainz entwickelt.

Die A1-Kollaboration untersucht die räumliche Struktur von Atomkernen oder Kernbausteinen. Dazu wird in Experimenten eine Probe mit einem Elektronenstrahl beschossen, den der Teilchenbeschleuniger MAMI, das Mainzer Mikrotron, zur Verfügung stellt. In der Experimentierhalle stehen drei Spektrometer zur Verfügung, um die geladenen Teilchen zu registrieren – also die gestreuten Elektronen oder aus dem Target herausgeschlagene oder neu entstandene geladene Teilchen (Abb. auf S. 73). Ungeladene Teilchen, wie die bei Kernreaktionen entstehenden Neutronen, sind auf anderem Wege nachzuweisen. Dies soll der in den Aufbau der A1-Kollaboration zu integrierende Neutronendetektor leisten.

Ein einzelnes Modul des neuartigen Detektors besteht aus einem mit Flüssigszintillator gefüllten Aluminiumrohr mit einem quadratischen Querschnitt von 2 cm Kantenlänge, an dessen beiden Enden Photonenzähler sitzen (Abb. 2). Der Flüssigszintillator ist im Vergleich zu den üblicherweise verwendeten Festkörperszintillatoren zwar schwieriger zu handhaben, aber auch wesentlich günstiger – dadurch bleibt selbst ein großes Detektorvolumen bezahlbar. Er emittiert Licht im blauen Spektralbereich mit einem Maximum bei einer Wellenlänge von 425 nm. Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) fangen das Szintillationslicht auf. Ein Nachteil der MPPCs ist ihre Strahlenempfindlichkeit, weshalb eine gute Abschirmung – in diesem Fall aus Messing – notwendig ist. Vorteile der MPPCs im Vergleich zu konventionellen Photomultipliern sind jedoch neben der niedrigen Betriebsspannung von ungefähr 70 V vor allem der geringe Preis, was die



**Abb. 2** Ein einzelnes Detektormodul besteht aus einem mit einem Flüssigszintillator gefüllten Aluminiumrohr. Eine wellenlängenschiebende Faser leitet das Szintillationslicht auf die Photonen-zähler, deren Signale verstärkt und ausgelesen werden.



**Abb. 3** Dieser Ausschnitt des gesamten Detektors zeigt schematisch je drei der 48 nebeneinander liegenden Module von fünf der insgesamt 48 Lagen, die jeweils um 90° zueinander gedreht sind.

starke Segmentierung des großen Detektors finanzierbar macht. MPPCs gehören zu den Silizium-Photomultipliern (Si-PM) und kommen bei der Detektion von extrem schwachem Licht bis hin zu einzelnen Photonen zum Einsatz. Sie bestehen aus Avalanche-Photodioden (APD), die im Geiger-Modus betrieben werden. Ein einziges einfallendes Photon reicht aus, um den Durchbruch einer APD auszulösen. An einem Widerstand lässt sich der entsprechende Spannungsabfall als Ausgangssignal messen. Eine einzelne APD kann jedoch nicht unterscheiden, ob ein einzelnes Photon oder mehrere Photonen den Durchbruch verursacht haben, sie liefert immer das gleiche Signal. Der Photonenzähler besteht deshalb aus einem Array mit 400 APD-Pixeln. Das Ausgangssignal ist dann die Summe der Signale aller angesprochenen APD-Pixel. Da die photosensitive Fläche des MPPC mit  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  wesentlich kleiner ist als die Querschnittsfläche des Szintillators, wird eine Faser mit einem quadratischen Querschnitt von  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  verwendet, um das Szintillationslicht möglichst verlustfrei auf den MPPC zu leiten. Dabei ist ein Mechanismus von Absorption und Reemission notwendig, damit das von der Faser gesammelte Szintillationslicht diese nicht wieder verlässt. Außerdem muss das reemittierte Licht eine andere Wellenlänge besitzen als das ursprüngliche, damit es die Faser selbst nicht wieder absorbiert.

Die im Aufbau verwendete Faser absorbiert das blaue Szintillationslicht und reemittiert grünes Licht mit einer maximalen Emission bei 492 nm. Ein Teil des reemittierten Lichts verbleibt aufgrund von Totalreflexion in der Faser und gelangt so zu beiden MPPCs eines Moduls. Die Ausgangssignale werden verstärkt und einer Ausleseinheit übergeben. Insgesamt müssen beim endgültigen Detektor 4608 Kanäle ausgelesen werden, da der Detektor aus  $48 \times 48$  Modulen besteht, d. h. 48 nebeneinander liegende Module bilden eine Lage und 48 solcher Lagen bilden den gesamten De-

tektor. Dabei sind die Lagen jeweils im rechten Winkel zueinander gedreht (Abb. 3).

Die erste Testmessung eines Prototyps konnte zeigen, dass das neue Konzept für einen stark segmentierten Neutronendetektor wie gewünscht funktioniert: Für ein Ereignis in einem Modul des Detektors lieferten die beiden entsprechenden Photonen zähler koizidente Signale. Mit dem neuen Konzept lässt sich also ein kostengünstiger Neutronendetektor mit einer Nachweeffizienz nahe 100 % und einer großen Zählratenbelastbarkeit konstruieren, der in naher Zukunft bei Experimenten der A1-Kollaboration zum Einsatz kommen wird.

#### Literatur

- [1] J. Chadwick, Proc. R. Soc. London, Ser. A **136**, 692 (1932)
- [2] C. Grupen, Teilchendetektoren. BI-Wissenschaftsverlag, Mannheim Leipzig Wien Zürich (1993)
- [3] B. Povh, K. Rith, C. Scholz und F. Zetsche, Teilchen und Kerne: Eine Einführung in die physikalischen Konzepte. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 6. Aufl. (2004)

#### DIE AUTORIN

**Magdalena Rohrbeck** absolvierte 2008 den Bachelor of Science in *Medizintechnik und Sportmedizinische Technik* und 2011 den Master of Science in *Applied Physics* am RheinAhrCampus der Hochschule Koblenz. Für ihre Masterarbeit ging sie an das Institut für Kernphysik der Johannes Gutenberg-Universität Mainz. Seit März 2011 arbeitet sie an der Universität Koblenz-Landau im Bereich der Oberflächenphysik.

