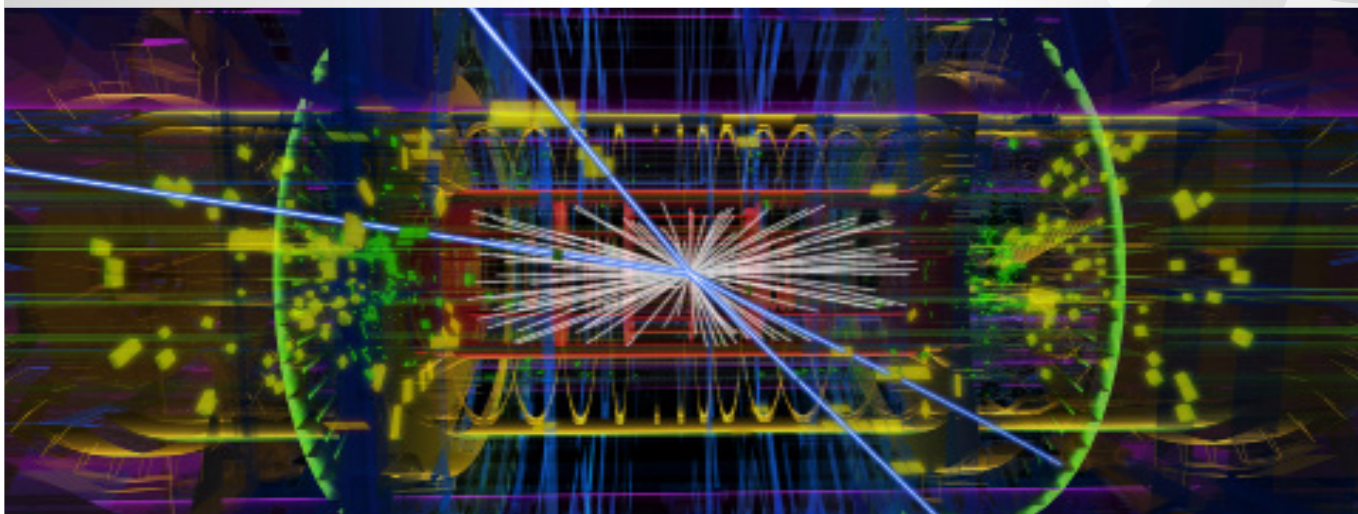




NETZWERK
TEILCHENWELT



DER ATLAS-DETEKTOR

EIN TEILCHENDETEKTOR AM CERN

ATLAS ist einer von vier Detektoren am Teilchenbeschleuniger LHC. Mit ihm werden Teilchen nachgewiesen, die bei der Kollision von Protonen oder Blei-Ionen entstehen. Die vorliegenden Materialien vermitteln die Technik und Funktionsprinzipien des ATLAS-Detektors auf anschauliche Weise.

IMPRESSUM Herausgeber: Michael Kobel, Thomas Trefzger Autoren: Manuela Kuhar (verantwortlich), Fabian Kuger Redaktion: Michael Rockstroh, Sascha Schmeling, Gerfried Wiener, Uta Bilow, Caroline Förster Layout und Grafiken: büro quer, www.buero-quer.de Projektleitung: Michael Kobel (Gesamtprojekt) Netzwerk Teilchenwelt | TU Dresden, Institut für Kern- und Teilchenphysik | www.teilchenwelt.de, mail@teilchenwelt.de | Thomas Trefzger (Projekt Kontextmaterialien) Julius-Maximilians-Universität Würzburg | Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik Redaktionsschluss: Januar 2017 Lizenz und Nutzung: Creative Commons 2.0-by-nc-nd | Vervielfältigung und Weiterverbreitung des Inhalts ist bei Nennung der Quelle für Lehrzwecke ohne Rückfragen gestattet, sofern keine Veränderungen vorgenommen werden. Kommerzielle Nutzung, z.B. zu werblichen Zwecken oder in Lehrbüchern, ist ohne Rücksprache nicht gestattet. Es gilt das Impressum unter www.teilchenwelt.de/service/impressum.

PROJEKMLEITUNG



PARTNER



KOOPERATION



SCHIRMHERRSCHAFT



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

DER ATLAS-DETEKTOR

HINWEISE FÜR LEHRKRÄFTE

INHALT

Didaktische Hinweise	26
Methodische Anregungen	27
Arbeitsblatt 1: Die Detektorkomponenten (Expertenpuzzle)	28
Arbeitsblatt 2/3: Zusammenfassung	29-30
Arbeitsblatt 4: Teilchensorten unterscheiden	31
Lösungen zu den Arbeitsblättern	32-39
Skript zum Film	40-41
Hintergrundinformationen	42-44

Kurzbeschreibung

ATLAS ist ein moderner Detektor für Elementarteilchen. Er befindet sich am Teilchenbeschleuniger LHC (Large Hadron Collider) am Forschungszentrum CERN bei Genf. Der Film „ATLAS Episode II: Die Teilchen schlagen zurück“ (Link siehe unten) eignet sich gut zur Einführung in seine Funktionsweise. Jugendliche können die Komponenten des ATLAS-Detektors beispielsweise in einem Expertenpuzzle erarbeiten. Das zugehörige Materialpaket enthält die benötigten Videoausschnitte sowie Präsentationsfolien zur Zusammenfassung der wichtigsten Inhalte.



Originalvideo „ATLAS Episode II – die Teilchen schlagen zurück“: <http://cds.cern.ch/record/1457384>
Videoausschnitte als zip-Datei: <http://www.teilchenwelt.de/material/materialien-fuer-lehrkraefte/der-atlas-detektor>
Präsentationsfolien (ppt): <http://www.teilchenwelt.de/material/materialien-fuer-lehrkraefte/der-atlas-detektor>
Experimente am LHC: <http://www.weltmaschine.de/experimente>
Animation – Signalmuster im ATLAS-Detektor: http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath_teilchenid1.htm

Einordnung im Unterricht

- Die Vorstellung eines modernen Teilchendetektors bietet sich ab der 10. Klasse im Rahmen einer Unterrichtsreihe über Teilchenphysik an.
- Das Thema eignet sich gut zur Nachbereitung einer Teilchenphysik-Masterclass.
- Im Anschluss an eine Einführung des Standardmodells und/oder an dessen historische Entwicklung kann die Überleitung zu modernen Detektoren wie ATLAS erfolgen.
- Wurden zuvor einfachere Detektoren, wie beispielsweise eine Nebelkammer, eingeführt oder selbst gebaut (siehe das Materialpaket „Selbstbau einer Nebelkammer“ vom Netzwerk Teilchenwelt), bietet sich die Gegenüberstellung mit dem modernen ATLAS-Detektor an.

Vorkenntnisse

- Atomaufbau: Protonen, Neutronen, Elektronen
- Elementarteilchen: Quarks, Leptonen, Elektronen, Myonen, Photonen, Neutrinos
- Ionisation
- Impuls, Energie
- Ablenkung geladener Teilchen im Magnetfeld

Inhalte und Ziele

Die Jugendlichen...

- ... bekommen einen Überblick über den Aufbau und die Funktionsweise des ATLAS-Detektors.
- ... erklären, wie man mit ATLAS Messgrößen wie Impuls, elektrische Ladung und Energie bestimmt.
- ... beschreiben, wie bestimmte Teilchensorten in den Komponenten des ATLAS-Detektors wechselwirken.
- ... erläutern, wie elektrische Signale in Detektoren erzeugt werden können (Ionisation, Szintillation).
- ... beschreiben, wie man Teilchensorten anhand ihrer charakteristischen Signalmuster unterscheiden kann.
- ... üben, die wichtigsten Informationen aus Filmsequenzen zu extrahieren.

Auch weitere Themen sind denkbar. Beispielsweise ließe sich erörtern, warum verschiedene Teilchensorten jeweils unterschiedlich mit den Detektor-Komponenten wechselwirken und wie man aus den Teilchenspuren bzw. den erzeugten elektrischen Signalen auf die Eigenschaften der nachzuweisenden Teilchen schließt.

Die vorliegenden Materialien konzentrieren sich auf die im Film vermittelten Inhalte.

METHODISCHE ANREGUNGEN

Der Film „ATLAS Episode II – Die Teilchen schlagen zurück“ beginnt mit einer allgemeinen Übersicht über den ATLAS-Detektor und stellt dann die verschiedenen Detektorschichten von innen nach außen vor. Somit bietet sich eine Bearbeitung in Expertengruppen an. Dies kann folgendermaßen ablaufen:

► Einführung und Expertengruppen:

Zuerst wird der ATLAS-Detektor allgemein im Plenum vorgestellt. Hierfür eignet sich der Videoausschnitt der zip-Datei, der den ersten 3:20 Minuten des Originalvideos entspricht.

Dann bildet man fünf Expertengruppen und weist jeder Gruppe eine Filmsequenz über eine bestimmte Detektorkomponente zu. Jede Gruppe füllt das **Arbeitsblatt 1** aus.

Sämtliche benötigten Videoausschnitte sind im zugehörigen Materialpaket (zip-Datei) enthalten.

Gruppe	Inhalt	Dateiname des Videoausschnitts	Länge des Videoausschnitts (Minuten)	Start- und Endzeit im Originalvideo
	Einführung	ATLAS_Intro	2:56	0:00 – 3:35
1a	Halbleiter-Spurdetektoren (Pixel- und Streifendetektor)	ATLAS_1a	3:16	3:35 – 6:37
1b	Übergangsstrahlungsdetektor	ATLAS_1b	1:44	6:38 – 7:50
2a	Elektromagnetisches Kalorimeter	ATLAS_2a	2:06	7:50 – 9:39
2b	Hadronisches Kalorimeter	ATLAS_2b	1:41	9:40 – 11:10
3	Myonenkammern	ATLAS_3	1:23	11:10 – 12:20

Es sollte ein ausreichender Zeitrahmen gegeben werden, um die kurzen Filmsequenzen mehrmals ansehen und diskutieren zu können.

Da die Gruppe 1a die längste Sequenz bearbeitet und zuerst präsentieren sollte, empfiehlt es sich, hierfür eine Gruppe auszuwählen, die den Ansprüchen gewachsen ist.

Wenn Sie weniger Zeit investieren möchten, können Sie exemplarisch zwei Detektorschichten herausgreifen. Als Beispiele bieten sich die Halbleiter-Spurdetektoren und das hadronische Kalorimeter an. Dann erfahren die Jugendlichen, wie die Spur bzw. die Energie eines Teilchens gemessen wird, und lernen zwei Möglichkeiten kennen, wie Teilchen im Detektor wechselwirken (Ionisation und Teilchenschauerbildung), sowie zwei Arten der Signalerzeugung (Ionisation und Szintillation).

► Zusammenführung der Ergebnisse (Arbeitsblätter 2 und 3):

Diese Arbeitsblätter dienen zur Zusammenführung der Ergebnisse. Es bieten sich verschiedene Methoden an:

- Die Jugendlichen erklären sich die Detektorkomponenten gegenseitig in gemischten Gruppen und füllen die Arbeitsblätter gemeinsam aus.
- Jede Expertengruppe präsentiert ihre Detektorkomponente den anderen Teilnehmern, ggf. mit einem Poster.
- Der Film wird im Plenum abschnittsweise durchgegangen, jedoch ohne Ton. Dabei kommentiert ein Experte aus der entsprechenden Gruppe den jeweiligen Filmabschnitt.

► Teilchensorten unterscheiden (Arbeitsblatt 4):

Dieses Arbeitsblatt fasst zusammen, wie verschiedene Teilchensorten in den Komponenten des ATLAS-Detektors wechselwirken. So wird deutlich, wie Forscher Teilchensorten anhand der jeweiligen Signalmuster unterscheiden können. Im einführenden Video werden die Signale verschiedener Teilchenspuren zu Anfang kurz vorgestellt; mithilfe der erworbenen Kenntnisse über die verschiedenen Komponenten des ATLAS-Detektors können die Jugendlichen nun nachvollziehen, wie die Signalmuster zustandekommen.

- Das Arbeitsblatt kann nach dem Expertenpuzzle eingesetzt werden. Die Jugendlichen können ihre Kenntnisse über die einzelnen Detektorkomponenten in gemischten Gruppen zusammenführen.
- Alternativ kann das Arbeitsblatt nach einer Teilchenphysik-Masterclass zur Wiederholung dienen.



DER ATLAS-DETEKTOR

ARBEITSBLATT 1: DIE DETEKTORKOMPONENTEN

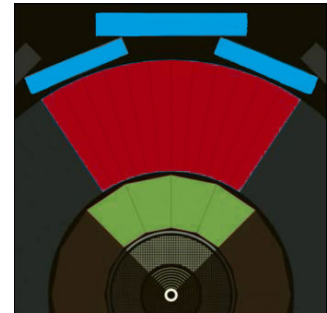
Im Teilchenbeschleuniger LHC am Forschungszentrum CERN bei Genf kollidieren Protonen mit einer Energie von jeweils 6,5 Tera-Elektronenvolt (TeV). Bei der Kollision entstehen neue Teilchen, die mithilfe von Detektoren nachgewiesen werden.

Der ATLAS-Detektor besteht aus mehreren Schichten. In diesen verhalten sich verschiedene Teilchensorten jeweils anders. So können Forscher Teilchensorten unterscheiden und Messgrößen wie Impuls und Energie bestimmen.



- Welcher Teil des ATLAS-Detektors wird in deinem Video-Ausschnitt vorgestellt?

- Zeichne in der Grafik rechts ein, wo sich diese Detektorkomponente befindet:



1. Welche Teilchensorten weist man mit diesem Teil des Detektors nach?

- | | | |
|---|--|------------------------------------|
| ☐ Elektronen | ☐ Myonen | ☐ Neutrinos |
| ☐ Protonen | ☐ Photonen | ☐ Neutronen |
| ☐ alle elektrisch geladenen Teilchen | ☐ alle Hadronen | |
| ☐ alle elektrisch neutralen Teilchen | ☐ alle Leptonen | |

2. Was geschieht, wenn diese Teilchen mit dem Detektor-Material wechselwirken?

- ☐ Sie ionisieren Atome, d.h. sie setzen Elektronen frei.
- ☐ Sie erzeugen Photonen.
- ☐ Sie wechselwirken mit den Atomkernen und erzeugen Teilchenschauer aus Hadronen.
- ☐ Sie erzeugen Teilchenschauer aus Elektronen, Positronen und Photonen.

Bei diesen Prozessen entstehen Sekundärteilchen, die elektrische Signale erzeugen.
Anhand dieser Signale bestimmen Forscher die Eigenschaften des ursprünglichen Teilchens.

3. Nur für Gruppen 1b, 2a und 2b: Wie erzeugen die Sekundärteilchen elektrische Signale?

- ☐ Ionisation
- ☐ Szintillation

4. Welche physikalische(n) Größe(n) bestimmt man mit diesem Teil des Detektors?

- | | |
|---|---|
| ☐ Energie des ursprünglichen Teilchens | ☐ Impuls des Teilchens |
| ☐ elektrische Ladung des Teilchens | ☐ Spur des Teilchens |

5. Woraus besteht dieser Teil von ATLAS?

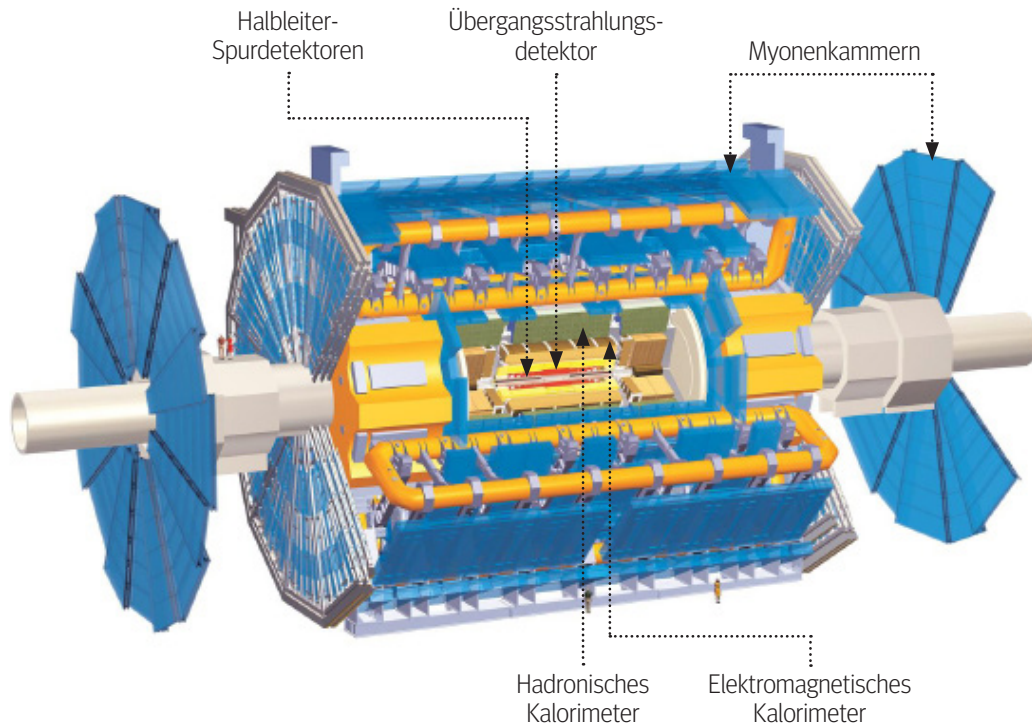
- | | | |
|-----------------------------------|--|---|
| ☐ Silizium | ☐ flüssiges Argon | ☐ Gas in Driftröhren |
| ☐ Blei | ☐ Stahl | ☐ Szintillatoren |

6. Beschreibe kurz in eigenen Worten, was in der Detektor-Komponente geschieht:



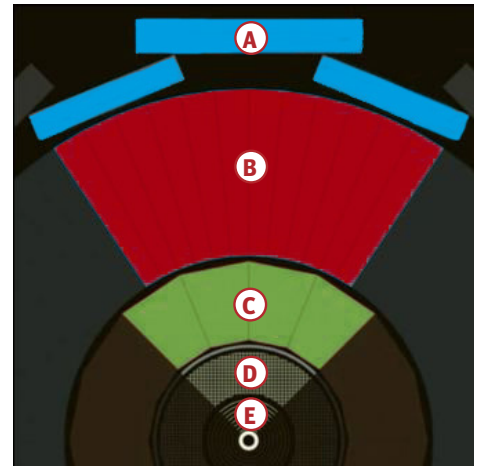
DER ATLAS-DETEKTOR

ARBEITSBLATT 2: ZUSAMMENFASSUNG



Beschrifte die einzelnen Komponenten des ATLAS-Detektors in der Querschnittsansicht.

- A _____
- B _____
- C _____
- D _____
- E _____



- Wieso besteht der ATLAS-Detektor aus verschiedenen Detektorkomponenten?
- Einige Detektorkomponenten liegen in einem Magnetfeld. Warum?
- Die Spulen der Elektromagneten sind supraleitend. Warum ist das notwendig?



Video „ATLAS Episode II – Die Teilchen schlagen zurück“: <http://cds.cern.ch/record/1457384>
 Detektoren im LHC: <http://www.weltmaschine.de/experimente>

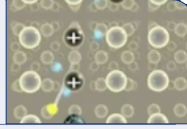


DER ATLAS-DETEKTOR

ARBEITSBLATT 3: ZUSAMMENFASSUNG



1a. Halbleiter-Spurdetektor

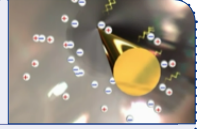


Nachgewiesene Teilchen:

Physikalische Größe(n):

Beschreibung des Prozesses:

1b. Übergangsstrahlungsdetektor

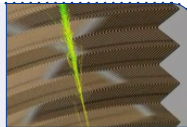


Nachgewiesene Teilchen:

Physikalische Größe(n):

Beschreibung des Prozesses:

2a. Elektromagnetisches Kalorimeter

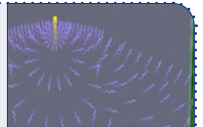


Nachgewiesene Teilchen:

Physikalische Größe(n):

Beschreibung des Prozesses:

2b. Hadronisches Kalorimeter

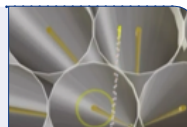


Nachgewiesene Teilchen:

Physikalische Größe(n):

Beschreibung des Prozesses:

3. Myonenkammern



Nachgewiesene Teilchen:

Physikalische Größe(n):

Beschreibung des Prozesses:



DER ATLAS-DETEKTOR

ARBEITSBLATT 4: TEILCHENSORTEN UNTERSCHIEDEN



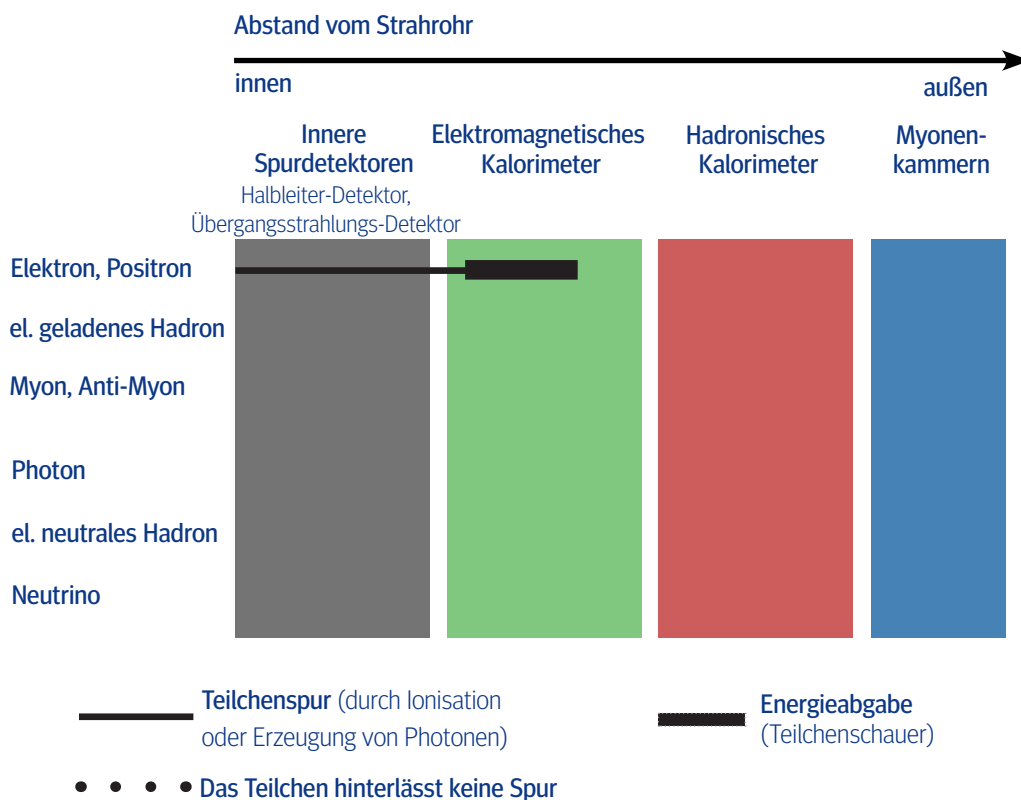
Im Teilchenbeschleuniger LHC am internationalen Forschungszentrum CERN bei Genf kollidieren Protonen mit einer Bewegungsenergie von jeweils 6,5 TeV. Bei der Kollision entsteht eine Vielzahl neuer Teilchen. Diese können sogar eine größere Masse haben als die ursprünglichen Protonen, da bei der Kollision ein Teil von deren Bewegungsenergie in Masse umgewandelt wird. Die entstandenen Teilchen oder ihre Umwandlungsprodukte werden in Detektoren nachgewiesen. So wollen Forscher beispielsweise das Higgs-Teilchen erzeugen oder herausfinden, woraus Dunkle Materie besteht.

Unten ist eine schematische Darstellung der Komponenten des ATLAS-Detektors zu sehen. Er besteht aus mehreren Schichten, in denen die Impulse und Energien der hindurchfliegenden Teilchen gemessen werden.

Der ATLAS-Detektor ermöglicht auch die Unterscheidung zwischen Teilchensorten: In den inneren Spurdetektoren und den Myonenkammern hinterlassen einige Teilchensorten Signale, indem sie das Detektormaterial ionisieren oder Photonen erzeugen. In den Kalorimetern geben einige Teilchensorten Energie ab, indem sie Teilchenschauer erzeugen. Je nach Teilchensorte entstehen so verschiedene Signalmuster.



- Zeichne in die Grafik ein, in welchen Detektorschichten die links angegebenen Teilchensorten Signale hinterlassen. Ein Beispiel ist vorgegeben.



- Warum hinterlassen Neutrinos keine Signale im ATLAS-Detektor?
 ➤ Wie weisen Forscher Neutrinos mit dem ATLAS-Detektor indirekt nach?
 ➤ Warum hinterlassen kurzlebige Teilchen wie das Higgs-Teilchen oder W- und Z-Teilchen keine Signale im Detektor?
 ➤ Wie weisen Forscher diese Teilchen nach?



Video „ATLAS Episode II – die Teilchen schlagen zurück“: <http://cds.cern.ch/record/1457384>
Animation – Signalmuster im ATLAS-Detektor: http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath_teilchenid1.htm
Detektoren im LHC: <http://www.weltmaschine.de/experimente>



DER ATLAS-DETEKTOR

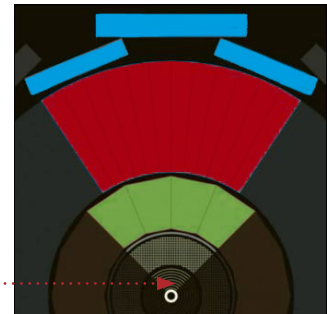
LÖSUNG FÜR ARBEITSBLATT 1/GRUPPE 1A: HALBLEITER-SPURDETEKTOREN



- Welcher Teil des ATLAS-Detektors wird in deinem Video-Ausschnitt vorgestellt?

Die Halbleiter-Spurdetektoren*

- Zeichne in der Grafik rechts ein, wo sich diese Detektorkomponente befindet:



1. Welche Teilchensorte(n) weist man mit diesem Teil des Detektors nach?

- | | | |
|--|--|------------------------------------|
| ☒ Elektronen | ☒ Myonen | ☐ Neutrinos |
| ☒ Protonen | ☐ Photonen | ☐ Neutronen |
| ☒ alle elektrisch geladenen Teilchen | ☐ alle Hadronen | |
| ☐ alle elektrisch neutralen Teilchen | ☐ alle Leptonen | |

2. Was geschieht, wenn diese Teilchen mit dem Detektor-Material wechselwirken?

- ☒ Sie ionisieren Atome, d.h. sie setzen Elektronen frei.
☐ Sie erzeugen Photonen.
☐ Sie wechselwirken mit den Atomkernen und erzeugen Teilchenschauer aus Hadronen.
☐ Sie erzeugen Teilchenschauer aus Elektronen, Positronen und Photonen.

3. Die freigesetzten Elektronen erzeugen elektrische Signale.

4. Welche physikalische(n) Größe(n) bestimmt man mit diesem Teil des Detektors?

- | | |
|--|--|
| ☐ Energie des ursprünglichen Teilchens | ☒ Impuls des Teilchens |
| ☒ elektrische Ladung des Teilchens | ☒ Spur des Teilchens |

5. Woraus besteht dieser Teil von ATLAS?

- | | | |
|--|--|---|
| ☒ Silizium | ☐ flüssiges Argon | ☐ Gas in Driftröhren |
| ☐ Blei | ☐ Stahl | ☐ Szintillatoren |

6. Beschreibe kurz in eigenen Worten, was in der Detektor-Komponente geschieht:

Elektrisch geladene Teilchen ionisieren die Atome im Siliziumkristall. Die freigesetzten Elektronen wandern zu Lötkegeln unter dem Kristall. Die stromdurchflossenen Kugeln zeigen an, wo das ursprüngliche Teilchen entlangflog.

* Im Video werden zwei Detektorteile vorgestellt – der Pixel- und der Streifendetektor. Beide werden als Halbleiter-Spurdetektor(en) bezeichnet, da beide die Spur von Teilchen mithilfe von Siliziumkristallen messen. Nur die Anordnung des Siliziums ist unterschiedlich. Daher beschreibt der Film nur eine der beiden Detektorkomponenten im Detail.



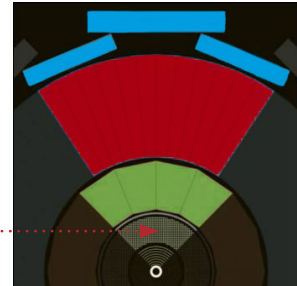
LÖSUNG FÜR ARBEITSBLATT 1/GRUPPE 1B: ÜBERGANGSSTRAHLUNGSDETEKTOR



- Welcher Teil des ATLAS-Detektors wird in deinem Video-Ausschnitt vorgestellt?

Der Übergangsstrahlungsdetektor

- Zeichne in der Grafik rechts ein, wo sich diese Detektorkomponente befindet:



1. Welche Teilchensorte(n) weist man mit diesem Teil des Detektors nach?

- | | | |
|---|--|------------------------------------|
| ☒ Elektronen | ☐ Myonen * | ☐ Neutrinos |
| ☐ Protonen * | ☐ Photonen | ☐ Neutronen |
| ☐ alle elektrisch geladenen Teilchen * | ☐ alle Hadronen | |
| ☐ alle elektrisch neutralen Teilchen | ☐ alle Leptonen | |

2. Was geschieht, wenn diese Teilchensorten mit dem Detektor-Material wechselwirken?

- ☐ Sie ionisieren Atome, d.h. sie setzen Elektronen frei.
☒ Sie erzeugen Photonen.
☐ Sie wechselwirken mit den Atomkernen und erzeugen Teilchenschauer aus Hadronen.
☐ Sie erzeugen Teilchenschauer aus Elektronen, Positronen und Photonen.

3. Wie erzeugen die Sekundärteilchen elektrische Signale?

- ☒ Ionisation
☐ Szintillation

4. Welche physikalische(n) Größe(n) bestimmt man mit diesem Teil des Detektors?

- | | |
|--|--|
| ☐ Energie des ursprünglichen Teilchens | ☒ Impuls des Teilchens |
| ☒ elektrische Ladung des Teilchens | ☒ Spur des Teilchens |

5. Woraus besteht dieser Teil von ATLAS?

- | | | |
|-----------------------------------|--|--|
| ☐ Silizium | ☐ flüssiges Argon | ☒ Gas in Driftröhren |
| ☐ Blei | ☐ Stahl | ☐ Szintillatoren |

6. Beschreibe kurz in eigenen Worten, was in der Detektor-Komponente geschieht:

Elektrisch geladene Teilchen erzeugen im Material zwischen den Driftröhren Photonen. Je nach Teilchensorte entstehen mehr oder weniger Photonen. Das ursprüngliche Teilchen und die Photonen setzen in den Driftröhren Elektronen frei. Deren elektrische Ladung wird gemessen.

* Im Film ist allgemein von elektrisch geladenen Teilchen die Rede. Eigentlich weist der Übergangsstrahlungsdetektor hauptsächlich Elektronen und Positronen nach. Es ist eine seiner Hauptaufgaben, zwischen diesen und anderen elektrisch geladenen Teilchen zu unterscheiden: Nur Elektronen und Positronen sind schnell und leicht genug, um viele Photonen zu erzeugen und ein starkes elektrisches Signal auszulösen. Andere elektrisch geladene Teilchen sind massereicher und meist zu langsam, um ein messbares Signal zu erzeugen. Im Film werden noch Pionen erwähnt: Das sind leichte Hadronen, die aus einem Quark und einem Anti-Quark bestehen — nach Elektronen sind Pionen die nächstschwereren elektrisch geladenen Teilchen. Wenn sie einen extrem hohen Impuls (ab etwa 100 GeV/c) besitzen, können Pionen einige wenige Photonen erzeugen; das entstehende elektrische Signal ist schwächer als das von Elektronen.



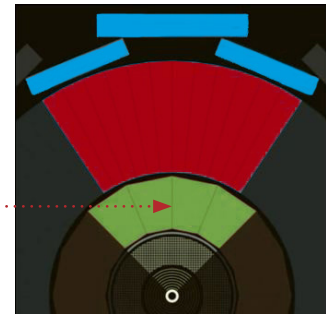
LÖSUNG FÜR ARBEITSBLATT 1/GRUPPE 2A: ELEKTROMAGNETISCHES KALORIMETER



- Welcher Teil des ATLAS-Detektors wird in deinem Video-Ausschnitt vorgestellt?

Das elektromagnetische Kalorimeter

- Zeichne in der Grafik rechts ein, wo sich diese Detektorkomponente befindet:



1. Welche Teilchensorte(n) weist man mit diesem Teil des Detektors nach?

- | | | |
|--|--|------------------------------------|
| ☒ Elektronen | ☐ Myonen* | ☐ Neutrinos |
| ☐ Protonen* | ☒ Photonen | ☐ Neutronen |
| ☐ alle elektrisch geladenen Teilchen* | ☐ alle Hadronen | |
| ☐ alle elektrisch neutralen Teilchen | ☐ alle Leptonen | |

2. Was geschieht, wenn diese Teilchen mit dem Detektor-Material wechselwirken?

- ☐ Sie ionisieren Atome, d.h. sie setzen Elektronen frei.
☐ Sie erzeugen Photonen.
☐ Sie wechselwirken mit den Atomkernen und erzeugen Teilchenschauer aus Hadronen.
☒ Sie erzeugen Teilchenschauer aus Elektronen, Positronen und Photonen.

3. Wie erzeugen die Sekundärteilchen elektrische Signale?

- ☒ Ionisation
☐ Szintillation

4. Welche physikalische(n) Größe(n) bestimmt man mit diesem Teil des Detektors?

- | | |
|--|---|
| ☒ Energie des ursprünglichen Teilchens | ☐ Impuls des Teilchens |
| ☐ elektrische Ladung des Teilchens | ☐ Spur des Teilchens |

5. Woraus besteht dieser Teil von ATLAS?

- | | | |
|--|---|---|
| ☐ Silizium | ☒ flüssiges Argon | ☐ Gas in Driftröhren |
| ☒ Blei | ☒ Stahl | ☐ Szintillatoren |

6. Beschreibe kurz in eigenen Worten, was in der Detektor-Komponente geschieht:

Photonen und elektrisch geladene Teilchen erzeugen in Blei- und Stahlschichten Schauer aus Elektronen, Positronen und Photonen. Diese Teilchen ionisieren flüssiges Argon. Die freigesetzten Elektronen wandern zu Elektroden. Aus der insgesamt gemessenen elektrischen Ladung kann man schließen, wieviel Energie das ursprüngliche Teilchen besaß.

* Im Film werden nur die angekreuzten Teilchen erwähnt; für diese stimmt auch die Antwort auf Frage 2.

Genau genommen wechselwirken alle elektrisch geladenen Teilchen im elektromagnetischen Kalorimeter. Hadronen und Myonen durchqueren es jedoch, ohne darin sämtliche Energie abzugeben: Hadronen lösen Teilchenschauer aus Hadronen aus, Myonen ionisieren das Material. Diese Teilchensorten hinterlassen auch in weiter außen liegenden Detektorteilen Signale.



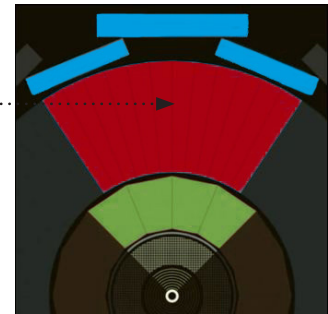
LÖSUNG FÜR ARBEITSBLATT 1/GRUPPE 2B: HADRONISCHES KALORIMETER



- Welcher Teil des ATLAS-Detektors wird in deinem Video-Ausschnitt vorgestellt?

Das hadronische Kalorimeter

- Zeichne in der Grafik rechts ein, wo sich diese Detektorkomponente befindet:



1. Welche Teilchensorte(n) weist man mit diesem Teil des Detektors nach?

- | | | |
|---|---|---|
| ☐ Elektronen | ☐ *Myonen | ☐ Neutrinos |
| ☒ Protonen | ☐ Photonen | ☒ Neutronen |
| ☐ alle elektrisch geladenen Teilchen | ☒ alle Hadronen | |
| ☐ alle elektrisch neutralen Teilchen | ☐ alle Leptonen | |

2. Was geschieht, wenn diese Teilchen mit dem Detektor-Material wechselwirken?

- ☐ Sie ionisieren Atome, d.h. sie setzen Elektronen frei.
- ☐ Sie erzeugen Photonen.
- ☒ Sie wechselwirken mit den Atomkernen und erzeugen Teilchenschauer aus Hadronen.
- ☐ Sie erzeugen Teilchenschauer aus Elektronen, Positronen und Photonen.

3. Wie erzeugen die Sekundärteilchen elektrische Signale?

- ☐ Ionisation
- ☒ Szintillation

4. Welche physikalische(n) Größe(n) bestimmt man mit diesem Teil des Detektors?

- | | |
|--|---|
| ☒ Energie des ursprünglichen Teilchens | ☐ Impuls des Teilchens |
| ☐ elektrische Ladung des Teilchens | ☐ Spur des Teilchens |

5. Woraus besteht dieser Teil von ATLAS?

- | | | |
|-----------------------------------|---|--|
| ☐ Silizium | ☐ flüssiges Argon | ☐ Gas in Driftröhren |
| ☐ Blei | ☒ Stahl | ☒ Szintillatoren |

6. Beschreibe kurz in eigenen Worten, was in der Detektor-Komponente geschieht:

Hadronen erzeugen in Stahlschichten Teilchenschauer. In Szintillatoren erzeugen diese Teilchen Photonen.

Deren Intensität wird gemessen und in ein elektrisches Signal umgewandelt. Aus der Intensität wird die

Energie des ursprünglichen Teilchens berechnet.

* Im Film werden nur die angekreuzten Teilchen erwähnt; für diese stimmt auch die Antwort auf Frage 2.

Auch Myonen geben einen Teil ihrer Energie im hadronischen Kalorimeter ab. Sie durchqueren es jedoch, wobei sie das Material ionisieren, und erreichen den außen liegenden Myonendetektor.



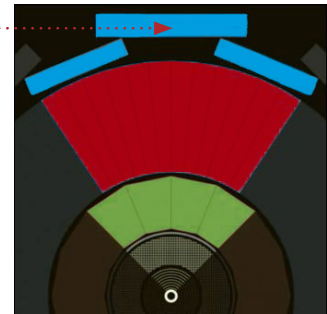
LÖSUNG FÜR ARBEITSBLATT 1/GRUPPE 3: MYONENKAMMERN



- Welcher Teil des ATLAS-Detektors wird in deinem Video-Ausschnitt vorgestellt?

Die Myonenkammern (Myonendetektor, Myonen-Spektrometer)

- Zeichne in der Grafik rechts ein, wo sich diese Detektorkomponente befindet:



1. Welche Teilchensorte(n) weist man mit diesem Teil des Detektors nach?

- | | | |
|---|--|------------------------------------|
| ☐ Elektronen | ☒ Myonen | ☐ Neutrinos |
| ☐ Protonen | ☐ Photonen | ☐ Neutronen |
| ☐ alle elektrisch geladenen Teilchen | ☐ alle Hadronen | |
| ☐ alle elektrisch neutralen Teilchen | ☐ alle Leptonen | |

2. Was geschieht, wenn diese Teilchen mit dem Detektor-Material wechselwirken?

- ☒ Sie ionisieren Atome, d.h. sie setzen Elektronen frei.
☐ Sie erzeugen Photonen.
☐ Sie wechselwirken mit den Atomkernen und erzeugen Teilchenschauer aus Hadronen.
☐ Sie erzeugen Teilchenschauer aus Elektronen, Positronen und Photonen.

3. Die freigesetzten Elektronen erzeugen elektrische Signale.

4. Welche physikalische(n) Größe(n) bestimmt man mit diesem Teil des Detektors?

- | | |
|--|--|
| ☐ Energie des ursprünglichen Teilchens | ☒ Impuls des Teilchens |
| ☒ elektrische Ladung des Teilchens | ☒ Spur des Teilchens |

5. Woraus besteht dieser Teil von ATLAS?

- | | | |
|-----------------------------------|--|--|
| ☐ Silizium | ☐ flüssiges Argon | ☒ Gas in Driftröhren |
| ☐ Blei | ☐ Stahl | ☐ Szintillatoren |

6. Beschreibe kurz in eigenen Worten, was in der Detektor-Komponente geschieht:

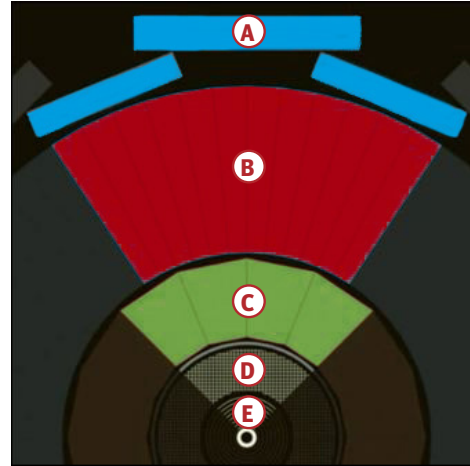
Myonen ionisieren das Gas in Driftröhren. Die getrennten Elektronen und Ionen driften zur Mitte bzw. zum Rand der Röhren. Aus der Driftzeit bestimmt man den Ort, an dem das Myon die Röhre durchflog. Aus den Signalen vieler Röhren kann seine Spur rekonstruiert werden.



LÖSUNG FÜR ARBEITSBLATT 2



- A** Myonenkammern (auch: Myonen-Detektoren, -Spektrometer)
- B** Hadronisches Kalorimeter
- C** Elektromagnetisches Kalorimeter
- D** Übergangsstrahlungsdetektor
- E** Halbleiter-Spurdetektoren (Pixel- und Streifendetektor)*

➤ **Wieso besteht ATLAS aus mehreren Detektorkomponenten?**

- Jede Detektorkomponente kann nur einen Teil der Eigenschaften (Energie, Impuls) von bestimmten Teilchen messen. Um alle Teilchen vollständig nachzuweisen, benötigt man demnach verschiedene Detektorkomponenten.
- Außerdem erzeugen verschiedene Teilchen (z.B. Myon und Elektron) in einer Detektorkomponente (z.B. Pixel-detektor) ähnliche Signale, sind also nicht eindeutig unterscheidbar. Erst durch die Kombination dieser Messung mit den Ergebnissen anderer Detektorkomponenten können die Teilchen eindeutig identifiziert werden.

➤ **Einige Detektorkomponenten liegen in einem Magnetfeld. Warum?**

- Im Magnetfeld werden sich bewegende elektrisch geladene Teilchen abgelenkt. Anhand der Krümmung der Spur lassen sich der Impuls und die elektrische Ladung des Teilchen bestimmen.

➤ **Die Spulen der Elektromagneten sind supraleitend. Warum ist das notwendig?**

- Um die sehr schnellen Teilchen auf eine gekrümmte Bahn zu lenken, sind starke Magnetfelder in einem großen Volumen nötig. Um diese zu erzeugen, werden sehr hohe Stromstärken benötigt. In normalen Magnetspulen würden die hohen Stromstärken wegen des elektrischen Widerstands zu großem Leistungsverlust und starker Erhitzung führen. Um das zu vermeiden, verwendet man supraleitende Spulen. Diese verlieren unterhalb einer bestimmten Temperatur jeden elektrischen Widerstand.

* Im Video werden zwei Detektorteile vorgestellt – der Pixel- und der Streifendetektor. Beide werden als Halbleiter-Spurdetektor(en) bezeichnet, da beide die Spuren von Teilchen mithilfe von Siliziumkristallen messen. Nur die Anordnung des Siliziums ist unterschiedlich. Daher beschreibt der Film nur eine der beiden Detektorkomponenten im Detail.



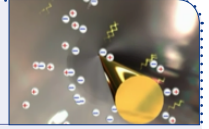
LÖSUNG FÜR ARBEITSBLATT 3

**1a. Halbleiter-Spurdetektoren****Nachgewiesene Teilchen:**

alle elektrisch geladenen Teilchen

Physikalische Größe(n): Spur, elektrische Ladung, Impuls

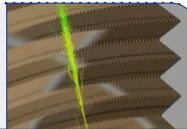
Beschreibung des Prozesses: Elektrisch geladene Teilchen ionisieren die Atome im Siliziumkristall. Die freigesetzten Elektronen bewegen sich zu Lötkugeln unter dem Kristall. Die stromdurchflossenen Kugeln zeigen an, wo das ursprüngliche Teilchen entlang flog.

1b. Übergangsstrahlungsdetektor**Nachgewiesene Teilchen:**

hauptsächlich Elektronen und Positronen

Physikalische Größe(n): Spur, elektrische Ladung, Impuls

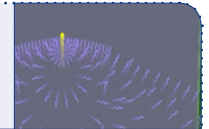
Beschreibung des Prozesses: Sehr schnelle elektrisch geladene Teilchen erzeugen im Detektormaterial Photonen. Das ursprüngliche Teilchen und die Photonen setzen Elektronen frei. Deren elektrische Ladung wird gemessen.

2a. Elektromagnetisches Kalorimeter**Nachgewiesene Teilchen:**

Elektronen, Positronen und Photonen

Physikalische Größe(n): Energie

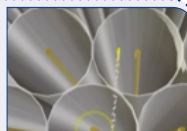
Beschreibung des Prozesses: Elektronen, Positronen und Photonen erzeugen in Blei- und Stahlschichten Teilchenschauer, die wiederum aus all diesen Teilchen bestehen. Die Sekundärteilchen ionisieren flüssiges Argon. Die freigesetzten Elektronen bewegen sich zu Elektroden. Aus der insgesamt gemessenen elektrischen Ladung berechnet man die Energie des ursprünglichen Teilchens.

2b. Hadronisches Kalorimeter**Nachgewiesene Teilchen:**

alle Hadronen

Physikalische Größe(n): Energie

Beschreibung des Prozesses: Hadronen erzeugen in Stahlschichten Teilchenschauer, die wiederum aus Hadronen bestehen. In Szintillator-Schichten erzeugen diese Teilchen Photonen. Deren Intensität wird gemessen. Daraus berechnet man die Energie des ursprünglichen Teilchens.

3. Myonenkammern**Nachgewiesene Teilchen:**

Myonen und Anti-Myonen

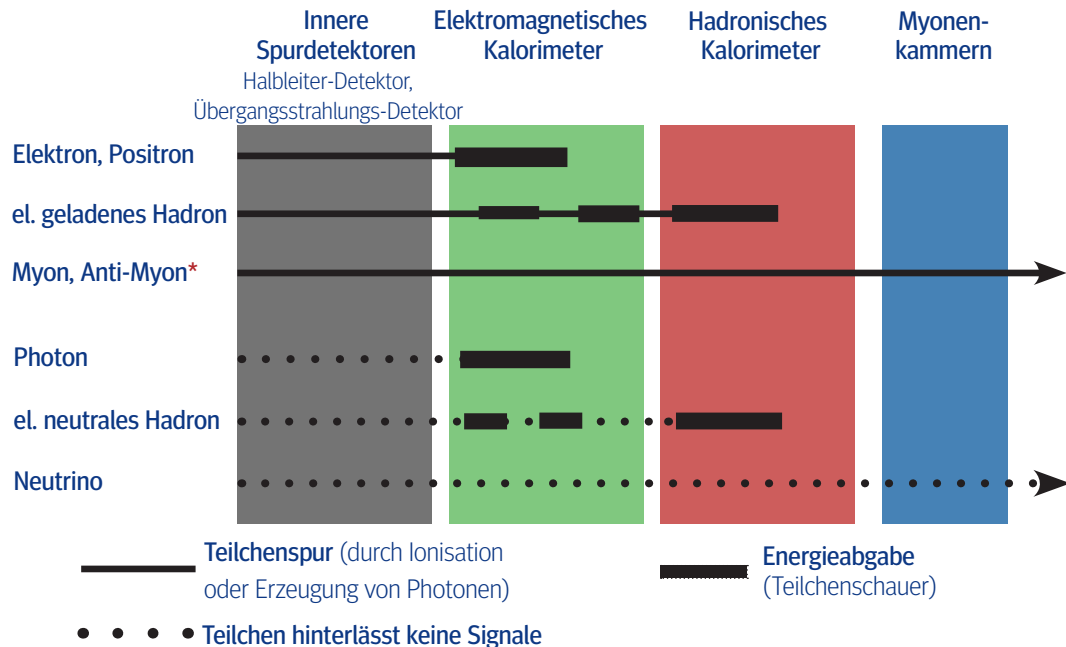
Physikalische Größe(n): Spur, elektrische Ladung, Impuls

Beschreibung des Prozesses: Myonen ionisieren Gas in Driftröhren. Die freigesetzten Elektronen driften zur Mitte der Röhren. Aus der Driftzeit berechnet man, an welchem Ort das Myon die Röhre durchflog. Aus den Signalen vieler Röhren kann seine Spur rekonstruiert werden.

LÖSUNG FÜR ARBEITSBLATT 4



- Zeichne in die Grafik ein, in welchen Detektorschichten die links angegebenen Teilchensorten Signale hinterlassen.



- **Warum kann der ATLAS-Detektor Neutrinos nicht direkt nachweisen?**

Neutrinos besitzen weder eine elektrische noch eine starke Ladung. Sie wechselwirken also so gut wie nie mit dem Detektormaterial: Sie ionisieren es nicht, sie erzeugen keine Photonen (Szintillation) und lösen auch keine Teilchenschauer aus. Neutrinos besitzen nur eine schwache Ladung. Schwache Wechselwirkungen finden aber nur äußerst selten statt. Beispielsweise wechselwirkt nur eines von etwa 1 000 000 000 Neutrinos, die uns aus der Sonne erreichen, mit einem Teilchen der Erde. Um also ab und zu ein Neutrino direkt nachzuweisen, benötigt man ein möglichst großes Detektorvolumen aus einem sehr dichten Material. Beispiele für Neutrinodetektoren sind IceCube und OPERA.

- **Wie weisen Forscher Neutrinos mit dem ATLAS-Detektor indirekt nach?**

Die Teilchen, die bei Kollisionen im LHC entstehen, müssen die Energie- und Impulserhaltung erfüllen. Das heißt, die Impulse der Teilchen (genauer: die Impulskomponenten senkrecht zum Strahlrohr) müssen sich insgesamt zu Null addieren. Ist dies nicht der Fall, ist das ein Hinweis darauf, dass ein oder mehrere Neutrinos entstanden sind.

- **Warum hinterlassen kurzlebige Teilchen wie das Higgs-Teilchen oder W- und Z-Teilchen keine Signale im Detektor?**

Higgs-Teilchen existieren nur etwa 10^{-22} s, W- und Z-Teilchen sogar nur etwa 10^{-25} s. In dieser winzigen Zeitspanne gelangen sie nicht aus dem Strahlrohr hinaus in den Detektor.

- **Wie weisen Forscher diese Teilchen nach?**

Instabile Teilchen wie das Higgs-Teilchen wandeln sich nach ihrer Entstehung spontan in leichtere Teilchen um. Welche Teilchen hierbei entstehen können, lässt sich voraussagen. Beispielsweise muss jede Ladung des ursprünglichen Teilchens der Summe der jeweiligen Ladungen der Teilchen nach der Umwandlung entsprechen. Um kurzlebige Teilchen nachzuweisen, suchen Physiker also nach bestimmten Teilchenkombinationen, die auf eine Umwandlung des gesuchten Teilchens hinweisen.

* Myonen geben in den Kalorimetern einen Teil ihrer Energie ab. Allerdings verursachen sie dabei keine Teilchenschauer, wie die anderen Teilchensorten es tun, sondern ionisieren das Detektormaterial.



DER ATLAS-DETEKTOR

SKRIPT ZUM FILM

Hier finden Sie das vollständige Skript zum Film „**ATLAS Episode II – die Teilchen schlagen zurück**“. Angegeben sind die Namen der geschnittenen Filmsequenzen sowie die Zeitmarker innerhalb des Originalvideos. Ergänzungen in eckigen Klammern präzisieren die Ausführungen.

[ATLAS_Intro]: Einführung (0:00-3:35)

In einem 27 km langen Tunnel tief unter dem CERN-Laboratorium wurde der sieben Stockwerke hohe ATLAS-Detektor gebaut. Er erlaubt den Wissenschaftlern, die Bedingungen im frühen Universum zu erforschen.

Schauen wir uns an, wie ATLAS funktioniert. Bei Teilchenkollisionen im Zentrum des Detektors entstehen verschiedene Typen von Teilchen, die danach den ATLAS-Detektor durchqueren. Der Detektor besteht aus vielen Komponenten. Jede soll einen anderen Teilchentyp nachweisen. Die inneren Komponenten messen die Spuren [elektrisch] geladener Teilchen, die vom Magnetfeld eines dünnen supraleitenden Solenoid-Magneten gekrümmt werden. Weiter außerhalb messen zwei Kalorimeter die Energien der Teilchen. Schließlich misst das Myon-Spektrometer die Spuren von Myonen, die im Feld der supraleitenden Toroid-Magneten abgelenkt werden.

Und so weist ATLAS die verschiedenen Teilchenarten nach: Ein Elektron durchfliegt den inneren Detektor und hinterlässt eine Spur, bevor es im elektromagnetischen Kalorimeter absorbiert wird. Ein Photon verhält sich ähnlich, hinterlässt jedoch keine Spur. Ein Proton erzeugt eine Spur und wechselwirkt hauptsächlich im Hadron-Kalorimeter. Ein Neutron verhält sich ähnlich, hinterlässt jedoch keine Spur. Ein Myon durchquert den gesamten ATLAS-Detektor und hinterlässt eine Spur. Ein Neutrino schließlich durchfliegt den gesamten ATLAS-Detektor, ohne eine Spur zu hinterlassen [bzw. Signale zu erzeugen].

Viele Milliarden Protonen fliegen fast mit Lichtgeschwindigkeit aus entgegengesetzten Richtungen aufeinander zu. Wenn zwei Protonen kollidieren, entstehen aus der Kollisionsenergie Hunderte neue Teilchen. Solche Kollisionen geschehen eine Milliarde mal pro Sekunde.

[ATLAS_1a]: Halbleiter-Spurdetektoren (3:35-6:38)

Der Innendetektor von ATLAS misst die Spuren [elektrisch] geladener Teilchen. Er besteht aus dem Übergangsstrahlungsdetektor, dem Halbleiter-Detektor sowie ganz innen dem Pixeldetektor.

Jetzt zoomen wir in den Halbleiter- und den Pixeldetektor. Beide sind aus mehreren tausend Modulen aufgebaut und weisen die in der Kollision erzeugten Teilchen nach. Der Halbleiterdetektor und der Pixeldetektor funktionieren ganz ähnlich.

Schauen wir uns an, wie der Pixeldetektor arbeitet und betrachten eines der elektronischen Module im Detail. Die dünne obere Siliziumstruktur ist mit der unteren Elektronikstruktur durch ein ausgedehntes Raster aus Lötkugeln verbunden.

Wir wollen jetzt sehen, was im Silizium geschieht, wenn

es von einem [elektrisch] geladenen Teilchen durchquert wird. Dazu zoomen wir bis auf die Größe der Moleküle hinunter. Ein [elektrisch] geladenes Teilchen setzt im Silizium Elektronen frei. Diese Elektronen bewegen sich zur Unterseite des Streifens und erzeugen einen elektrischen Strom, der durch eine oder mehrere Kugeln fließt. Die stromdurchflossene Kugel zeigt den Ort des Teilchendurchgangs an. Das Signal wird in binäre Zahlen umgewandelt, die gespeichert und von den Wissenschaftlern analysiert werden.

Mit seinem Innendetektor misst ATLAS die Spuren [elektrisch] geladener Teilchen, die vom Magnetfeld gekrümmt werden. Aus dieser Krümmung berechnet man die Impulse der [elektrisch] geladenen Teilchen.

[ATLAS_1b]: Übergangsstrahlungsdetektor (6:38-7:50)

Der Innendetektor von ATLAS misst die Spuren [elektrisch] geladener Teilchen. Er besteht aus dem Übergangsstrahlungsdetektor, dem Halbleiter-Detektor sowie ganz innen dem Pixeldetektor.

Sehen wir uns jetzt den Übergangsstrahlungsdetektor an, der sich an die Siliziumdetektoren anschließt. Dieser Detektor erlaubt es, verschiedene Arten von Teilchen zu unterscheiden. Er besteht aus einer Vielzahl gasgefüllter Röhren. Sobald ein [elektrisch] geladenes Teilchen das Material zwischen den Röhren durchfliegt, werden Photonen erzeugt.

Betrachten wir den Unterschied zwischen Pionen und Elektronen. Ein Pion ionisiert das Gas in der Röhre und wird von abgestrahlten Photonen begleitet. Diese wechselwirken mit den Gasmolekülen und setzen weitere Elektronen frei, die zu einem Golddraht in der Mitte der Röhre driften, wo sie registriert werden. Ein Elektron strahlt wesentlich mehr Photonen ab als ein Pion. Deshalb wird auf dem Draht mehr negative [elektrische] Ladung gemessen. Diese Messung erlaubt es dem ATLAS-Detektor zwischen verschiedenen Arten von Teilchen zu unterscheiden.

Mit seinem Innendetektor misst ATLAS die Spuren [elektrisch] geladener Teilchen, die vom Magnetfeld gekrümmt werden. Aus dieser Krümmung berechnet man die Impulse der [elektrisch] geladenen Teilchen.



SKRIPT ZUM FILM

[ATLAS_2a]: Elektromagnetisches Kalorimeter (7:50-9:40)

ATLAS verfügt außerdem über Detektoren, die die Energie [elektrisch] neutraler und geladener Teilchen messen. Sie werden Kalorimeter genannt. Das elektromagnetische Kalorimeter misst hauptsächlich die Energie von Elektronen [Positronen] und Photonen. Seine akkordeonartige Struktur besteht aus vielen Lagen von Blei und Edelstahl, die die Teilchen absorbieren. Dazwischen befindet sich flüssiges Argon mit einer Temperatur von -180 Grad. Im flüssigen Argon befindet sich eine Kupferstruktur, die als Elektrode dient und die durchgehenden Teilchen nachweist. Wir verfolgen jetzt ein hochenergetisches Elektron durch das elektromagnetische Kalorimeter. Sobald das Elektron auf die Absorber trifft, wechselwirkt es mit dem Material und erzeugt einen Schauer niederenergetischer Elektronen, Positronen und Photonen. So durchquert ein hochenergetisches Elektron mehrere Absorberlagen und erzeugt einen großen Schauer, der am Ende erlischt. Dieser Schauer niederenergetischer Teilchen gelangt in das flüssige Argon, ionisiert dessen Atome und erzeugt dabei immer mehr [elektrisch] negativ [geladene] Elektronen und [elektrisch] positive Ionen. Die negative Ladung [Elektronen] wandert zu den Kupferelektroden und wird dort nachgewiesen. Die auf den Elektroden deponierte Ladungsmenge erlaubt es, die Energie zu messen, die das ursprüngliche Elektron oder Photon besaßen, als sie das elektromagnetische Kalorimeter erreichten.

[ATLAS_2b]: Hadronisches Kalorimeter (9:40-11:10)

Jetzt sehen wir das große äußere Kalorimeter, das Hadron-Kalorimeter. Es bestimmt die Energien von sogenannten Hadronen, zu denen Neutronen, Protonen und Mesonen gehören. Es besteht abwechselnd aus Stahl und Szintillatorplatten, die in Paketen angeordnet sind. Ein Szintillator ist ein Material, das Photonen aussendet, wenn es von einem [elektrisch] geladenen Teilchen getroffen wird. Wenn ein hochenergetisches Hadron, wie zum Beispiel ein Proton, die Stahlplatten durchquert, wechselwirkt es mit den Atomkernen. Diese Kernreaktionen führen zur Erzeugung vieler neuer Teilchen, die ihrerseits weitere Wechselwirkungen verursachen. So entstehen ausgedehnte Teilchenschauer.

Diese Teilchenschauer erreichen danach den Szintillator und bringen ihn zum Leuchten. Lange Glasfasern transportieren die Photonen dann zu Sensoren, die die Lichtintensität messen und in einen elektrischen Impuls verwandeln. Aus der Intensität schließt man auf die Energie des hochenergetischen Hadrons im Kalorimeter.

[ATLAS_3]: Myonenkammern (11:10-12:20)

Myonen jedoch durchfliegen die Kalorimeter fast ungehindert und gelangen so in den äußersten Teil von ATLAS, den Myonendetektor. Die ATLAS-Myonenkammern haben die Fläche mehrerer Fußballfelder. Ein Segment einer Myonenkammer besteht aus vielen gasgefüllten Röhren. Wenn ein Myon diese Röhren durchfliegt, hinterlässt es eine Spur elektrisch geladener Ionen und Elektronen, die zum Rand bzw. zur Mitte der Röhre driften. Die Kreise zeigen den Ausgangspunkt dieser Drift in den Röhren. Aus der Driftzeit dieser Ladungen bestimmt man den Ort, an dem das Myon die Röhre durchflogen hat.



DER ATLAS-DETEKTOR

HINTERGRUNDINFORMATIONEN

INHALT

1. Was ist der ATLAS-Detektor?	42
2. Wie ist der ATLAS-Detektor aufgebaut?	42
3. Wie werden Teilchen im ATLAS-Detektor nachgewiesen?	42
4. Was ist ein Spurdetektor?	43
5. Wie funktionieren die Halbleiter-Spurdetektoren?	43
6. Wie funktioniert der Übergangsstrahlungsdetektor?	43
7. Was ist ein Kalorimeter?	43
8. Wie funktioniert das elektromagnetische Kalorimeter?	44
9. Wie funktioniert das hadronische Kalorimeter?	44
10. Wie funktionieren die Myonenkammern?	44
11. Wie weist ATLAS verschiedene Teilchensorten nach?	44

1. Was ist der ATLAS-Detektor?

ATLAS steht als Abkürzung für **A Toroidal LHC ApparatuS** und bezeichnet einen der vier Detektoren des Teilchenbeschleunigers LHC am internationalen Forschungszentrum CERN in Genf. Mit einer Länge von 45 m und einem Durchmesser von 22 m ist der 7000 t schwere, zylinderförmige ATLAS-Detektor das größte Experiment des LHC. Mit diesem Detektor werden Teilchen nachgewiesen, die bei der Kollision von Protonen oder Blei-Ionen entstehen.

2. Wie ist der ATLAS-Detektor aufgebaut?

Wie die meisten Detektoren in Beschleuniger-Experimenten besitzt ATLAS eine zwiebelschalenartige Struktur; der Kollisionspunkt in der Mitte des Detektors ist schalenförmig von mehreren Detektorschichten umgeben.

Die innenliegenden Detektoren messen die Spuren von elektrisch geladenen Teilchen und werden daher allgemein Spurdetektoren genannt. Zu ihnen gehören die **Halbleiter-Spurdetektoren** (Pixel- und Streifendetektor) und der **Übergangsstrahlungsdetektor**.

Die nächsten Schichten sind das **elektromagnetische Kalorimeter** und das **hadronische Kalorimeter**. Diese messen die Energien von Teilchen.

Die äußerste Lage bildet der **Myonendetektor** (auch: Myonenkammern), der die Spuren von Myonen misst.

ATLAS ist von den Spulen supraleitender Magnete durchzogen, welche in den inneren Spurdetektoren und dem Myonendetektor Magnetfelder zwischen 0,5 und 2 Tesla erzeugen.

3. Wie werden Teilchen im ATLAS-Detektor nachgewiesen?

Wenn sich ein energiereiches Teilchen durch das Detektormaterial bewegt, können verschiedene **primäre Prozesse** stattfinden: Das Teilchen kann **Atome ionisieren, Photonen freisetzen oder Teilchenschauer auslösen** (s. Abb. 1).

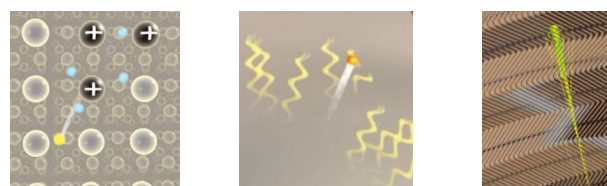
Diese Prozesse sind je nach Teilchensorte und Detektorart verschieden. So lassen sich Teilchensorten voneinander unterscheiden (s. auch Frage 11 und die zugehörige Präsentation, Folie 11-13).

Bei den genannten Prozessen werden **Sekundärteilchen** frei, die anschließend **elektrische Signale** erzeugen. Diese können auf zwei unterschiedliche Arten ausgelöst werden:

Die Sekundärteilchen können Atome **ionisieren**. Die getrennten elektrisch geladenen Teilchen werden weitergeleitet; die Stromstärke oder die elektrische Ladung wird gemessen.

Andererseits können die Sekundärteilchen Photonen erzeugen (**Szintillation**). Diese werden durch Glasfasern geleitet und in Photomultipliern vervielfacht. Ihre Intensität wird gemessen und in elektrische Signale umgewandelt.

Diese Signale werden anschließend mithilfe von Computern ausgewertet. So lassen sich die Eigenschaften der ursprünglichen Teilchen rekonstruieren.



► Abb. 1: Wechselwirkungen im Detektormaterial: Elektrisch geladene Teilchen erzeugen im Halbleiter-Detektor Elektron-Ion-Paare (links). Elektrisch geladene Teilchen erzeugen im Übergangsstrahlungsdetektor Photonen (Mitte). Energiereiche Teilchen erzeugen in den Kalorimetern Schauer aus niederenergetischen Teilchen (rechts).

HINTERGRUNDINFORMATIONEN

4. Was ist ein Spurdetektor?

Mit Spurdetektoren bestimmt man die Spuren von elektrisch geladenen Teilchen. Dazu werden näherungsweise die Punkte bestimmt, an denen das Teilchen den Detektor durchquert. Aus vielen Messwerten kann die Spur rekonstruiert werden. Im ATLAS-Detektor gibt es mehrere Spurdetektoren: Einerseits die inneren Spurdetektoren, die wiederum aus den Halbleiter-Spurdetektoren und dem Übergangsstrahlungsdetektor bestehen, und andererseits die außen liegenden Myonenkammern. Die Spurdetektoren befinden sich in einem starken Magnetfeld, welches die elektrisch geladenen Teilchen durch die Lorentzkraft auf eine gekrümmte Bahn zwingt. Aus der Richtung und Stärke der Spurkrümmung lässt sich der Impuls und die elektrische Ladung des Teilchens bestimmen.

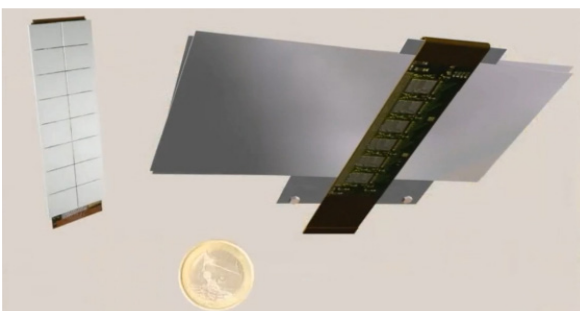
5. Wie funktionieren die Halbleiter-Spurdetektoren?

Die inneren zwei Detektorkomponenten von ATLAS bestehen aus Silizium und messen die Spuren von elektrisch geladenen Teilchen. Daher werden beide auch als Halbleiter-Spurdetektoren bezeichnet.

Beide Detektorschichten bestehen aus vielen kleinen Modulen. Im Pixeldetektor ist das Silizium in Rechtecken, sogenannten Pixeln, angeordnet; im Streifendetektor (im Film als „Halbleiterdetektor“ bezeichnet) sind es Streifen (s. Abb. 2). Der Pixeldetektor misst die Spur von Teilchen bis auf 14 μm genau, der Streifendetektor bis auf 17 μm .

Beide Detektorschichten funktionieren sehr ähnlich: Wenn ein elektrisch geladenes Teilchen das Silizium durchquert, ionisiert es Atome. Die freigesetzten Elektronen werden von metallischen Kontakten angezogen und erzeugen dort einen elektrischen Strom. Das Funktionsprinzip ähnelt dem einer Digitalkamera: In beiden Fällen geben Teilchen Energie an einen Halbleiter ab, was elektrische Signale erzeugt.

Jedes Pixel bzw. jeder Streifen ist über eine Löt-kugel elektrisch mit dem darunter liegenden Chip verbunden, welcher das elektrische Signal in ein digitales Signal (eine Abfolge von Einsen und Nullen) umwandelt. Dieses Signal wird an einen Computer übertragen. Aus den einzelnen Signalen lässt sich die Spur des ursprünglichen Teilchens zusammensetzen.



► Abb. 2: Ein Modul des Pixeldetektors (links) und des Streifendetektors (rechts) mit 1-Euro-Münze zum Größenvergleich

6. Wie funktioniert der Übergangsstrahlungsdetektor?

Die eigentliche Messung findet in Driftröhren statt. Dazwischen befindet sich eine Mischung aus Kohlendioxid und Polypropylen. Wenn ein sehr schnelles elektrisch geladenes Teilchen eine Grenzfläche zwischen diesen Materialien durchquert, sendet es Photonen aus. Diese werden **Übergangsstrahlung** genannt. Sie setzen ihrerseits Elektronen frei (durch Compton-Streuung und den Photoeffekt).

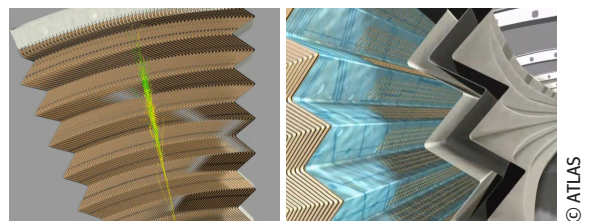
Die ursprünglichen Teilchen und die Elektronen ionisieren das Gas in den Driftröhren (eine Mischung aus Xenon, Kohlendioxid und Sauerstoff). Die freigesetzten Elektronen werden über einen Draht in der Mitte der Röhre abgeleitet und in ein digitales Signal umgewandelt. Die Driftzeit der Elektronen wird gemessen. So kann man den Ort, an dem das ursprüngliche Teilchen durch den Detektor flog, bis auf 170 μm genau bestimmen. Aus den Messwerten lässt sich die Spur des Teilchens zusammensetzen.

Eine weitere wichtige Aufgabe des Übergangsstrahlungsdetektors ist es, zwischen Elektronen bzw. Positronen und anderen elektrisch geladenen Teilchen zu unterscheiden. Nur Elektronen und Positronen sind schnell und leicht genug, um viele Photonen zu erzeugen — diese ionisieren entsprechend viele Gasatome und lösen ein starkes elektrisches Signal aus. Andere elektrisch geladene Teilchen sind massereicher und meist zu langsam, um genügend Photonen für ein messbares Signal zu erzeugen.

7. Was ist ein Kalorimeter?

Mit Kalorimetern bestimmen Forscher die Energie von Teilchen. Im Gegensatz zu Spurdetektoren, welche die hindurchfliegenden Teilchen möglichst nicht beeinflussen sollen, geben Teilchen in Kalorimetern Energie ab bzw. werden vollständig absorbiert.

Ein hochenergetisches Teilchen erzeugt in einem Absorbermaterial einen Schauer aus vielen Teilchen mit niedrigerer Energie. Diese Teilchen lösen durch Ionisation oder Szintillation elektrische Signale in einem aktiven Material aus. Anhand der gemessenen Ladungsmenge bzw. Intensität lässt sich die Energie des ursprünglichen Teilchens berechnen.



► Abb. 3: Ausschnitt aus dem elektromagnetischen Kalorimeter mit Teilchenschauern (links) und geöffneter Schichtstruktur (rechts)

HINTERGRUNDINFORMATIONEN

8. Wie funktioniert das elektromagnetische Kalorimeter?

Elektronen, Positronen und Photonen werden in dieser Detektorschicht absorbiert, d.h. sie geben ihre gesamte Energie ab. Massereichere Teilchen (Hadronen und Myonen) geben nur einen Teil ihrer Energie ab und fliegen weiter.

Im elektromagnetischen Kalorimeter werden Schichten aus Blei und Stahl als Absorber verwendet. Darin erzeugen Elektronen, Positronen und Photonen einen Teilchenschauer, der wiederum aus all diesen Teilchen besteht.

Die Schauerteilchen ionisieren Atome in flüssigem Argon (bei -183°C). Die freigesetzten Elektronen wandern zu Kupferelektroden und werden als elektrisches Signal registriert.

Anhand der gemessenen elektrischen Ladungsmenge lässt sich die Energie des ursprünglichen Teilchens berechnen.

9. Wie funktioniert das hadronische Kalorimeter?

Auch im hadronischen Kalorimeter wird Stahl als Absorber verwendet. Energiereiche Hadronen erzeugen darin Teilchenschauer aus einer Vielzahl niederenergetischer Teilchen.

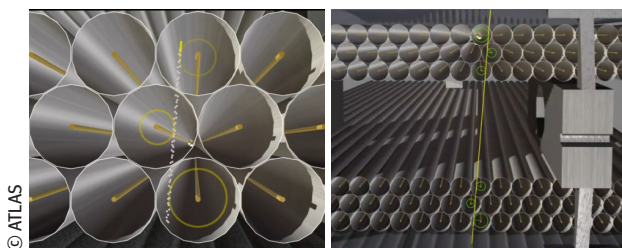
Diese Teilchen fliegen durch Szintillatoren; das sind Materialien, die Photonen aussenden, wenn ein elektrisch geladenes Teilchen hindurch fliegt. Anhand der gemessenen Intensität lässt sich die Energie des ursprünglichen Hadrons berechnen.

10. Wie funktionieren die Myonenkammern?

In dieser Detektorschicht werden die Spuren von Myonen gemessen und daraus ihr Impuls berechnet. Myonen und Anti-Myonen sind die einzigen Teilchen, welche diese äußere Schicht des ATLAS-Detektors erreichen können und dort Spuren hinterlassen, ohne sich zuvor umzuwandeln oder in den Kalorimetern absorbiert zu werden. Neutrinos fliegen zwar auch durch alle Detektorschichten hindurch, hinterlassen jedoch keine Spuren bzw. Signale.

Die äußere Detektorschicht besteht aus vielen Kammern, welche wiederum gasgefüllte Röhren enthalten. Wenn ein Myon hindurchfliegt, ionisiert es das Gas in den Röhren (eine Argon-Kohlendioxid-Mischung). Wie auch im Übergangsstrahlungsdetektor werden die freigesetzten Elektronen an einem Draht in der Mitte der Röhre abgeleitet, wodurch sie ein elektrisches Signal erzeugen. Die Driftzeit wird gemessen, sodass der Ort bestimmt werden kann, an dem das ursprüngliche Teilchen durch den Detektor flog.

Durch die Kombination der Signale vieler Driftröhren kann die Spur des Myons auf bis zu $50\text{ }\mu\text{m}$ genau gemessen werden.



► Abb. 4: Signalentstehung in einer Myonenkammer: Ionisation des Gases in den Driftröhren (links) und Rekonstruktion der Spur des Myons (rechts)

11. Wie unterscheidet ATLAS zwischen Teilchensorten?

Die Komponenten des ATLAS-Detektors weisen jeweils nur bestimmte Teilchen nach. Nur die Kombination der Signale aus allen Detektorschichten ermöglicht es, zwischen Teilchensorten zu unterscheiden (s. Abb. 5).

In den Halbleiter-Spurdetektoren und im Übergangsstrahlungsdetektor hinterlassen alle elektrisch geladenen Teilchen Spuren. Elektrisch neutrale Teilchen durchfliegen die Spurdetektoren, ohne ein Signal zu hinterlassen.

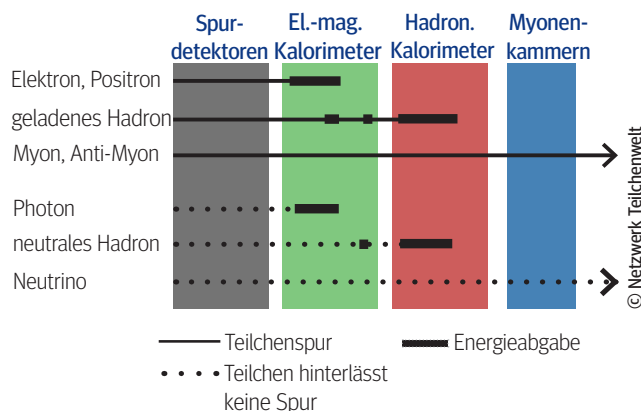
Im elektromagnetischen Kalorimeter erzeugen Elektronen, Positronen und Photonen Teilchenschauer, die wiederum aus allen diesen Teilchen bestehen. Das ursprüngliche Teilchen wird dabei absorbiert. Andere Teilchen geben nur einen Teil ihrer Energie ab und bewegen sich weiter.

Im hadronischen Kalorimeter wechselwirken Hadronen mit den Atomkernen und erzeugen Teilchenschauer, die wiederum aus Hadronen bestehen. Auch hier wird das ursprüngliche Teilchen absorbiert.

Myonen durchqueren als einzige nachweisbare Teilchen alle Detektorschichten, wobei sie das Material ionisieren, und werden im Myonendetektor nachgewiesen.

Kurzlebige Teilchen wie Tauonen, W-Teilchen oder das Higgs-Teilchen existieren nur so kurz, dass sie nicht aus dem Strahlrohr in den Detektor gelangen. In diesem Fall weist ATLAS ihre Umwandlungsprodukte nach.

Neutrinos wechselwirken ausschließlich über die sogenannte schwache Wechselwirkung und durchqueren den gesamten ATLAS-Detektor, ohne ein Signal zu hinterlassen. Jedoch können Neutrinos indirekt nachgewiesen werden: Die Teilchen, die bei Kollisionen im LHC entstehen, müssen die Energie- und Impulserhaltung erfüllen. Die Impulse der Teilchen (eigentlich: die Impulskomponenten senkrecht zum Strahlrohr) müssen sich insgesamt zu Null addieren; ebenso muss die Summe der Teilchenenergien über alle Richtungen addiert Null sein. Wenn die Kalorimeter in einer Richtung weniger Energie messen als in anderen, ist das ein Hinweis darauf, dass ein Neutrino durch den Detektor flog und die fehlende Energie forttrug.



► Abb. 5: Signale unterschiedlicher Teilchen in den Schichten des ATLAS-Detektors