Elektromagneten der Teilchenphysik hands-on - das ATLAS-Magnetsystem

A. Feistmantl u. J. Woithe

1 Motivation
Der Large Hadron Collider (LHC) ist der 🞖 größte Teilchenbeschleuniger der Welt. Im ELHC werden Protonen auf extrem hohe Energien beschleunigt und anschließend zur Kollision gebracht. Riesige Teilchendetektoren wie zum Beispiel ATLAS oder CMS zeichnen diese Kollisionen auf. Die Forschung am LHC fasziniert nicht nur Physikerinnen und Physiker aus aller Welt, sondern ist auch für Schülerinnen und Schüler ein spannendes Thema. Verschiedene Projekte wie zum Beispiel CERN@school oder S'Cool LAB versuchen Aspekte der Forschung und Technologie am CERN für den Physikunterricht aufzubereiten [1]. Im Folgenden wird ein Vorschlag für eine hands-on-Lernaktivität im Themenbereich Magnetfelder vorgestellt.

Im Rahmen der Lehrerfortbildungen am CERN berichten Lehrerinnen und Lehrer oft, dass für moderne Physik wie zum



Abb. 1: Kompasse zeigen das Donut-förmige (toroidale) Magnetfeld im Selbstbaumodell des ATLAS-Magnetsystems

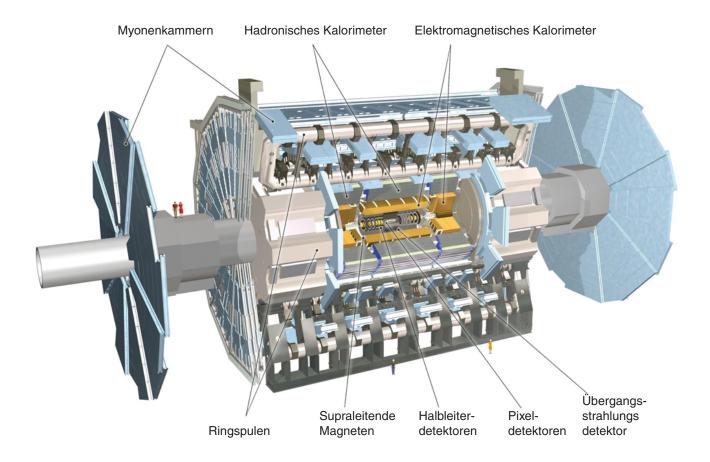


Abb. 2: Schematische Darstellung des ATLAS-Detektors und seiner Subsysteme. © 2008 CERN

Beispiel Teilchenphysik nur wenig oder gar keine Zeit im Unterricht vorgesehen ist, u. a. weil der jeweilige Lehrplan dieses Themengebiet nicht einschließt. Das Team des Teilchenphysik-Schülerlabors S'Cool LAB am CERN hat sich zur Aufgabe gemacht, Schülerinnen und Schüler in Kontakt mit moderner Physik zu bringen. Mithilfe von hands-on-Workshops können Schülerinnen und Schüler verschiedene Aspekte der Teilchenphysik selbstständig erforschen, wenn sie das CERN in Genf besuchen. Für

Schulklassen ohne Möglichkeit einer Exkursion nach Genf möchten wir in diesem Artikel eine neue Idee zum Experimentieren im Klassenzimmer vorstellen.

Im Folgenden stellen wir ein Selbstbau-Modell des Magnetsystems des ATLAS-Detektors am CERN vor (Abb. 1). Mit diesem Modell kann man Aspekte der Teilchenphysik in den Unterricht einbinden, indem man ausgehend vom Themengebiet "Felder" einen Abstecher in die moderne Physik macht. Das Themengebiet "Felder" ist ein wesentlicher Bestandteil im Lehrplan für allgemeinbildende höhere Schulen aller deutschen Bundesländer sowie in Österreich. Im Zusammenhang mit Teilchenbeschleunigern wie dem LHC am CERN wird oft von starken Magnetfeldern berichtet, die die beschleunigten Teilchen auf der 27 km langen Kreisbahn halten. Weniger bekannt ist, dass auch in den Detektoren am LHC extrem starke (supraleitende) Elektromagnete verbaut sind, ohne die eine detaillierte Analyse

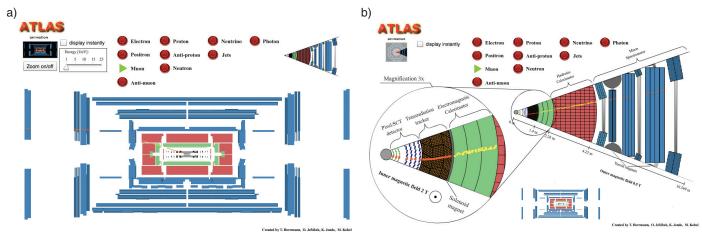


Abb. 3: Interaktive ATLAS-Simulation [7]. Im Bild links sieht man die Signatur eines Myons in der Längsschnittansicht des ATLAS-Detektors. Die Spur wird durch das toroidale Magnetfeld in den Myonenkammern nach unten abgelenkt. In der Simulation stehen sowohl eine Längsschnittansicht (a) als auch eine Querschnittsansicht (b) zur Verfügung. Die Ablenkung von Myonen aufgrund des toroidalen Magnetfeldes sieht man aufgrund dessen Orientierung jedoch nur in der Längsschnittansicht.

der Teilchenkollisionen nicht möglich wäre. Mithilfe der Anleitung in diesem Artikel können Jugendliche ein Modell des Magnetsystems des ATLAS-Detektors selbst nachbauen und erforschen.

Im nächsten Abschnitt wird zunächst ein Einblick in die Funktionsweise des ATLAS-Detektors am CERN gegeben. Danach wird eine Materialliste für das Modell des Magnetsystems präsentiert. Ein wichtiger Aspekt dabei ist, dass kostengünstige und leicht zugängliche Materialen beim Bau des Modells verwendet werden. Im darauffolgenden Abschnitt wird gezeigt, welche Messungen am Modell durchgeführt werden können und wie es in den Unterricht eingebunden werden kann. Am Schluss verweisen wir auf alternative Bauweisen u. a. bei Verfügbarkeit eines 3D-Druckers.

2 Der ATLAS-Detektor

ATLAS - A Toroidal LHC ApparatuS - ist der größte der vier Teilchendetektoren am LHC, die gebaut wurden, um Kollisionen von Protonen aufzuzeichnen. Mit einer Länge von 46 m und einem Durchmesser von 25 m wurde dieser Detektor wie ein "Schiff in der Flasche" unterirdisch am CERN in 100 m Tiefe zusammengebaut [2]. Pakete von jeweils ca. 100 Milliarden Protonen werden im LHC auf derzeit 6,5 TeV pro Proton gegenläufig beschleunigt und an vier Stellen im LHC zur Kollision gebracht u.a. im Zentrum des ATLAS-Detektors. ATLAS ist ein Vielzweckdetektor, sein physikalisches Forschungsprogramm umfasst verschiedenste Themen, unter anderem dunkle Materie, Materie-Antimaterie-Asymmetrie, Extradimensionen und mikroskopische schwarze Löcher sowie Supersymmetrie und die Suche nach weiteren Higgs-Bosonen [3].

Der ATLAS-Detektor wurde zwiebelschalenartig um den Kollisionspunkt herum konstruiert, um alle Teilchen, die aus der Energie der Kollision entstehen, genau zu vermessen. Verschiedene Subdetektoren sind jeweils auf das Vermessen von bestimmten Teilcheneigenschaften oder Teilchensorten spezialisiert (Abb. 2):

 Die innerste Komponente bilden die Spurdetektoren, die elektrisch geladene Teilchen nachweisen. Über mehrere Positionsmessungen kann die Spur der Teilchen rekonstruiert werden. Das homogene Magnetfeld eines supraleitenden Elektromagneten (Solenoid) durchsetzt die Spurdetektoren parallel zum Strahlrohr. Durch die Krümmung der Spuren im Magnetfeld können so zusätzlich der Impuls der Teilchen sowie deren elektrische Ladung bestimmt werden.

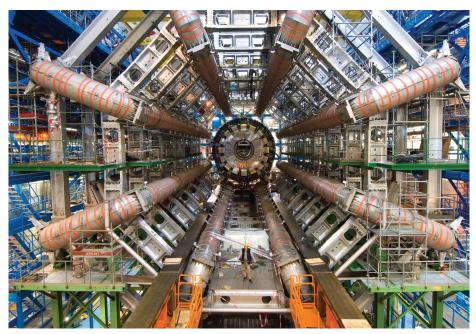


Abb. 4: Frontalansicht des toroidalen Magnetsystems des ATLAS-Detektors. © 2005–2016 CERN

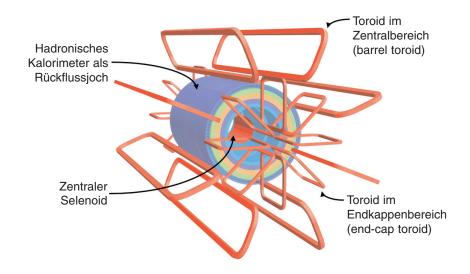


Abb. 5: Übersicht über die vier Magnetsubsysteme des ATLAS-Detektors aus [8]

	Parameter	Barrel Toroid	Zentraler Solenoid	End-Cap Toroid
Dimensionen und Masse der Magnet- Systeme	Innendurchmesser Außendurchmesser Länge Masse	9,4 m 20,1 m 25,3 m 830 t	2,5 m 2,6 m 5,8 m 5,7 t	1,7 m 10,7 m 5,0 m 2 x 239 t
Kennwerte der Spulen	Anzahl an Spulen Kabelmaterial Kabellänge Betriebstemperatur Windungszahl Betriebsstromstärke Spannung Gesamtwiderstand Feldstärke zwischen den Spulen	8 NbTi 56 km 4,5 K 120 20,5 kA 16 V 0,160 mΩ 0,2-2,5 T	1 NbTi 10 km 4,5 K 1154 8 kA 8 V 0,413 mΩ 0,9-2,0 T	2 x 8 NbTi 2 x 13 km 4,5 K 116 20,5 kA 16 V 0,244 Ω 0,2-3,5 T

Tab. 1: Kennwerte der Toroiden und des Solenoiden im ATLAS-Magnetsystem [8]

	Parameter	Barrel Toroid	Modell Toroid
Dimensionen und Masse der Magnet- Systeme Kennwerte der Spulen	Innendurchmesser Außendurchmesser Länge Masse Anzahl an Spulen Kabelmaterial Betriebstemperatur Windungszahl Betriebsstromstärke Spannung Gesamtwiderstand Durchschnittliche Feldstärke zwischen den Spulen	9,4 m 20,1 m 25,3 m 830 t 8 Niob-Titan 4,5 K 120 pro Spule 20,5 kA 16 V 0,160 mΩ 0,5 T	10 cm 20 cm 24 cm 200 g 8 Kupfer Raumtemperatur 7 pro Spule 1 A 1 V 1 Ω 0,2 mT

Tab. 2: Vergleich zwischen Magnetsystem des ATLAS-Detektors und Modell des Toroidmagneten

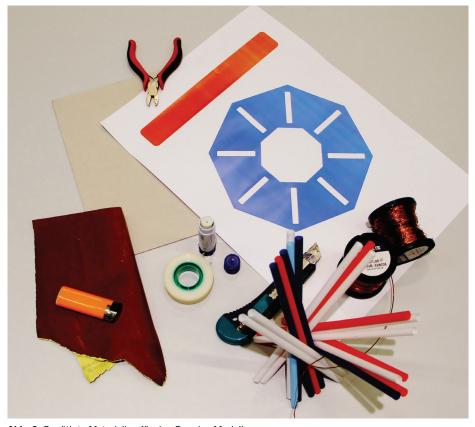


Abb. 6: Benötigte Materialien für den Bau des Modells

- Das elektromagnetische Kalorimeter weist elektromagnetisch wechselwirkende Teilchen nach. Elektronen, Positronen und Photonen werden in dieser Schicht des ATLAS-Detektors vollständig absorbiert, dabei wird über Ionisationsprozesse die ursprüngliche Energie dieser Teilchen bestimmt.
- Im hadronischen Kalorimeter werden alle Hadronen, also zum Beispiel Protonen und Neutronen, absorbiert. Dabei wird durch die Auswertung von Szintillationslicht die ursprüngliche Energie dieser Teilchensysteme bestimmt.
- Die Myonenkammern bilden die äußeren Schichten des ATLAS-Detektors und weisen in mehreren Lagen Myonen und Anti-Myonen nach. Auch die Myonenkammern sind von einem starken Magnetfeld durchsetzt, um über die Krümmung im Magnetfeld die elektrische Ladung und den Impuls der (Anti-)Myonen noch genauer als im Spurdetektor zu bestimmen. Dieses Magnetfeld wird durch acht Spulen erzeugt, die symmetrisch um den Zentralbereich des Detektors angeordnet sind und somit ein Donut-förmiges (toroidales) Magnetfeld erzeugen.

Das Video "Das ATLAS-Experiment: eine neue Hoffnung (Episode I)" [4] bietet einen ersten Eindruck in den Aufbau des AT-LAS-Detektors. Unterrichtsmaterialien für ein Gruppenpuzzle zur Funktionsweise der verschiedenen Detektorkomponenten basierend auf dem Video "ATLAS Episode II – die Teilchen schlagen zurück" [5] wurden vom Netzwerk Teilchenwelt erarbeitet und sind online zu finden [6]. Eine interaktive Simulation [7] bietet Lernenden zusätzlich die Möglichkeit, die Signaturen von verschiedenen Teilchen im ATLAS-Detektor zu erforschen. Auch die energieabhängige Krümmung der Spuren in den Magnetfeldern wird hier berücksichtigt (Abb. 3).

Oft sprechen Teilchenphysikerinnen und -physiker statt vom ATLAS-Detektor auch vom ATLAS-Experiment oder der ATLAS-Kollaboration, dies kann zu Verwirrung führen. Tatsächlich bezeichnet der Name ATLAS sowohl den Detektor als auch die rund 3000 Personen starke internationale Kollaboration aus Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, die zusammen den Detektor betreiben und dessen Daten auswerten – also zusammen ein Experiment am LHC durchführen.

Der gesamte ATLAS-Detektor ist eine der wohl komplexesten Maschinen auf der Welt. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler der ATLAS-Kollaboration sind daher meist nur auf eine ganz bestimmte Komponente des Detektors bzw. der Physik-Analyse spezialisiert. Im Folgenden beschränken wir uns auf die Beschreibung einer der wichtigsten Komponenten des ATLAS-Detektors: seinem Magnetsystem (Abb. 4).

3 Das Magnetsystem von ATLAS

Das Magnetsystem des ATLAS-Detektors besteht aus vier Subsystemen (Abb. 5). Den inneren Detektor mit den Spurdetektoren umgibt ein Solenoidmagnet. Durch ihn werden alle elektrisch geladenen Teilchen durch die auf sie wirkende Lorentzkraft abgelenkt, sodass über die Spurkrümmung deren Impuls berechnet werden kann. Zwischen den Myonenkammern befinden sich das zentrale Toroid-System (barrel toroid) und zwei Endkappen-Toroid-Systeme (end-cap toroids), die speziell zur Messgenauigkeit bei der Impulsmessung von (Anti-)Myonen beitragen. Das Design der einzelnen Systeme unterscheidet sich voneinander, aber alle beruhen auf supraleitenden Niob-Titan/Kupfer-Kabeln stabilisiert mit Aluminium, die mit flüssigem Helium auf wenige Kelvin gekühlt werden. Zusammen speichern die vier Systeme eine Energie von 1600 MJ und sorgen auf einem Volumen von 12000 m³ für ein Magnetfeld zwischen 50 mT und 4,1 T [8]. In Tab. 1 sind die Kennwerte der Magnetsysteme gelistet.

Der Solenoid-Elektromagnet wurde so geplant, dass die Teilchen wenig Energie verlieren, wenn sie durch das Spulenmaterial fliegen, aber dennoch ein starkes Magnetfeld für eine messbare Krümmung der Bahnen der elektrisch geladenen Teilchen sorgt. Das Solenoid-Magnetfeld spielt aber lediglich innerhalb des hadronischen Kalorimeters eine Rolle, außerhalb wird es vernachlässigbar klein. Der Grund dafür ist der Stahl, der im hadronischen Kalorimeter verbaut ist. Er dient als Rückflussjoch für das Solenoid-Magnetfeld und schirmt somit den äußeren Detektor mit den Myonenkammern von dem Magnetfeld im inneren Detektor ab (Abb. 5).

Namensgebend für ATLAS ist sein ringförmiges (toroidales) Magnetfeld, das im Zentralbereich (Barrel) durch acht 25 m lange supraleitende Spulen erzeugt wird, die zylinderförmig um das Strahlrohr angeordnet sind. Eines der bekanntesten Bilder vom Zusammenbau des ATLAS-Detektors zeigt das toroidale Magnetsystem (Abb. 4). Die Magnetfelder der einzelnen Spulen summieren sich zu einem ringförmigen Magnetfeld zwischen den Spulen.

Im Bereich der Endkappen (end-caps) sorgen zwei weitere toroidale Spulensysteme für das dortige Magnetfeld, sodass auch



Abb. 7: Mögliche Messgeräte für die Erforschung des Modells

(Anti-)Myonen, die unter einem kleinen Winkel zum Strahlrohr emittiert werden, im Magnetfeld abgelenkt werden. Die Toroiden der Endkappen sind um 22,5° gegenüber dem Toroiden im Zentralbereich verdreht, um die Ablenkung der (Anti-)Myonen im Übergangsbereich zu optimieren.

Da die exakte Berechnung des summierten Magnetfeldes aus den einzelnen Subsystemen sehr kompliziert ist (u.a. weil auch magnetisierbare oder ferromagnetische Materialien im Detektor das Feld beeinflussen), wurden 1730 dreidimensionale Hall-Sonden genutzt, um das Magnet-

feld im Bereich der Myonenkammern genau zu vermessen. Nur bei genauer Kenntnis des Magnetfeldes können so die Impulse der Teilchen mit der notwendigen Präzision berechnet werden.

4 Vom realen ATLAS-Detektor zum Modell des toroidalen Magnetsystems

Um Aspekte des ATLAS-Detektors für Jugendliche verständlich zu machen, wurde im CERN S'Cool LAB im Rahmen des Internationalen Lehrerprogrammes 2014 ein erstes Modell des toroidalen Magnetsystems des ATLAS-Detektors gebaut. Überraschen-

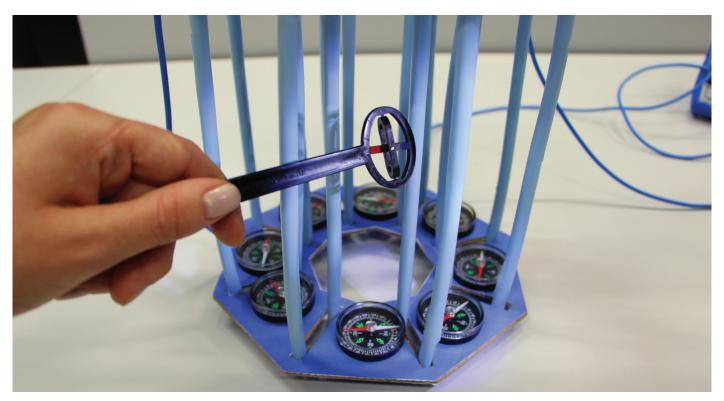


Abb. 8: Erforschen des Magnetfeldes mithilfe eines Magnetfeldprobers

derweise lässt sich aus Kupferlackdraht und gewissen mechanischen Stützelementen relativ einfach ein solches Modell fertigen und im Anschluss mit Kompassen, Hall-Sonden oder Smartphone-Apps vermessen. Der Bau und die Vermessung eines solchen Modells bietet eine einmalige Gelegenheit, Wissen über das Magnetfeld von Spulen im Kontext Teilchenphysik zur Anwendung zu bringen. Überlegungen zur Lorentzkraft auf elektrisch geladene Teilchen am Modell im Vergleich mit Simulationen ergänzen die Verwendbarkeit im Unterricht.

Das Modell, das wir vorschlagen, stellt das Magnetsystem des ATLAS-Detektors etwa im Größenverhältnis 1:100 dar, Kennwerte des Modells im Vergleich zum realen Magnetsystem sind in Tab. 2 gelistet. Statt supraleitenden NbTi-Kabeln verwenden wir Kupferlackdraht. Damit erhöht sich der elektrische Widerstand unseres Modells auf 1Ω , das 6250-Fache des echten Magnetsystems, dafür entfällt die aufwendige Heliumkühlung. Eine Spannung von 1 V genügt, um mithilfe des Modells Kompassnadeln bei etwa 0,2 mT auszurichten. Im echten Detektor reichen aufgrund der supraleitenden Materialien bereits 16 V, um ein Magnetfeld von bis zu 4T zu erzeugen. Um den Bau zu vereinfachen, reduzieren wir die Windungszahl der Spulen von 120 (real) auf 7 (Modell).

Im Unterricht können und sollten Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen Realität und Modell ausführlich diskutiert werden, es bietet sich auch eine allgemeine Diskussion zur Verwendung von Modellen in der Physik an. Falls Zeit dafür vorhanden ist, können die Jugendlichen selbstständig die Kennwerte des Magnetsystems des ATLAS-Detektors recherchieren (z.B. mithilfe von [8]), sowie das Modell selbstständig vermessen und damit Tab. 2 ausfüllen und interpretieren.

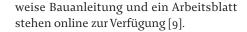
5 Bauanleitung für das Modell des ATLAS-Magnetsystems

Viele Materialien, die man für das ATLAS-Modell benötigt, sind an Schulen vorhanden (Abb. 6). Ein Überblick, was für den Bau und auch für das spätere Messen benötigt wird, bietet die folgende Liste.

Benötigte Materialien

- Strohhalme (Ø 8 mm, 22 cm lang)
- Kupferlackdraht (Ø 1 mm, 30 m lang)
- Karton (ca. 25 cm x 50 cm)
- · Cutter, Drahtschere und Lineal
- Feuerzeug und Sandpapier
- Klebeband, Klebstoff sowie zwei blaue und eine rote Vorlage(n) [9]
- Eventuell Drucker, der A3 drucken kann
- Netzgerät (12 V DC), Laborkabel, Multimeter
- Kompasse, Magnetfeldprober [10], Hallsonde oder 3D-Kompass-App [11] (Abb. 7)

Für den Bau des Modells werden zunächst acht einzelne Spulen gewickelt, indem zwei Strohhalme an einem Abstandhalter aus Karton befestigt werden und man 7 Wicklungen des Kupferlackdrahts durch die Strohhalme führt. Im Folgenden werden die Spulen schrittweise in eine Stützstruktur aus Karton eingegliedert und miteinander elektrisch leitend verbunden. Druckvorlagen sowie eine schritt-



6 Messmöglichkeiten

Bevor das Netzgerät angeschlossen wird, sollte überprüft werden, ob alle Kontakte elektrisch leitend sind. Dafür misst man am besten den elektrischen Widerstand mit einem Multimeter. Es ist möglich, dass einige Verdrillungen des Kupferdrahts nicht fest genug sind oder die isolierende Lackierung des Drahtes nicht sorgfältig genug entfernt wurde. Nach der Überprüfung kann das Netzgerät angeschlossen werden. Die Richtung des erzeugten Magnetfeldes kann zum Beispiel mit Kompassen gemessen werden. Dabei lohnt es sich, einen Magnetfeldprober zu verwenden: Damit kann das Magnetfeld überall innerhalb und außerhalb des Modells vermessen werden, ohne das Modell jeweils zu verkippen (Abb. 8). Eine weitere Möglichkeit, das Magnetfeld zu vermessen, bietet eine Hallsonde. Somit kann auch die Stärke des Magnetfeldes gemessen werden. Für die Schule ebenfalls gut geeignet ist die Messmöglichkeit mit einer 3D-Kompass-App am Smartphone. Schülerinnen und Schüler können dabei Richtung und Stärke des Feldes messen.

7 Empfehlung für den Unterricht

Für den Bau und die Erforschung des Modells im Unterricht bietet sich die Arbeit in Kleingruppen an. Jede der Kleingruppen baut ein eigenes ATLAS-Modell. Schülerinnen und Schüler fertigen alleine oder zu zweit eine Spule an, messen deren Magnetfeld und fertigen eine Skizze des Magnetfeldverlaufs an. Diese Skizzen werden dann in den Gruppen verglichen. Im Weiteren werden nach und nach die Spulen zusammengefügt. Dabei kann nach jeder neu hinzugefügten Spule das Feld visualisiert werden. Es wird zudem diskutiert, wie sich die Felder der einzelnen Spulen gegenseitig beeinflussen. Zur Vermessung des Magnetfeldes können, wie im vorigen Abschnitt gezeigt, verschiedenen Messgeräte verwendet werden. Natürlich können mit einzelnen Spulen viele verschiedene Messungen durchgeführt werden. Beispielsweise kann das Magnetfeld zweier gegenüberliegenden Spulen in verschiedenen Abständen vermessen werde.

Idealerweise wird nicht nur das Magnetfeld an sich im Unterricht diskutiert, sondern auch, wozu Magnetfelder in Teilchendetektoren genutzt werden. Leider ist das Magnetfeld unseres Modell etwas zu schwach, um darin die Ablenkung eines Elektronenstrahls (ca. 250 eV) zu zeigen,

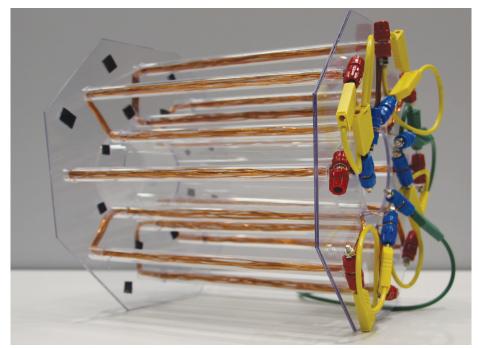


Abb. 9: Modell aus Akrylglas

Bauanleitung - siehe [9]



Schritt 1

Ein Stück Karton kann als Platzhalter zwischen zwei Strohhalmen verwendet werden. Die rote Vorlage sollte dazu ausgedruckt und auf Karton geklebt werden. Danach befestigt man an beiden langen Seiten einen Strohhalm mit Klebeband.



Schritt 2

Mit einen Kupferlackdraht (insgesamt ca. 30 m) kann man nun die Spulen wickeln. Für 7 Windungen benötigt man ca. 3,5 m Kupferdraht, zusätzlich sollte ca. 20 cm Rest an beiden Enden eingerechnet werden. Nachdem die Spule fertig ist, kann der Platzhalter entfernt werden.

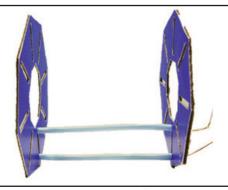
Schritt 1 und 2 werden acht Mal wiederholt.



Schritt 3

Mithilfe der blauen Vorlage wird nun die Halterung für die acht Spulen gefertigt. Dafür wird das Papier wieder ausgedruckt und auf einen Karton geklebt. Danach werden alle weißen Stellen mit einem Cutter entfernt.

Schritt 3 wird zwei Mal wiederholt.



Schritt 4

Die Spulen werden nun in die dafür vorgesehenen Schlitze gesteckt. Dabei muss beachtet werden, dass alle offenen Spulenenden an derselben Seite sind. Wenn der Karton leicht knickt, empfiehlt es sich, Schritt 3 viermal zu wiederholen und jeweils zwei ausgeschnittene Teile auf einander zu kleben.



Schritt 5

Mithilfe eines Feuerzeugs und/oder Sandpapiers kann nun die Isolierung an den Enden des Kupferdrahts entfernt werden. Anschließend wird das äußere Drahtende einer Spule mit dem inneren Drahtende der benachbarten Spule verdreht. Am Ende sollten noch zwei Drahtenden unverdreht bleiben, um diese mit der Spannungsversorgung zu verbinden.

und die Geometrie des Modell erschwert einen geeigneten Versuchsaufbau. Falls vorhanden, bietet sich hier aber ein vergleichbares Experiment zur Lorentzkraft an. Alternativ können Jugendliche ihr erworbenes Wissen nutzen, um Vorhersagen zur Ablenkung von elektrisch geladenen Teilchen zu treffen. Mithilfe der ATLAS-Simulation [7] oder durch eine Gruppendiskussion können die Vorhersagen überprüft bzw. diskutiert werden. Nebenbei können Rechenfertigkeiten geübt werden, unter anderem zum ohm'schen Widerstand oder zur Berechnung des elektrischen Widerstands aus dem spezifischen Widerstand und weiteren Kennwerten des Leiters. Bei der Findung weiterer Mess- und Experimentierideen sind der Phantasie keine Grenzen gesetzt, die Autorinnen freuen sich über weitere kreative Vorschläge.

8 Weitere Ideen und Danksagung

Das Modell aus Karton und Strohhalmen hat einige Vorteile, zum Beispiel sind die Materialien günstig und Schülerinnen und Schüler können es problemlos selbstständig bauen. Leider ist es aber nicht allzu stabil. Für ein stabileres Modell kann anstatt Strohhalmen und Karton auch Akrylglas verwendet werden (Abb. 9). Ein solches Modell wurde im Rahmen des internationalen Lehrerprogrammes am CERN im S'Cool LAB entwickelt und erforscht.

Bei Zugang zu einem 3D-Drucker kann ein noch wahrheitsgetreueres Modell des

Magnetsystems gebaut werden. Als Sommerstudent am CERN hat *Tiago Goncalves* im S'Cool LAB an einem solchen Modell gearbeitet [12]. Auf diesem Wege möchten sich die Autorinnen bei *Tiago Goncalves* und den S'Cool LAB Arbeitsgruppen der Internationalen Lehrerprogramme 2014 und 2015 am CERN bedanken, die zur Idee dieses Artikels beigetragen haben. Außerdem danken wir allen, die uns bei der Entwicklung des Modells in kognitiver oder praktischer Weise unterstützt haben.

Literatur

[1] Whyntie, T., Bithray, H., Cook, J., Coupe, A., Eddy, D., Fickling, R. L., McKenna, J., Parker, B., Paul, A., & Shearer, N. (2015). CERN@ school: demonstrating physics with the Timepix detector. Contemporary Physics, 56(4), 451–467. Bzw. S'Cool LAB Website http://cern.ch/s-cool-lab [2] ATLAS OUTREACH (2012): Video vom Zusammenbau des ATLAS-Detektors (in Englisch) CERN-MOVIE-2012-151-001 https://cds.cern.ch/record/1483758 [3] ATLAS-Experiment http://atlas.cern/ [4] Video "Das ATLAS Experiment : eine neue Hoffnung (Episode I)", CERN-MOVIE-2006-054-001 http://cds.cern.ch/record/1458003 [5] Video "ATLAS Episode II – die Teilchen schlagen zurück", CERN-MOVIE-2006-051-001 http://cds.cern.ch/record/1457384 [6] Kobel, M. (Hrsg.), Trefzger, T. (Hrsg.) (2013): Der ATLAS-Detektor. Ein Teilchendetektor am CERN. http://www.teilchenwelt.de/material/

materialien-fuer-lehrkraefte/der-atlasdetektor/

[7] Hermann, T., Jeřábek, O., Jende, K, Kobel, M. (2012): Interaktive Simulation des ATLAS-Detektors: http://atlas.physicsmasterclasses. org/de/wpath_teilchenid1.htm.

[8] ATLAS Collaboration (2008): The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider In: J. Instrum. 3 (2008) S08003

https://cdsweb.cern.ch/record/1129811 und The ATLAS Experiment © 2011 CERN (2011): ATLAS Fact Sheet.

https://cds.cern.ch/record/1457044/files/
ATLAS%20fact%20sheet.pdf
[9] Druckvorlagen sowie ein Arbeitsblatt inklusive Bauanleitung sind online erhältlich unter http://cern.ch/s-cool-lab/content/downloads
[10] Magnetfelderprober, S'Cool LAB 3D Design für 3D Drucker

https://www.thingiverse.com/thing:1722286 [11] Magnetmeter App

https://www.plaincode.com/products/magnet meter/ (kostenfrei für Android, \$1,99 für iOS) [12] ATLAS barrel toroid model, Design für 3D Drucker

https://www.thingiverse.com/thing:1722230

Anschriften der Verfasserinnen

Alexandra Feistmantl, Teacher and Student Programmes Section, CERN, Genève 23, Schweiz

E-Mail: alexandra.feistmantl@cern.ch Julia Woithe, Teacher and Student Programmes Section, CERN, Genève 23, Schweiz E-Mail: julia.woithe@cern.ch