



NETZWERK
TEILCHENWELT



MATERIALSAMMLUNG

KONTEXTMATERIALIEN FÜR LEHRKRÄFTE

Dieses Broschüre enthält gesammelte Materialien von Netzwerk Teilchenwelt für Lehrkräfte, die zur Einführung in die Teilchenphysik verwendet werden können. Sie eignen sich insbesondere zur Vor- und Nachbereitung von Masterclasses, können aber auch unabhängig davon eingesetzt werden. Alle Materialien stehen unter www.teilchenwelt.de zum kostenlosen Download zur Verfügung.

PROJEKTLEITUNG



PARTNER



SCHIRMHERRSCHAFT



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



MATERIALSAMMLUNG FÜR LEHRKRÄFTE

KONTEXTMATERIALIEN NETZWERK TEILCHENWELT



INHALT

- | | |
|---|---------|
| 1. Teilchensteckbriefe: Methodische Anregungen und Hinweise | 3 - 8 |
| 2. Teilchenphysik: Forschung und Anwendung | 9 - 24 |
| 3. Der ATLAS-Detektor | 25 - 44 |



Umfangreiche Unterrichtsmaterialien von Netzwerk Teilchenwelt finden Sie auf der Website: <https://www.teilchenwelt.de/tp>



TEILCHENSTECKBRIEFE

METHODISCHE ANREGUNGEN UND HINWEISE

Die Teilchensteckbriefe können verwendet werden, um die Materie-, Anti-Materie und Boteilchen des Standardmodells der Teilchenphysik einzuführen und zu systematisieren. In diesem Dokument finden Sie Anregungen zur Verwendung der Teilchensteckbriefe.

IMPRESSUM Herausgeber: Michael Kobel, Thomas Trefzger **Autoren:** Michael Kobel (verantwortlich), Manuela Kuhar, Philipp Lindenau **Redaktion:** Uta Bilow, Flora Brinckmann, Michael Kobel, Felix Lehmann, Philipp Lindenau, Franziska Viebach **Layout und Grafiken:** büro quer, www.buero-quer.de, Netzwerk Teilchenwelt, TU Dresden **Projektleitung:** Michael Kobel, Uta Bilow | Netzwerk Teilchenwelt | TU Dresden, Institut für Kern- und Teilchenphysik | www.teilchenwelt.de, mail@teilchenwelt.de, Thomas Trefzger | Julius-Maximilians-Universität Würzburg | Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik **Redaktionsschluss:** Oktober 2016 **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 <https://www.teilchenwelt.de/service/impresum>.

PROJEKLEITUNG

PARTNER

SCHIRMHERRSCHAFT

GEFÖRDERT VOM








Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



KURZBESCHREIBUNG

Die Teilchensteckbriefe können im Unterricht oder in Teilchenphysik-Masterclasses verwendet werden, um die Materie-, Anti-Materie- und Botenteilchen des Standardmodells der Teilchenphysik einzuführen oder ihre Eigenschaften zu wiederholen. In diesem Dokument finden Sie didaktische und methodische Hinweise zur Verwendung der Teilchensteckbriefe.

Die Teilchensteckbriefe sollten in Farbe auf kräftigem Papier ausgedruckt, ausgeschnitten und ggf. laminiert werden. Ein Satz Teilchensteckbriefe besteht aus 61 Karten: je 24 Materie- und Anti-Materieteilchen, 12 Botenteilchen sowie dem Higgs-Teilchen. Jedes Elementarteilchen besitzt sein eigenes Symbol. Teilchen mit ähnlichen Eigenschaften besitzen dieselbe Symbolform (siehe unten). Anhand der Hintergrundfarben lassen sie sich in Gruppen einteilen: Bei Materie- und Anti-Materieteilchen ist der Hintergrund hellblau, bei Botenteilchen hellgrün. Das Higgs-Teilchen, das zu keiner dieser Gruppen gehört, hat einen violetten Hintergrund.

<p>UP-QUARK NACHWEIS: 1969</p>  <p>MATERIETEILCHEN</p> <p>Masse: $\sim 2 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ Elektrische Ladungszahl: $+\frac{2}{3}$ Starker Farbladungsvektor: blau Schwache Ladungszahl: $+\frac{1}{2}$ Mittlere Lebensdauer: unbegrenzt</p>	<p>UP-QUARK NACHWEIS: 1969</p>  <p>MATERIETEILCHEN</p> <p>Masse: $\sim 2 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ Elektrische Ladungszahl: $+\frac{2}{3}$ Starker Farbladungsvektor: rot Schwache Ladungszahl: $+\frac{1}{2}$ Mittlere Lebensdauer: unbegrenzt</p>	<p>UP-QUARK NACHWEIS: 1969</p>  <p>MATERIETEILCHEN</p> <p>Masse: $\sim 2 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ Elektrische Ladungszahl: $+\frac{2}{3}$ Starker Farbladungsvektor: grün Schwache Ladungszahl: $+\frac{1}{2}$ Mittlere Lebensdauer: unbegrenzt</p>	<p>PHOTON NACHWEIS: 1905</p>  <p>BOTENTEILCHEN DER ELEKTRO- MAGNETISCHEN WECHSELWIRKUNG</p> <p>Masse: $0 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ Elektrische Ladungszahl: 0 Starker Farbladungsvektor: farblos Schwache Ladungszahl: 0 Mittlere Lebensdauer: unbegrenzt Mittlere Reichweite: unbegrenzt</p>	<p>ELEKTRON NACHWEIS: 1897</p>  <p>MATERIETEILCHEN</p> <p>Masse: $0,511 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ Elektrische Ladungszahl: -1 Starker Farbladungsvektor: farblos Schwache Ladungszahl: $-\frac{1}{2}$ Mittlere Lebensdauer: unbegrenzt</p>
--	---	--	---	--



Quarks
positiver schwacher Ladung

mit



Quarks
negativer schwacher Ladung

mit



Anti-Quarks
positiver schwacher Ladung

mit



Anti-Quarks
negativer schwacher Ladung

mit



Leptonen
positiv schwacher Ladung

mit



Leptonen
negativer schwacher Ladung

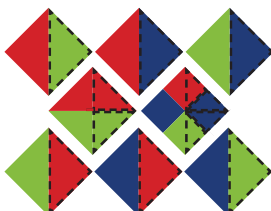
mit



Photon



W- und Z-Teilchen



Gluonen



Higgs-Teilchen



ALLGEMEINE HINWEISE

EINORDNUNG IM UNTERRICHT

- ▶ Die Einführung der Elementarteilchen bietet sich ab der 10. Klasse im Rahmen einer Unterrichtsreihe über Teilchenphysik an.
- ▶ Das Material kann zur Einführung der Elementarteilchen oder zur Wiederholung und Festigung eingesetzt werden.
- ▶ Das Thema kann an eine Unterrichtsreihe über Kernphysik oder Radioaktivität angeknüpft werden.
- ▶ Ergänzend zur Einführung der Elementarteilchen bieten sich Unterrichtsstunden zum Thema Wechselwirkungen oder zum Nachweis von Teilchen mittels Detektoren an.
- ▶ Die anschließende Durchführung eines Teilchenphysik-Projektstages (Masterclass) ermöglicht es den Jugendlichen, ihr Wissen aktiv umzusetzen und einen Einblick in die moderne Teilchenphysik zu erhalten. Mehr Informationen finden Sie unter www.teilchenwelt.de/angebote/masterclasses.

VORKENNTNISSE

Atomaufbau; Elektronen; elektrische Ladung; Aufbau von Protonen und Neutronen aus Quarks; Vorsilben (Kilo, Mega, Giga...), Elektronenvolt als Energieeinheit, und eV/c^2 als Masseeinheit

ZIELE

Im Folgenden werden einige Lernziele angegeben, die mit dem Einsatz der Teilchensteckbriefe verfolgt werden können. Je nach dem, welches Vorwissen bereits vorhanden ist, tritt das Festigen bestimmter Kenntnisse an die Stelle des Kennenlernens der Teilchen und ihrer Eigenschaften. Warum es zweckmäßig ist, insbesondere die Ladungsarten bereits vor der Einführung aller Teilchen des Standardmodells zu thematisieren, wird in den Unterrichtsmaterialien (Band 1) von Netzwerk Teilchenwelt beschrieben.

Die Jugendlichen...

- ▶ ... lernen die grundlegenden Eigenschaften von Elementarteilchen (Masse, Ladungen etc.) kennen.
- ▶ ... beschreiben Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen Elementarteilchen.
- ▶ ... erklären Unterschiede zwischen Quarks und Leptonen.
- ▶ ... beschreiben die Ordnung der Materieteilchen in drei Generationen.
- ▶ ... vergleichen die Eigenschaften von Materie- und Anti-Materieteilchen.
- ▶ ... lernen die drei Ladungsarten (stark, schwach, elektrisch) kennen.
- ▶ ... lernen die Botenteilchen der drei für die Teilchenphysik relevanten Wechselwirkungen kennen.
- ▶ ... legen mit Hilfe der Teilchensteckbriefe einige zusammengesetzte Teilchen, z.B. Proton und Neutron, sowie Teilchenumwandlungen.

ZEITBEDARF

Abhängig von der verwendeten Methode benötigen Sie 10–20 Minuten zur Erklärung und Durchführung. Danach sollte eine Auswertung erfolgen.



Unterrichtsmaterial zur Astro-/Teilchenphysik

www.teilchenwelt.de/tp

weiterführende Links und Literaturtipps

www.teilchenwelt.de/material



METHODISCHE ANREGUNGEN

METHODE 1: TEILCHEN SORTIEREN

- ▶ **Beschreibung:** Jeder Teilnehmende erhält einen Teilchensteckbrief. Für diese Methode kann das Higgs-Teilchen weggelassen werden, da es sich in keine Gruppe einordnen lässt. Der Arbeitsauftrag kann lauten: „**Findet euch mit anderen Elementarteilchen in sinnvolle Gruppen zusammen. Überlegt dann, welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede die Teilchen haben. Gibt es eine Ordnung innerhalb eurer Gruppe?**“
- ▶ **Hinweise:** Alle Teilnehmenden setzt sich mit den Eigenschaften des eigenen Elementarteilchens auseinander und vergleicht diese mit anderen. So finden sich die Jugendlichen weitgehend selbstständig in Gruppen zusammen. Die Lehrkraft sollte nur bei Bedarf eingreifen: „Schau dir die Symbole/den Hintergrund an. Suche nach Elementarteilchen, die ähnliche Eigenschaften haben.“
- ▶ **Auswertung:** Die Jugendlichen erläutern, wie und warum sie bestimmte Gruppen gebildet haben. Dabei sollten Gemeinsamkeiten innerhalb der Gruppe und Unterschiede zu anderen Gruppen angesprochen werden sowie die Ordnung innerhalb der Gruppe. Mögliche Gruppierungen wären zum Beispiel: Quarks, Leptonen, Anti-Materie, Botenteilchen.

Welchen Namen würdet ihr eurer Gruppe geben? Warum habt ihr eine Gruppe gebildet?

- ▶ Wir sind alle Materieteilchen / Anti-Materieteilchen / Quarks / Neutrinos / Botenteilchen.
- ▶ Wir haben die gleiche Hintergrundfarbe / unsere Teilchensymbole haben dieselbe Form.
- ▶ Wir haben die gleiche elektrische, schwache bzw. starke Ladung.

Welche Eigenschaft(en) habt ihr gemeinsam?

- ▶ **elektrische Ladung**
 - ▶ Quarks besitzen eine drittelzählige elektrische Ladungszahl. Elektrisch positiv geladene Quarks wie das Up-Quark besitzen eine elektrische Ladungszahl von $+2/3$, während elektrisch negativ geladene Quarks wie das Down-Quark eine elektrische Ladungszahl von $-1/3$ besitzen.
 - ▶ Leptonen besitzen eine ganzzahlige elektrische Ladungszahl. Neutrinos sind elektrisch neutral, und die elektrisch geladenen Leptonen sind einfach negativ geladen.
 - ▶ Die elektrische Ladung der Anti-Materieteilchen ist jeweils umgekehrt.
 - ▶ Unter den (Anti-)Materieteilchen sind nur die Neutrinos elektrisch neutral.
 - ▶ Die meisten Botenteilchen sind elektrisch neutral (Photon, Gluonen, Z-Teilchen), während die W-Teilchen eine elektrische Ladung besitzen.
- ▶ **Masse**
 - ▶ Photonen und Gluonen besitzen keine Masse, die restlichen Botenteilchen sind sehr massereich (W- und Z-Teilchen).
 - ▶ Neutrinos sind im Vergleich zu anderen Elementarteilchen sehr leicht. Aus experimentellen Daten lassen sich lediglich Grenzen für ihre Masse angeben: Die Masse der Neutrinos ist kleiner als $0,1 \text{ eV}/c^2$.
- ▶ **Starke und schwache Ladung**
 - ▶ Quarks besitzen eine von drei starken Ladungen (auch Farbladungen genannt), d.h. sie unterliegen der starken Wechselwirkung. Die Botenteilchen der starken Wechselwirkung (Gluonen) besitzen acht verschiedene Kombinationen aus Farbladungen.
 - ▶ Materie- und Anti-Materieteilchen besitzen eine halbzahlige schwache Ladungszahl. Botenteilchen besitzen entweder eine ganzzahlige schwache Ladungszahl (W-Teilchen) oder die schwache Ladungszahl 0 (Photonen, Gluonen und Z-Teilchen).



METHODISCHE ANREGUNGEN

Wie unterscheidet ihr euch innerhalb der Gruppe? Wie würdet ihr euch innerhalb der Gruppe sortieren?

- ▶ nach der elektrischen Ladungszahl.
- ▶ nach der Masse: Zu Up-Quark, Down-Quark, Elektron und Elektron-Neutrino) gibt es jeweils zwei schwerere „Kopien“, die lediglich andere Massen besitzen.
- ▶ ggf. nach dem Nachweisdatum. Hier könnte auffallen, dass massereichere Teilchen tendenziell später entdeckt wurden.

Was unterscheidet euch jeweils von anderen Gruppen?

- ▶ Die elektrische Ladungszahl von Quarks ist drittelzahlig, die von Leptonen ganzzahlig oder 0.
- ▶ Quarks besitzen eine starke Ladung (Farbladung), Leptonen nicht.
- ▶ Materie- und Anti-Materieteilchen besitzen jeweils dieselbe Masse, aber die entgegengesetzten Ladungen.

Was unterscheidet Quarks und Leptonen voneinander?

- ▶ Leptonen haben eine ganzzahlige elektrische Ladungszahl, Quarks eine drittelzahlige.
- ▶ Leptonen besitzen keine starke Ladungszahl. Jedes Quark besitzt eine von drei möglichen starken Ladungen (Quarks unterliegen also der starken Wechselwirkung).

Was unterscheidet Neutrinos von anderen Materieteilchen?

- ▶ Sie haben eine um mindestens fünf Größenordnungen geringere Masse als das nächstschwerere Elementarteilchen (das Elektron) und besitzen nur eine schwache Ladung.

Schließlich können die Eigenschaften der Teilchen anhand von passenden Präsentationsfolien oder Tafelbildern zusammengefasst werden.

METHODE 2 : STANDARDMODELL-PUZZLE

- ▶ **Beschreibung:** Die Jugendlichen arbeiten in Gruppen. Jede Gruppe erhält einen Satz Steckbriefe. Der Arbeitsauftrag lautet sinngemäß: „**Ordnet die Elementarteilchen in sinnvollen Gruppen an. Überlegt dann, welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede die Teilchen haben. Gibt es eine Ordnung innerhalb der Gruppen?**“ Der Fokus liegt hierbei mehr auf dem Gesamtüberblick als auf den einzelnen Eigenschaften der Teilchen. Es können konkurrierende Lösungen entstehen und diskutiert werden.
- ▶ **Auswertung:** siehe Methode 1: Teilchen sortieren



METHODISCHE ANREGUNGEN

METHODE 3 : TRITETT-SPIEL

- ▶ **Beschreibung:** Hierbei handelt es sich um eine Abwandlung vom normalen Quartettspiel. Es eignet sich gut dafür, die Teilcheneigenschaften kennenzulernen und zu festigen. Vor dem Spiel sollte ein Überblick über die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den Elementarteilchen gegeben werden, beispielsweise mit Methode 1 oder 2. Sie benötigen für das Spiel einen Kartensatz pro 2-4 Spieler*innen.
- ▶ **Regeln:**
 - ▶ Alle Gluonen werden aussortiert.
 - ▶ Bei 4 Spieler*innen erhält jeder 6 Karten, bei 3 Spieler*innen 7 Karten, bei 2 Spieler*innen 9 Karten.
 - ▶ Ziel ist es, möglichst viele Dreiergruppen (Tritette) abzulegen.
 - ▶ Diese Dreiergruppen bestehen jeweils aus drei Teilchen mit der gleichen Symbolform. Die Gruppen sollten vorher mit den Jugendlichen definiert werden:
 - ▶ Leptonen (Halbkreise)
 - ▶ Quarks mit positiver schwacher Ladungszahl (Dreieck mit Spitze nach oben)
 - ▶ Quarks mit negativer schwacher Ladungszahl (Dreieck mit Spitze nach unten)
 - ▶ Entsprechende Anti-Teilchen-Gruppen
 - ▶ Botenteilchen der schwachen Wechselwirkung (W- und Z-Teilchen)
 - ▶ Das Photon und das Higgs-Teilchen bleiben übrig. Da es keinen physikalischen Grund gibt, sie zu einer Gruppe zusammenzuschließen, sind sie „Schwarze Peter“.
 - ▶ Wer an der Reihe ist, fragt die jeweils rechts sitzende Person nach einer fehlenden Karte.
 - ▶ Es dürfen nur Fragen nach den Teilcheneigenschaften gestellt werden, die im unteren Textfeld angegeben sind
 - ▶ (Masse, Ladungen, Lebensdauer und Reichweite).
 - ▶ Wenn der Gefragte eine passende Karte hat, muss er diese dem Fragenden geben; dieser muss die Karte nehmen, auch wenn er eine andere Karte wollte. Hierin liegt eine reizvolle Schwierigkeit des Spiels.
 - ▶ Wenn der Gefragte keine passende Karte hat, zieht der Fragende eine Karte vom Stapel.
 - ▶ Wenn zu zweit gespielt wird, darf der Gefragte nicht dieselbe Karte zurückgeben, die er gerade bekommen hat.
 - ▶ Wer innerhalb einer bestimmten Zeit die meisten Tritette ablegen kann, hat gewonnen.
- ▶ **Hinweise:** Als Hilfestellung können Sie während des Spiels eine Übersichtsgrafik austeilen oder an die Wand projizieren. Da das Spiel lange dauern kann, sollte vorher eine Zeitbegrenzung (z.B. 15 Minuten) festgelegt werden.

METHODE 4 : ECKEN-SPIEL

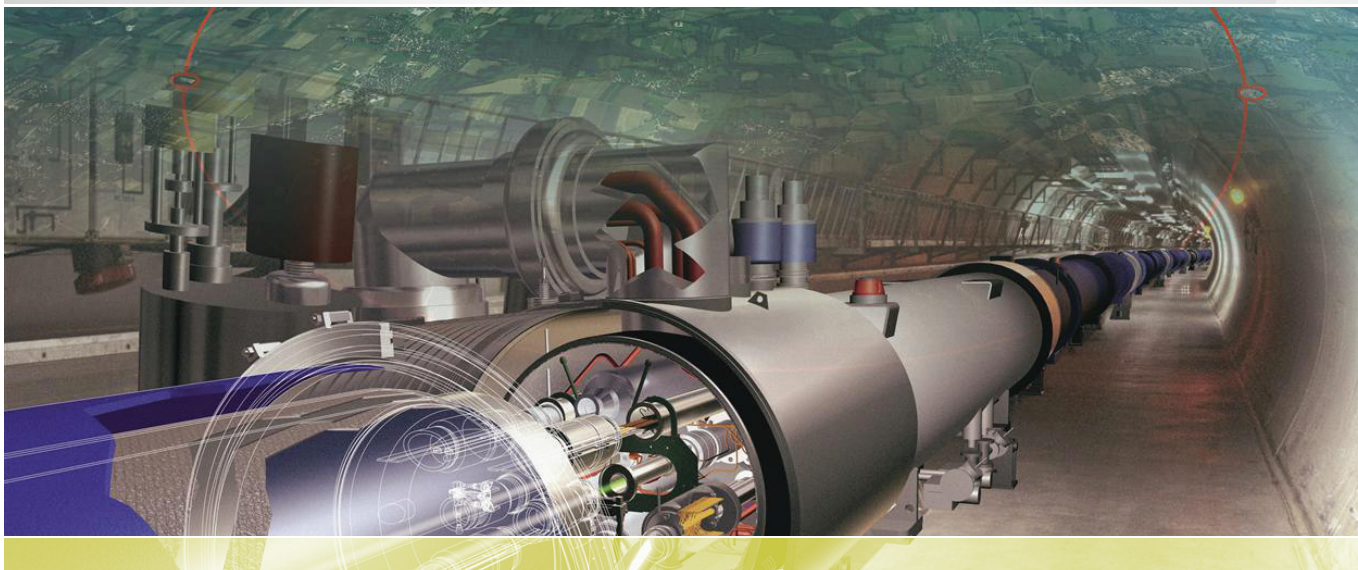
- ▶ **Beschreibung:** Dieses kurze Spiel eignet sich als Einführung zu Beginn einer Unterrichtssequenz zur Teilchenphysik, zur Wiederholung oder auch als Überleitung zu verwandten Themen. Jeder Teilnehmende erhält einen Steckbrief. Die Lehrkraft gibt an, nach welchen Kriterien sich die Jugendlichen auf die Ecken des Raumes verteilen sollen, beispielsweise:
 - ▶ Materie, Anti-Materie, Botenteilchen
 - ▶ Leptonen, Quarks, Botenteilchen
 - ▶ Elektrische Ladungszahl (0, +1/-1, drittelzahlig Ladung)
 - ▶ Starker Farbladungsvektor (Farbe, Anti-Farbe oder farblos)
 - ▶ Schwache Ladungszahl (halbzahlig/ganzzahlig)
 - ▶ Masse ($m = 0$; $0 < m < 20 \text{ MeV}/c^2$; $20 \text{ MeV}/c^2 < m < 1,5 \text{ GeV}/c^2$; $m > 1,5 \text{ GeV}/c^2$)
 - ▶ 1./2./3. Generation (wenn diese vorher besprochen wurden)

Die Teilnehmenden können sich auch in einer Reihe sortieren:

- ▶ nach der Masse der Teilchen
- ▶ nach dem Jahr ihrer Entdeckung
- ▶ **Auswertung:** siehe Methode 1: Teilchen sortieren. Wenn die Jugendlichen sich nach Masse und Entdeckungsjahr der Teilchen sortieren, sollte auffallen, dass massereichere Teilchen tendenziell später entdeckt wurden. Eine Überleitung zur modernen Forschung mit Teilchenbeschleunigern bietet sich an.



NETZWERK
TEILCHENWELT



TEILCHENPHYSIK

FORSCHUNG UND ANWENDUNGEN

Dieses Dokument enthält Informationen und Anregungen rund um aktuelle Forschungsthemen, Methoden und Anwendungen der Teilchenphysik.

IMPRESSUM Herausgeber: Michael Kobel, Thomas Trefzger **Autoren:** Michael Kobel (verantwortlich), Manuela Kuhar, Philipp Lindenau **Redaktion:** Uta Bilow, Caroline Förster **Layout und Grafiken:** büro quer, www.buero-quer.de,
Projektleitung: Michael Kobel, Uta Bilow | Netzwerk Teilchenwelt | TU Dresden, Institut für Kern- und Teilchenphysik | www.teilchenwelt.de, mail@teilchenwelt.de, Thomas Trefzger | 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.

PROJEKLEITUNG



PARTNER



SCHIRMHERRSCHAFT



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

TEILCHENPHYSIK

FORSCHUNG UND ANWENDUNGEN

INHALT

Hinweise und methodische Anregungen	11-12
CERN und LHC	
• Der Teilchenbeschleuniger LHC	13
• Sicherheit am CERN	14
Teilchenphysik und Kosmologie	
• Die Geschichte des Universums	15
• Dunkle Materie	16
• Neutrinos	17
Anti-Materie	18
Das Higgs-Teilchen	19-20
Grundlagenforschung: Sinn und Nutzen	21
Anwendungen der Teilchenphysik	22
Methoden der Teilchenphysik	
• Teil 1: Teilchenkollisionen	23
• Teil 2: Die Suche nach neuen Teilchen	24



FORSCHUNG UND ANWENDUNGEN HINWEISE UND METHODISCHE ANREGUNGEN

Kurzbeschreibung

Dieses Materialpaket bietet einen Überblick über aktuelle Themen und Methoden der teilchenphysikalischen Forschung. Jede der **zwölf Themenseiten** enthält einen **Informationstext**, eine Grafik, weiterführende **Diskussions- und Rechercheanregungen** sowie dazu **passende Internetlinks**. Zum Material gehört außerdem eine Präsentation mit passenden Grafiken und weiterführenden Informationen.



Präsentation: <http://www.teilchenwelt.de/material/materialien-fuer-lehrkraefte/teilchenphysik-forschung-und-anwendungen/>

Die Materialien eignen sich insbesondere zur Vor- und Nachbereitung von Masterclasses, können aber auch unabhängig davon verwendet werden. Beispielsweise können die Themenseiten „CERN und LHC“ und „Kosmologie“ als Einstieg bzw. zur Motivation einer Unterrichtseinheit zur Astroteilchen- oder Teilchenphysik dienen. Die Informationsblätter können auch die Grundlage für Referate sein. Beispiele für geeignete Themen sind:

- Das Urknallmodell
- Beobachtungen, welche das Urknallmodell unterstützen
- Kosmische Hintergrundstrahlung: Entdeckung, Messungen, Folgerungen
- Dunkle Materie: Beobachtungen, die auf ihre Existenz hinweisen
- Dunkle Materie: Kandidaten und Experimente
- Anwendungen der Teilchenphysik
- Anti-Materie: Fakt und Fiktion

Vorkenntnisse

- ▶ Zum Verständnis der meisten Themenseiten sollten grundlegende Begriffe aus der Kern- und Teilchenphysik bekannt sein: Atomkern, Protonen, Neutronen, Quarks, Elektronen, Photonen, elektrische Ladung, Elektronenvolt, Masse¹.
- ▶ Die meisten Themenseiten bauen inhaltlich nicht aufeinander auf. Ausnahmen sind die Themenseiten über Forschungsmethoden: In diesem Fall sollte Teil 1 vor Teil 2 behandelt werden, und sie sind am besten verständlich, wenn die Inhalte von den Infoblättern „Der Teilchenbeschleuniger LHC“ und „Das Higgs-Teilchen“ bekannt sind.

Anregungen zu einzelnen Themen

▶ CERN und LHC:

- Die unten zuerst angegebene Internetseite wurde von einem spanischen Lehrer in Zusammenarbeit mit dem CERN erstellt. Sie bietet eine sehr gut strukturierte Einführung in die Physik und Technik des LHC. Rechenaufgaben mit vorgerechneten Schritten bieten Anregungen für Arbeitsaufträge.
- Es gibt immer wieder Medienberichte, welche die Sicherheit des CERN oder des LHC in Frage stellen. Auf S. 14 finden Sie Hinweise, um die verwendeten Argumente zu diskutieren und zu entkräften.
- Das LHC-Spiel (Link siehe unten) bietet einen anschaulichen Einblick in die Funktionsweise des LHC.

▶ Kosmologie:

- In der Präsentation finden Sie eine Grafik, welche die Entwicklung des Universums vom Urknall bis heute veranschaulicht.
- Das unten angegebene Video zeigt, wie sich das Universum entwickelt hätte, wenn eine bestimmte Elementarteilchensorte eine andere Masse hätte. Es kann beispielsweise zur Motivation des Themas Teilchenphysik dienen und vielerlei Diskussionen anstoßen. Das Video zeigt vier alternative Entwicklungswege des Universums:
 - Tatsächliche Entwicklung (0:00-1:24)
 - Entwicklung mit leichterem W-Teilchen (1:25-2:42): Die Sonne verbrennt, bevor höheres Leben entsteht.
 - Entwicklung mit leichterem Down-Quark (2:43-3:30): Alles besteht aus Neutronensternen.
 - Entwicklung mit leichterem Elektron (3:31-5:00): Exotisches Leben ist möglich.



CERN UND LHC

Gut strukturierte Einführung in die Physik und Technik des LHC: <http://lhc-closer.es> (auf englisch)

LHC-Spiel: <http://www.cernland.net> (> All the games > LHC game)

Video zur Funktionsweise des LHC: <http://www.youtube.com/watch?v=b6CqmHREE1I>

KOSMOLOGIE

Video „Was wäre, wenn...“: <https://www.youtube.com/watch?v=p5cPg62z8xs>

¹ In den vorliegenden Materialien steht der Begriff „Masse“ stets für die Ruhemasse eines Teilchens. Die einzige Ausnahme ist die Formel $E = mc^2$. Hier steht das Kürzel „m“ für die relativistische Masse.



FORSCHUNG UND ANWENDUNGEN

HINWEISE UND METHODISCHE ANREGUNGEN

► Dunkle Materie:

- Unten finden Sie einen Link zu Unterrichtsmaterialien rund um Dunkle Materie. Ein populärwissenschaftlicher Artikel dient als Einführung ins Thema.
- Eine spezielle Software (Link siehe unten) bietet die Möglichkeit, die Rotationsgeschwindigkeiten von Sternen in der Galaxie NGC3198 zu berechnen und daraus die Materieverteilung in der Galaxie abzuschätzen. Anhand dieses Themas können Gravitationskraft, Zentripetalkraft und Dopplerverschiebung von Spektrallinien behandelt werden.

► Neutrinos:

- Der erste unten angegebene Link bietet eine gute Zusammenfassung der Neutrino-Physik und Ideen für Arbeitsaufträge. Unter dem zweiten Link finden Sie Aufgaben und Lösungen zu Sonnenneutrinos (Kernfusion, Wirkungsquerschnitt mit Materie etc.).

► Anti-Materie:

- Auf S. 18 ist eine Nebelkammeraufnahme eines Positrons abgebildet. Anhand der Aufnahme können Jugendliche nachvollziehen, wie Carl Anderson im Jahr 1932 die Existenz von Anti-Materie nachwies. Hinweise dazu finden Sie unter dem ersten unten angegebenen Link.
- Wenn die Jugendlichen den Film „Illuminati“ nach dem Roman „Angels and Demons“ von Dan Brown kennen, können Sie den physikalischen Inhalt des Films analysieren. Links zu einer relevanten Filmsequenz (auf englisch) und Erklärungen dazu finden Sie unten.

► Higgs-Teilchen:

- Spielen Sie mit einer Klasse die Wirkung des Higgs-Feldes und die Entstehung von Higgs-Teilchen nach. Wie das aussehen kann, ist auf S. 19 abgebildet.

► Forschungsmethoden:

- Bei Teilchenphysik-Masterclasses können Jugendliche selbst Daten vom CERN auswerten und die im Infotext beschriebenen Methoden aus der Teilchenphysik anwenden.
- Die im Text auf S. 24 angedeuteten Methoden können in den Kontext einer Unterrichtsreihe über Statistik in der Oberstufe passen (Standardabweichung, Hypothesentest). Ausführlichere Informationen zur Datenauswertung in der Teilchenphysik finden Sie in der Präsentation (s. S.11).



DUNKLE MATERIE

Einführung ins Thema und Unterrichtsmaterial:

<http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/rotationskurve-einer-spiralgalaxie/1051349>

Software zur Untersuchung der Galaxie NGC 3198: http://www.mabo-physik.de/dunkle_materie.html

NEUTRINOS

Informationen und didaktische Hinweise zur Neutrino-Physik:

<http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/astroteilchenphysik-entdeckung-und-entdeckung-der-neutrino-entdeckung/1051362>

Aufgaben und Lösungen zu Sonnenneutrinos, Informationen zum Neutrino-Teleskop IceCube:

<http://www.wissenschaft-schulen.de/alias/material/neutrinos-in-aufgaben/1051534>

ANTI-MATERIE

Die Entdeckung des Positrons: <https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/public/vfHess.pdf> (Kapitel 7.2 und 8.7)

Filmsequenz von „Angels and Demons“ zum Thema Anti-Materie und Erklärungen zur Filmsequenz:

<http://www.weltderphysik.de/thema/physik-im-spielfilm/illuminati/filmszene-im-detail>

HIGGS-TEILCHEN

Artikel und Nachrichten rund um das Higgs-Teilchen: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/bausteine/higgs/>

Animation zur Veranschaulichung des Higgs-Mechanismus: <http://www.youtube.com/watch?v=XGxvRtuTlBY>

METHODEN

International Masterclasses: <http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/index.htm>

Weitere Unterrichtsmaterialien zur Teilchenidentifikation mit Detektoren: <http://www.teilchenwelt.de/material/materialien-fuer-lehrkraefte/weitere-unterrichtsmaterialien/>



DER TEILCHENBESCHLEUNIGER LHC

Das internationale Forschungszentrum CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) ist das weltweit größte Forschungsinstitut auf dem Gebiet der Teilchenphysik. Das Herzstück des CERN ist der Teilchenbeschleuniger LHC (Large Hadron Collider), der sich etwa 100 Meter unter der Erdoberfläche in einem Tunnel mit 27 Kilometern Umfang befindetet. Im LHC kreisen Protonen oder Blei-Ionen mit sehr hohen Energien. Wenn die Teilchen aufeinanderprallen, kann eine Energiedichte erreicht werden, wie sie kurz nach dem Urknall herrschte. Bei den Kollisionen entsteht eine Vielzahl neuer Teilchen, welche mithilfe von Detektoren nachgewiesen werden. So untersuchen Forschende aus aller Welt beispielsweise, wie Elementarteilchen ihre Masse erhalten oder woraus Dunkle Materie besteht.

Wie funktioniert der LHC?

Die Protonen bzw. Blei-Ionen werden zunächst mithilfe einer elektrischen Wechselspannung beschleunigt. Sie durchlaufen mehrere Vorbeschleuniger, bis ihre Energie ausreicht, um sie in den LHC zu leiten. Dieser bringt sie auf ihre Endenergie.

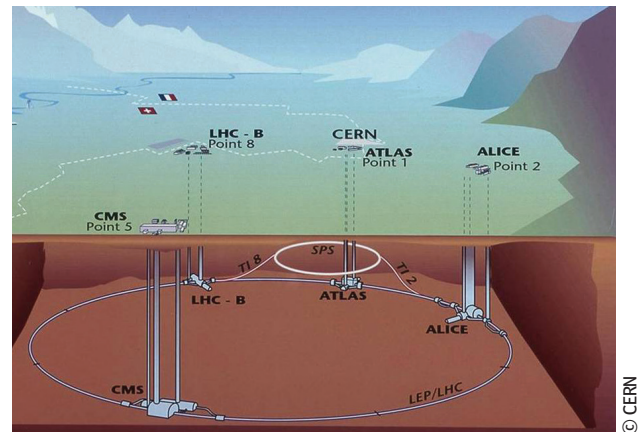
Im LHC kreisen die Protonen schließlich mit einer Energie von jeweils 6,5 Teraelektronenvolt (TeV). Das entspricht etwa der Bewegungsenergie einer fliegenden Mücke. Der LHC konzentriert diese Energie jedoch auf ein winziges Volumen; ein Proton erreicht mit dieser Energie 99,999997% der Lichtgeschwindigkeit.

Um die Protonen auf ihre ringförmige Bahn zu lenken, verwendet man starke Magneten. Die Spulen der Elektromagnete bestehen aus supraleitendem Material (Niob-Titan), durch das der Strom ohne Energieverlust fließt. Dafür werden die Magnete mithilfe von flüssigem Helium auf etwa -271 °C gekühlt – das ist kälter als im Weltall!

Im LHC kreisen die Protonen in zwei getrennten Strahlrohren in gegenläufigen Richtungen. Sie werden in etwa 2800 Pakete (Bunches) mit jeweils rund 100 Milliarden Protonen aufgeteilt. Die Teilchenpakete werden mithilfe von speziellen Magnet-Anordnungen (Quadrupole) auf einen wenige Tausendstel Millimeter dünnen Strahl fokussiert.

Die Teilchenpakete kollidieren an vier Stellen des Beschleuniger-Rings, genau dort, wo sich die Detektoren befinden. Wenn sich zwei Teilchenpakete durchdringen, rechnet man mit jeweils etwa 30 Kollisionen – und das 20 Millionen mal pro Sekunde! Dabei entstehen aus der Energie der Protonen viele neue Teilchen, deren Eigenschaften in Detektoren vermessen werden.

Würde man alle Messdaten aufzeichnen, wären die Datenmengen gigantisch. Daher werden uninteressante Daten nach bestimmten Kriterien aussortiert. Übrig bleiben immer noch rund 15 Millionen Gigabyte pro Jahr! Die Messdaten werden über das sogenannte LHC-Grid auf mehr als 200 000 Computer weltweit verteilt. Mehr als 10 000 Teilchenphysiker*innen aus über 100 Ländern beteiligen sich an der Auswertung der Messungen.



► Das CERN liegt in der Nähe von Genf im Grenzgebiet zwischen der Schweiz und Frankreich. Bei Teilchenkollisionen im Beschleuniger LHC entstehen neue Teilchen, die mit vier Detektoren (ATLAS, ALICE, CMS und LHCb) nachgewiesen werden.

Warum ist der LHC so groß?

Um die energiereichen Protonen im LHC auf ihre Kreisbahn zu lenken, verwendet man die stärksten Beschleunigermagnete, die je gebaut wurden. Wollte man den LHC-Ring kleiner bauen, bräuchte man noch stärkere Magnete!

Es gibt noch einen ganz praktischen Grund für die Größe des LHC: Der Tunnel, in dem der LHC-Beschleuniger gebaut wurde, existierte bereits. Bis zum Ende des Jahres 2000 befand sich darin der LEP-Beschleuniger, in dem Elektronen und Positronen miteinander kollidierten. Somit war es günstig, den alten Tunnel wieder zu verwenden.



- Welche Forschungsziele werden mit dem LHC verfolgt?
- Warum liegt der LHC unterirdisch?
- Wie wird das CERN finanziert? Was hat der LHC gekostet?
- Warum muss im Strahlrohr des LHC ein sehr gutes Vakuum herrschen?



Broschüre mit Informationen rund um den LHC: <https://project-physics-teaching.web.cern.ch/german/broschueren/lhc.pdf>
Fragen und Antworten zum LHC: <http://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/experimente/teilchenbeschleuniger/lhc/lhc-faq>
Kurze Geschichte des LHC: <http://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/experimente/teilchenbeschleuniger/lhc/meilensteine>



SICHERHEIT AM CERN

Sind das CERN und der LHC sicher?

Immer wieder kursieren Behauptungen wie diejenige, dass am CERN durch Teilchenkollisionen kleine Schwarze Löcher oder „seltsame Materie“ entstehen könnten, die eine Gefahr für die Menschheit darstellen würden.

Allerdings geschehen Teilchenkollisionen wie diejenigen am CERN ständig überall im Universum – auch auf der Erde: Kosmische Teilchen erreichen aus dem Weltall die Erde und stoßen mit Atomkernen der Luft zusammen. Einige kosmische Teilchen besitzen eine vielfach höhere Energie als diejenige, die man mit Beschleunigern erreicht. Trotz der natürlichen Teilchenkollisionen existiert die Erde schon seit über vier Milliarden Jahren. Andere Himmelskörper wie Sterne und Galaxien existieren schon sehr viel länger. Wenn Teilchenkollisionen eine Katastrophe auslösen könnten, wäre diese schon längst eingetreten.

Manchmal wird behauptet, am CERN würde Kernenergie erforscht oder es würden gar Kernwaffen entwickelt. Die dort verwendeten Teilchenbeschleuniger und Messgeräte eignen sich dafür allerdings nicht. Das Missverständnis geht auf den Namen des CERN zurück: „Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire“ (d.h. Europäischer Rat für Kernforschung). Als das CERN 1954 gegründet wurde, war eines seiner Forschungsziele, das Innere von Atomkernen zu untersuchen – daher das Wort „Kernforschung“. Heute beschäftigt man sich am CERN hauptsächlich mit Elementarteilchen. Dabei handelt es sich um Grundlagenforschung, die auf reinen Erkenntnisgewinn und nur indirekt auf wirtschaftlichen Nutzen abzielt.

Manchmal ist in den Medien von einer „nie zuvor erreichten Energie“ oder vom „Urknall im Labor“ die Rede. Genauer gesagt wird für kurze Zeit eine sehr hohe Energiedichte erreicht (Energie pro Volumen), wenn die im LHC kreisenden Protonen kollidieren. In einem winzigen Volumen entstehen dabei für kurze Zeit Bedingungen, wie sie kurz nach dem Urknall herrschten – so versuchen Forschende, die damaligen Ereignisse nachzuvollziehen.



© CERN

- Das CERN liegt auf der Grenze zwischen der Schweiz und Frankreich. Der rote Kreis deutet an, wo der Beschleunigertunnel des LHC unterirdisch verläuft.

Das Gefährlichste, was der Protonenstrahl anrichten könnte, wäre, die Experimente und das Beschleunigerrohr zu beschädigen. Auch wenn dies geschehen würde, wären Menschen nicht in Gefahr, da der Tunnel etwa 100 Meter unter der Erdoberfläche liegt und während des Betriebs gesperrt ist.

Um Schäden an den Experimenten vorzubeugen, kontrollieren Computer ständig die Flugbahn der Protonen. Schon bei kleinsten Abweichungen wird der Protonenstrahl automatisch innerhalb einer Tausendstelsekunde in einen Graphitblock geleitet und darin vollständig abgebremst.

Der Beschleunigerring, in dem sich der LHC befindet, wurde aus mehreren Gründen unterirdisch gebaut. Einerseits war es billiger und rechtlich unkomplizierter, den Tunnel unterirdisch zu bauen. Ein anderer Grund ist der Strahlenschutz. Viele Sicherheitsmaßnahmen stellen sicher, dass nur ein winziger Bruchteil der Strahlung, die beim Betrieb des LHC entsteht, an die Oberfläche gelangt. Beispielsweise wird die Luft gefiltert, die aus dem Beschleunigertunnel gepumpt wird. So verursacht das CERN für die Anwohner nur eine zusätzliche Dosis von weniger als 10 Mikrosievert pro Jahr. Zum Vergleich: In der Schweiz beträgt die durchschnittliche Strahlendosis aus natürlichen und medizinischen Quellen etwa 4000 Mikrosievert pro Jahr.



- Wie viel Strom verbraucht das CERN? Wofür wird der größte Teil der elektrischen Energie benötigt?
- Warum muss der LHC mit Helium gekühlt werden?
- Wie lange dauerten die Planung und der Bau des LHC?



Sicherheit am CERN und am LHC: http://www.weltmaschine.de/cern_und_lhc/lhc/sicherheit_am_lhc

Fragen und Antworten zum LHC: <http://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/experimente/teilchenbeschleuniger/lhc/lhc-faq>

Kurze Geschichte des LHC: <http://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/experimente/teilchenbeschleuniger/lhc/meilensteine>

Science Slam: Schwarze Löcher im LHC? www.youtube.com/watch?v=M4frlnOLKdY

TEILCHENPHYSIK UND KOSMOLOGIE

DIE GESCHICHTE DES UNIVERSUMS

Beobachtungen weisen darauf hin, dass sich unser Universum immer weiter ausdehnt und abkühlt. Diese Ausdehnung muss irgendwann einen Anfang gehabt haben; diesen stellt man sich als einen extrem dichten und heißen Zustand vor. Der Moment der Entstehung des Universums wird „Urknall“ genannt. Im Teilchenbeschleuniger LHC lassen sich Bedingungen erzeugen, wie sie kurz nach dem Urknall herrschten.

Wie entwickelte sich das Universum?

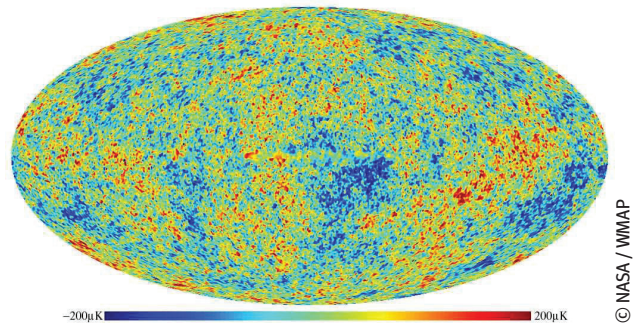
Viele Messungen deuten darauf hin, dass das Universum vor etwa 14 Milliarden Jahren in einem unvorstellbar dichten und heißen Zustand begann: In diesem „Urknall“ entstanden Raum und Zeit. Was in den ersten Momenten danach geschah, lässt sich mithilfe von Modellrechnungen rekonstruieren, denen das Standardmodell der Teilchenphysik zugrundeliegt.

Man geht davon aus, dass zu Anfang des Universums Materie- und Anti-Materieteilchen in gleichen Mengen entstanden. Diese konnten sich noch nicht zu Nukleonen oder Atomen zusammenschließen, da die Temperatur noch zu hoch war. Um bestimmte Beobachtungen zu erklären, nimmt man an, dass sich das junge Universum unmittelbar nach dem Urknall (10^{-35} s) für kurze Zeit rasant ausdehnte (inflationäre Expansion). Kurz danach (10^{-10} s) hatten die elektromagnetische, starke und schwache Wechselwirkung ihre heutige Form angenommen.

Was dann geschah, lässt sich mithilfe von Experimenten und Beobachtungen nachvollziehen. Nach etwa einer Millionstel Sekunde schlossen sich Quarks zu Protonen und Neutronen zusammen. Materie- und Anti-Materieteilchen hatten sich nach einer Sekunde größtenteils gegenseitig vernichtet. Übrig blieben Photonen (elektromagnetische Strahlung) – und der Rest an Materie, aus dem wir heute bestehen. Drei Minuten nach dem Urknall hatte sich das Universum genügend abgekühlt, damit leichte Atomkerne entstehen konnten. Atome konnten sich noch nicht bilden, weil sie von der energiereichen Strahlung sofort ionisiert wurden. Das heiße Plasma im frühen Universum war undurchsichtig, da Licht an den frei umherfliegenden Atomkernen und Elektronen gestreut wurde.

Erst nach etwa 380 000 Jahren war die Temperatur im Universum niedrig genug, damit Atomkerne dauerhaft Elektronen festhalten konnten: Stabile Atome entstanden. Erst dann konnte sich elektromagnetische Strahlung frei ausbreiten, und das Weltall wurde durchsichtig. Die damals freigewordene Strahlung erfüllt heute noch das Universum: Die „**kosmische Hintergrundstrahlung**“ wurde 1964 experimentell nachgewiesen – eines von vielen überzeugenden Argumenten dafür, dass das Urknallmodell stimmt.

Eine Milliarde Jahre nach dem Urknall bildeten sich erste Sterne und Galaxien. Unser Sonnensystem entstand nach etwa 9 Milliarden Jahren.



► Ein Abbild der Frühzeit des Universums: Diese Grafik wurde aus Messdaten der NASA-Raumsonde WMAP erstellt. Die Farben zeigen winzige Temperaturschwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung, die 380 000 Jahre nach dem Urknall frei wurde. Die Temperaturunterschiede entsprechen Dichteschwankungen der Materie im frühen Universum. Daraus entwickelten sich mit der Zeit die Galaxienhaufen und Leerräume, die wir heute beobachten.

Wie erforscht man die Geschichte des Universums?

Astrophysiker*innen vermessen weit entfernte Galaxien und Supernovae, um die Frühphasen des Kosmos zu erforschen. Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung ermöglichen es, in eine Zeit zurückzublicken, als es noch keine Sterne und Galaxien gab.

Mit Methoden der Teilchenphysik lassen sich sogar Materiezustände rekonstruieren, die kurz nach dem Urknall herrschten. Der Teilchenbeschleuniger LHC beschleunigt Protonen und Blei-Ionen. Wenn letztere kollidieren, entsteht in einem winzigen Volumen eine so hohe Energiedichte wie nur wenige Millionstel Sekunden nach dem Urknall. Dabei kann für kurze Zeit ein sogenanntes Quark-Gluon-Plasma entstehen. Darin sind Quarks und Gluonen nicht zu Hadronen gebunden, sondern bewegen sich frei. Diesen Materiezustand untersucht man mithilfe von speziellen Detektoren wie insbesondere ALICE. Forschende gehen auch der Frage nach, warum wir überhaupt existieren: Eigentlich hätten sich Materie- und Anti-Materieteilchen nach dem Urknall restlos gegenseitig vernichten müssen. Doch offensichtlich blieb genug Materie übrig, aus der wir heute bestehen. Also muss es einen grundsätzlichen Unterschied zwischen Materie und Anti-Materie geben. Welcher das ist, versuchen Forschende am CERN und anderen Instituten zu ergründen.



- Welche Eigenschaften hat die kosmische Hintergrundstrahlung? Was verraten Messungen der Hintergrundstrahlung über das frühe Universum?
- Wie hätte sich das Universum entwickelt, wenn ein Elementarteilchen (z.B. Elektron oder Down-Quark) leichter wäre?



Kosmische Hintergrundstrahlung: <http://www.weltderphysik.de/gebiet/astro/kosmologie/die-kosmische-hintergrundstrahlung>
Video – Entwicklung des Universums mit verschiedenen Teilchenmassen: <https://www.youtube.com/watch?v=p5cPg62z8xs>
Die Geschichte des Universums: <http://abenteuer-universum.de/kosmos/urknall1.html>



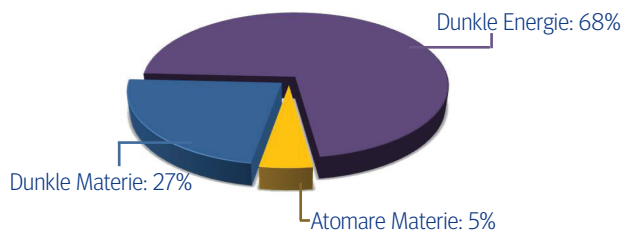
TEILCHENPHYSIK UND KOSMOLOGIE

DUNKLE MATERIE

Die Materie, aus der Sterne, Planeten und Lebewesen bestehen, macht nur einen kleinen Teil des Universums aus. Offenbar besteht ein weitaus größerer Teil des Universums aus Dunkler Materie und Dunkler Energie.

Woraus besteht das Universum?

Es mag unglaublich klingen: Der Stoff, aus dem wir selbst und unsere Umgebung bestehen, ist im Universum offenbar eher die Ausnahme als die Regel. Materie aus Atomen macht weniger als fünf Prozent der Gesamtenergie des Universums aus. Etwa 68 Prozent ist Dunkle Energie, eine unbekannte Energieform, welche die Ausdehnung des Universums vorantreibt. Die restlichen 27 Prozent bestehen aus Dunkler Materie.



Woher weiß man, dass es Dunkle Materie gibt?

Schon im Jahr 1933 beobachtete der Astronom Fritz Zwicky den Coma-Haufen, eine Ansammlung von mehr als 1000 Galaxien. Diese bewegten sich viel zu schnell, als dass die sichtbare Materie sie mit ihrer Gravitation zusammenhalten konnte; dazu war etwa zehnmals mehr Masse notwendig. Daraus schloss er, dass es deutlich mehr Materie im Universum geben muss, als man bis dahin annahm.

Beobachtungen von Spiralgalaxien bestätigen dies: Sterne rotieren zu schnell um deren Zentren. Gäbe es nur die uns bekannte atomare Materie, würden diese Galaxien auseinander fliegen. Planeten, Asteroiden, Staubwolken und andere nicht-leuchtende Himmelskörper sind dabei schon berücksichtigt. Selbst wenn man die Masse solcher Objekte sehr großzügig schätzt, wäre ihr Beitrag immer noch viel zu gering.

Viele unterschiedliche Messungen zeigen, dass es im Universum etwa fünfmal mehr Dunkle Materie als atomare Materie geben muss. Beispielsweise beobachtet man überall im Weltall großräumige netzartige Ansammlungen von Galaxien. Wenn es nur atomare Materie gäbe, wären diese Strukturen viel kleiner, da sie sich erst relativ spät nach dem Urknall gebildet hätten. Um die Strukturen zu erzeugen, die man heute beobachtet, muss die Gravitation von Dunkler Materie ihre Entstehung beschleunigt haben.

Woraus besteht Dunkle Materie?

Messungen der kosmischen Hintergrundstrahlung zeigen, dass Dunkle Materie aus Teilchen bestehen muss, die mit ihrer Umgebung keine Photonen austauschen, also elektrisch neutral sind. Dunkle Materie kann auch nicht der starken Wechselwirkung unterliegen, die zwischen Quarks und Nukleonen wirkt, da sich die Teilchen sonst zu Atomkernen zusammenschließen würden. Sie machen sich also nur durch ihre Gravitation und möglicherweise durch die schwache Wechselwirkung bemerkbar.

Diese Beschreibung trifft auf den ersten Blick auf **Neutrinos** zu. Doch diese Teilchen besitzen eine zu kleine Masse, um die vorher erwähnten Beobachtungen zu erklären, und machen nur 0,1–3 Prozent der Gesamtmasse des Universums aus.

Also suchen Forschende nach bisher unbekanntem Teilchen, die deutlich massereicher als Neutrinos sein sollten und nur schwach wechselwirken. Solche Teilchen bezeichnet man als **WIMPs** (**W**eakly **I**nteracting **M**assive **P**articles). Einige Theorien sagen die Existenz von WIMPs voraus, jedoch haben Forschende sie bisher nicht experimentell beobachtet.

Wie suchen Forschende nach Dunkler Materie?

Teilchenphysiker*innen versuchen mit vielen Methoden, der Dunklen Materie auf die Schliche zu kommen.

- ▶ Sehr empfindliche Detektoren wie CRESST in Italien sollen die seltenen Stöße von WIMPs mit einem Atomkern des Detektormediums nachweisen. Sie befinden sich tief unter der Erde, um andere kosmische Teilchen abzuschirmen.
- ▶ Das Spektrometer AMS an Bord der internationalen Raumstation ISS sucht im Weltall unter anderem nach energiereichen Photonen und Neutrinos. Diese könnten entstehen, wenn WIMPs paarweise zerstrahlen.
- ▶ Im Teilchenbeschleuniger LHC versuchen Forschende, WIMPs künstlich herzustellen: Bei Teilchenkollisionen wird eine so große Energiedichte erzeugt, wie sie kurz nach dem Urknall herrschte. Dabei könnten auch bisher unbekannte Teilchen entstehen.
- ▶ Experimente wie CAST und OSQAR am CERN oder auch ALPS am DESY in Hamburg suchen nach sogenannten **Axionen**. Wenn diese Teilchen existieren, könnten sie einen Teil der Dunklen Materie ausmachen.



- Wie messen Forschende die Geschwindigkeiten von Sternen in Galaxien?
- Untersuche die Geschwindigkeiten von Sternen in der Galaxie NGC3198. Wie muss die Materie in dieser Galaxie verteilt sein, um solche Bewegungen zu ermöglichen?
- Wie soll das Experiment CRESST Teilchen der Dunklen Materie nachweisen?



Übersichtsartikel in „Sterne und Weltraum“: http://www.wissenschaft-online.de/artikel/1038777&_wis=1

Software zur Untersuchung der Galaxie NGC3198: http://www.mabo-physik.de/dunkle_materie.html

CRESST und andere Experimente zu Dunkler Materie: <http://www.weltderphysik.de/gebiet/astro/dunkle-materie-und-dunkle-energie>



TEILCHENPHYSIK UND KOSMOLOGIE

NEUTRINOS

Unzählige Neutrinos erreichen uns ständig aus Sternen, Supernovae und Galaxien. Allerdings treten sie mit dem Rest des Universums sehr selten in Kontakt. Entsprechend schwierig ist es, Neutrinos experimentell nachzuweisen. Doch der Aufwand lohnt sich: Da Neutrinos fast immer ungehindert durch Materie hindurchfliegen, ermöglichen sie spannende Erkenntnisse über die Prozesse im Inneren von Sternen und Galaxien.

Was sind Neutrinos?

Neutrinos sind Elementarteilchen, die eine extrem geringe Masse besitzen – mehr als hunderttausendfach geringer als die des Elektrons. Sie treten nur über die schwache Wechselwirkung mit anderen Teilchen in Kontakt. Diese Wechselwirkung ermöglicht unter anderem Teilchen-Umwandlungen und die Kernfusion, die Energiequelle der Sonne.

Schwache Wechselwirkungen geschehen bei niedrigen Energien äußerst selten. Deswegen können Neutrinos ungestört durch Materie hindurchfliegen, sogar durch ganze Planeten und Sterne. Nur eines von etwa 1 000 000 000 Neutrinos aus der Sonne wechselwirkt überhaupt mit einem Teilchen der Erde. Das macht es enorm schwierig, Neutrinos experimentell nachzuweisen.

Wie kann man Neutrinos nachweisen?

Je größer der Detektor, desto besser – denn umso höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Neutrino mit einem Teilchen im Detektor wechselwirkt, so dass es nachgewiesen werden kann. Einige Neutrino-Detektoren verwenden das Wasser eines Sees oder auch das Eis der Antarktis als Detektormaterial (siehe Abbildung). Darin werden empfindliche Lichtsensoren versenkt. Wenn ein Neutrino mit einem Atomkern kollidiert, wandelt es sich oft in ein energiereiches elektrisch geladenes Teilchen um, zum Beispiel in ein Myon. Dieses bewegt sich schneller als mit der Lichtgeschwindigkeit in Eis. Dadurch entsteht in einer Art „Überlichtknall“ ein bläuliches Leuchten – das sogenannte Cherenkov-Licht. Aus diesen Signalen lässt sich die Energie des ursprünglichen Neutrinos bestimmen sowie die Richtung, aus der es kam.

Die nächstgelegene kosmische Neutrinoquelle ist die Sonne. Diese Teilchen bieten die einzigartige Möglichkeit, die Kernfusionsprozesse in ihrem Inneren zu studieren. Denn die Neutrinos, die dabei entstehen, verlassen die Sonne auf direktem Weg - im Gegensatz zu Photonen, welche erst einige Millionen Jahre nach ihrer Erzeugung aus der Sonne entweichen.

Bei der Untersuchung von Sonnenneutrinos fiel Forschenden auf, dass viel weniger Neutrinos die Erde erreichen als erwartet. Später stellte sich der Grund dafür heraus. Es gibt drei Neutrinosorten: Elektron-, Myon- und Tau-Neutrinos. Bei der Kernfusion in der Sonne entstehen nur Elektron-Neutrinos. Auf dem Weg zur Erde wandeln sich diese zum Teil in die anderen Neutrinosorten um – das wiesen Forschende erst 2002 mit dem Detektor SNO in Kanada nach.

Solche Umwandlungen (Oszillationen) sind nur möglich, wenn Neutrinos eine Masse besitzen. Wie diese zustande kommt und warum sie so klein ist, wird derzeit erforscht.

Da Neutrinos weitgehend unbeeinflusst durch Magnet- und Gravitationsfelder sowie durch Materie fliegen, lässt sich die Richtung ihrer Herkunft genauer bestimmen als diejenige von anderen kosmischen Teilchen wie beispielsweise Protonen. Durch den Nachweis von Neutrinoquellen im fernen Weltall könnten Forschende also auch die Ursprungsorte von anderen kosmischen Teilchen aufspüren. Damit ließe sich auch aufklären, wie diese ihre teils extrem hohen Energien erreichen.

Forschende nutzen Neutrinooteleskope außerdem, um nach der geheimnisvollen Dunklen Materie zu suchen. Wenn Teilchen der Dunklen Materie paarweise zerstrahlen, sollten energiereiche Photonen oder Neutrinos entstehen. Diese sollten die Erde aus Richtungen erreichen, wo sich Dunkle Materie zusammenballt.

Warum sind Neutrinos interessant für die Forschung?

- Aus dem Weltall erreichen uns ständig kosmische Teilchen wie beispielsweise Protonen. Von welchen Himmelskörpern stammen diese wahrscheinlich?
- Welchen Fragen gehen Forschende mit dem neuen Neutrino-detektor SNO+ in Kanada nach?



Kosmische Teilchen, Neutrinooteleskop IceCube:

<https://www.spektrum.de/magazin/icecube-neutrinojagd-am-suedpol/893101>

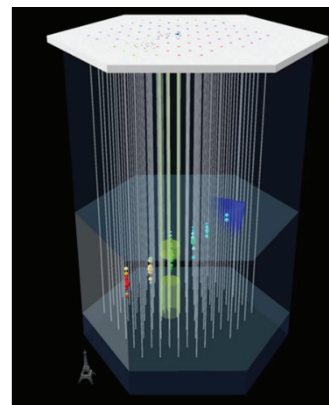
Neutrino-Experimente:

<http://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/bausteine/neutrinos>

<http://www.weltderphysik.de/gebiet/astro/kosmische-strahlung/kosmische-neutrinos>

Der Neutrino-detektor SNO+:

<https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/bausteine/neutrinos/experimente/sno/sno-teil-2/>



© IceCube Neutrino Observatory

- Mit dem IceCube-Experiment in der Antarktis suchen Forschende nach Neutrinoquellen im Weltall. Der Detektor ist mehr als einen Kubikkilometer groß und befindet sich tief unter der antarktischen Eisdecke. Zum Vergleich ist unten links der Eiffelturm eingezeichnet.



ANTI-MATERIE

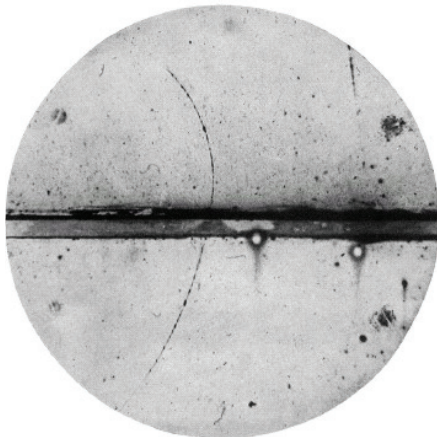
Was ist Anti-Materie?

Anti-Materie kann man sich als „Spiegelbild“ der normalen Materie vorstellen. Zur jedem Materieteilchen gehört ein Anti-Teilchen mit derselben Masse, derselben mittleren Lebensdauer und demselben Spin, das jedoch entgegengesetzte Ladungen besitzt. Beispielsweise ist das Elektron elektrisch negativ geladen, während sein Anti-Teilchen, das sogenannte Positron, eine positive elektrische Ladung besitzt. Ebenso gibt es Anti-Quarks und Anti-Neutrinos.

Gibt es Anti-Materie in der Natur?

Anti-Materieteilchen kommen durchaus in der Natur vor, Anti-Atome oder größere Objekte aus Anti-Materie dagegen nicht. Positronen entstehen beispielsweise, wenn kosmische Strahlung auf die Erdatmosphäre trifft, oder wenn sich bestimmte radioaktive Atomkerne umwandeln. Man spricht von der „Beta-Plus-Umwandlung“: Hierbei verwandelt sich ein Proton in ein Neutron, wobei ein Positron und ein Neutrino neu entstehen.

Wenn ein Anti-Teilchen seinem entsprechenden Materieteilchen begegnet, „annihilieren“ sie – das bedeutet, die vorhandene Energie wandelt sich in Photonen um. Wenn sich beispielsweise Positronen und Elektronen begegnen, annihilieren sie meistens in zwei Photonen. Dies wird beispielsweise bei einer medizinischen Diagnosemethode ausgenutzt, der Positronen-Emissions-Tomographie (PET).



Aus: Physical Review, Vol.43, p. 491

- Die Existenz von Anti-Materie wurde 1928 von Paul Dirac theoretisch vorhergesagt. Schon 1932 entdeckte Carl D. Anderson das Positron – das Anti-Teilchen des Elektrons. Das Bild zeigt die Spur eines Positrons in einer Nebelkammer.

Könnte Anti-Materie zur Energieversorgung oder zum Bau von Waffen verwendet werden?

Nein. Anti-Materie ist für militärische oder wirtschaftliche Zwecke uninteressant, da Anti-Atome nicht natürlich vorkommen. Sie lassen sich auch nicht durch chemische Prozesse herstellen, sondern nur mithilfe von Teilchenbeschleunigern, womit ein vergleichsweise gigantischer Aufwand verbunden ist.

Am CERN werden an den Experimenten ATHENA und ATRAP Anti-Wasserstoffatome hergestellt, die zur reinen Grundlagenforschung dienen (siehe weiter unten). Seit 1996 wurden am CERN nur einige Millionen Anti-Atome hergestellt. Das ist eine verschwindend geringe Menge. Um ein Gramm Anti-Materie zu erhalten, würde man $6 \cdot 10^{23}$ Anti-Atome benötigen (eine 6 mit 23 Nullen)! Um diese herzustellen, würde man mehrere Milliarden Jahre brauchen – wenn man einen Weg fände, sie für längere Zeit stabil zu halten. Zu alledem müsste man milliardenfach mehr Energie aufwenden, als man durch die Annihilation mit Materie gewinnen würde.

Die Nutzung von Anti-Materie zur Energieversorgung oder für Waffen gehört also ins Reich der Fiktion.

Was wird zum Thema Anti-Materie erforscht?

Experimente mit Anti-Materie können etwas über die Entstehung und Entwicklung des Universums verraten. Wenn es sich bei Anti-Materie um ein exaktes Spiegelbild normaler Materie handelt, sollte beim Urknall ebenso viel Anti-Materie wie Materie entstanden sein. Dann dürften wir jedoch gar nicht existieren, weil sich sämtliche Materie und Anti-Materie schon wieder gegenseitig vernichtet hätte. Doch offenbar blieb ein winziger Anteil an Materie übrig – nämlich die, aus der heute unser Universum besteht. Also muss es einen grundsätzlichen Unterschied zwischen Materie und Anti-Materie geben. Welcher das ist, versuchen Forschende am CERN und anderen Instituten zu ergründen.

Dazu stellt man am CERN beispielsweise Anti-Wasserstoffatome her. Derzeit ist es möglich, einige Anti-Atome mehrere Minuten lang mithilfe von Magnetfeldern festzuhalten. So lässt sich beispielsweise ihr Emissions- bzw. Absorptionsspektrum untersuchen, um zu prüfen, ob sie dieselben Energieniveaus besitzen wie normale Atome. Spannend ist auch die Frage, ob Anti-Materie genauso auf Gravitation reagiert wie Materie oder nicht. Für solche Experimente benötigt man hochempfindliche Messinstrumente.

- Was genau ist auf der Abbildung zu sehen? Wie konnte Carl D. Anderson darauf kommen, dass das beobachtete Teilchen ein Positron war?
- Was wird am LHCb-Experiment am CERN erforscht?
- Wie funktioniert die Positronen-Emissions-Tomographie? Was bekommen Patient*innen dabei verabreicht und warum?



Artikel und Nachrichten rund um Anti-Materie: <http://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/antimaterie/>

Die Entdeckung des Positrons: <https://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/public/vfHess.pdf> (Kapitel 7.2)

Das Experiment LHCb: <http://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/experimente/teilchenbeschleuniger/lhc/lhc-experimente/lhcb>

Positronen-Emissions-Tomographie: <https://www.krebsinformationsdienst.de/untersuchung/bildgebung/pet.php>

Anti-Materie im Spielfilm „Illuminati“: <http://www.weltderphysik.de/thema/physik-im-spielfilm/illuminati>



DAS HIGGS-TEILCHEN

WIE ERHALTEN TEILCHEN IHRE MASSE? EINE ANALOGIE

Elementarteilchen dürften eigentlich keine Masse besitzen – das besagt zumindest das Standardmodell der Teilchenphysik. Wie sie trotzdem Masse erhalten, kann das sogenannte Brout-Englert-Higgs-Feld erklären, das das ganze Universum durchzieht. Hindurchfliegende Elementarteilchen wechselwirken mit dem BEH-Feld und erhalten so Masse. Selten können dabei sogenannte Higgs-Teilchen entstehen. Wie man sich das vorstellen kann, veranschaulicht die folgende Analogie.

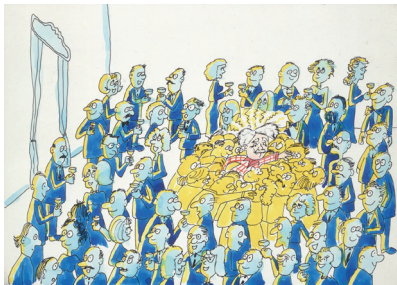


© G. Boxader / CERN

- ▶ 1. Man kann sich das Brout-Englert-Higgs-Feld wie eine große Partygesellschaft vorstellen.



- ▶ 2. Nun kommt ein berühmter Gast auf die Party und möchte den Raum durchqueren. Wären die Partygäste nicht da, so könnte er sich ungehindert bewegen. In dieser Analogie entspricht der berühmte Gast einem Elementarteilchen, das sich durch den Raum bewegt. Wäre das BEH-Feld nicht da, könnte es sich ungehindert mit Lichtgeschwindigkeit bewegen – es hätte keine Masse.



- ▶ 3. Die Partygäste sammeln sich um den berühmten Gast, so dass er nur noch langsam vorwärts kommt. Analog dazu wechselwirken die meisten Sorten von Elementarteilchen mit dem BEH-Feld und bewegen sich deswegen langsamer: Sie erhalten Masse. Wäre der Gast nicht berühmt, so könnte er sich ungestört durch die Menschenmenge bewegen. Analog dazu wechselwirken manche Elementarteilchen (wie das Photon) nicht mit dem BEH-Feld, erhalten also keine Masse und bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit.



- ▶ 4. Das Higgs-Teilchen kann kurzfristig erzeugt werden, wenn man dem BEH-Feld viel Energie zuführt. Das ist so, als ob jemand ein skandalöses Gerücht in den Partyraum ruft...



- ▶ 5. ...Dann stecken einige Gäste die Köpfe zusammen, um das Gerücht zu diskutieren. Analog dazu ist das Higgs-Teilchen eine kurzfristige „Anregung“ oder Schwingung des BEH-Feldes. Das Higgs-Teilchen sollte sich als elektrisch neutrales, massereiches Elementarteilchen nachweisen lassen, das sich schnell in leichtere Teilchen umwandelt. Im Jahr 2012 wurde am CERN ein Elementarteilchen entdeckt, das dieser Beschreibung entspricht.



- ▶ Wie erzeugen Forschende am CERN das Higgs-Teilchen und andere massereiche Elementarteilchen?



Das Wichtigste über das Higgs-Teilchen – Infos, Bilder, Links: <http://www.weltmaschine.de/physik/higgs>
Mehr über das Higgs-Teilchen: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/bausteine/higgs/>
International Masterclasses: http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath_higgs.htm



DAS HIGGS-TEILCHEN

Wie erhalten Teilchen ihre Masse?

Fast 50 Jahren suchten Forschende nach dem Higgs-Teilchen – dem letzten fehlenden Baustein im Standardmodell der Teilchenphysik. Im Juli 2012 wurde am CERN ein bis dahin unbekanntes Elementarteilchen nachgewiesen, bei dem es sich um ein Higgs-Teilchen handelt. Es besitzt - nach jetzigem Kenntnisstand - die vom Standardmodell vorhergesagten Eigenschaften und ist damit ein weiteres überzeugendes Argument für dessen Richtigkeit. Außerdem ist es der Beleg für eine Erklärung, wie Elementarteilchen ihre Masse erhalten.

Das theoretische Gebäude des Standardmodells funktioniert nämlich nur dann, wenn Elementarteilchen beim Urknall masselos entstanden sind. Doch das blieb offensichtlich nicht so. Masselose Teilchen hätten keine festen Strukturen bilden können, weil sie stets mit Lichtgeschwindigkeit fliegen.

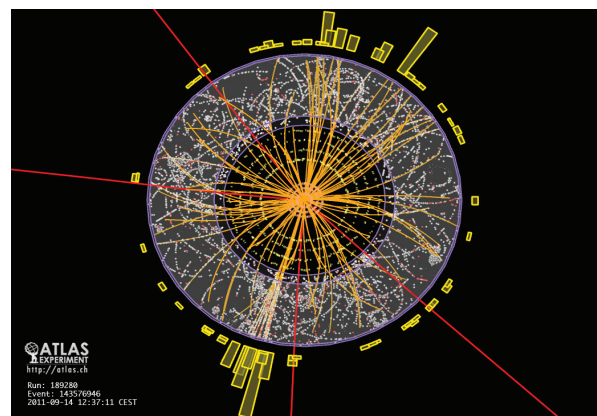
Wie erhalten Teilchen also nachträglich ihre Masse?

Eine mögliche Erklärung haben Peter Higgs und andere Physiker 1964 vorgeschlagen: Ihre Theorie besagt, dass kurz nach dem Urknall durch die Abkühlung im ganzen Universum das sogenannte Brout-Englert-Higgs-Feld kondensierte. Manche Teilchen, wie beispielsweise Photonen, fliegen ungehindert durch das Feld und bewegen sich daher mit Lichtgeschwindigkeit; andere Teilchen wechselwirken mit dem BEH-Feld und bewegen sich langsamer – sie verhalten sich, als hätten sie Masse.¹ Warum verschiedene Teilchensorten allerdings jeweils eine bestimmte Masse besitzen und nicht irgendeine andere, erklärt das Modell nicht.

Wir spüren das BEH-Feld nicht, weil es strukturlos und homogen ist und überall im Universum existiert – so ähnlich, wie man Luft nicht bemerkt, wenn es windstill ist. Erst wenn man in der Luft Druckwellen erzeugt, spürt man diese als Geräusch oder Wind.

Analog dazu sollte das BEH-Feld „schwingen“, wenn energiereiche Teilchen hindurchfliegen. Diese Schwingungen heißen Higgs-Teilchen; sie sollten sich als kurzlebige Elementarteilchen erzeugen und nachweisen lassen. Der Teilchenbeschleuniger LHC wurde insbesondere zu diesem Zweck gebaut.

Das Teilchen, das 2012 am CERN nachgewiesen wurde, hat die Eigenschaften, die das Standardmodell für das Higgs-Teilchen mit einer Masse von $126 \text{ GeV}/c^2$ vorher sagt: Es ist elektrisch neutral, wandelt sich in Paare von W-Teilchen, von Z-Teilchen oder Photonen um, und die Messergebnisse sind mit einem Spin von 0 verträglich. Doch stimmen die Umwandlungswahrscheinlichkeiten mit den Vorhersagen des Standardmodells überein? Und gibt es vielleicht nicht nur eine Art von Higgs-Teilchen, sondern gleich mehrere? Um solche Fragen zu klären, werden Forschende noch einige Jahre brauchen. Es bleibt also spannend!



- Ein ATLAS-Ereignis, bei dem ein Higgs-Boson-Kandidat sich zunächst in zwei Z-Teilchen und dann in vier Myonen umwandelt. Das Ereignis ist in der Detektorebene transversal zur LHC-Strahlachse dargestellt.



- Welche vier Experimente gibt es am LHC? Welche Forschungsschwerpunkte haben sie?
- Kommt das Higgs-Teilchen als Kandidat für Dunkle Materie in Frage? Warum oder warum nicht?



Das Wichtigste über das Higgs-Teilchen – Infos, Bilder, Links: <http://www.weltmaschine.de/physik/higgs>
Mehr über das Higgs-Teilchen: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/bausteine/higgs/>
Umwandlungen des Higgs-Teilchens: http://vmsstreamer1.fnal.gov/VMS/111208_HowHiggs/HiggsInteractive.htm
Experimente am LHC: https://www.weltmaschine.de/cern_und_lhc/experimente_am_lhc/

¹ Mehrere Forscher hatten gleichzeitig die Idee für diese Erklärung: Brout, Englert, Guralnik, Hagen, Higgs und Kibble. Daher gibt es verschiedene Bezeichnungen für das Feld, z.B. Brout-Englert-Higgs-Feld. Peter Higgs brachte aber die Idee in Umlauf, dass zu dem Feld auch ein neues Elementarteilchen gehören müsste – deshalb trägt das Higgs-Teilchen seinen Namen.

GRUNDLAGENFORSCHUNG: SINN UND NUTZEN

Der Teilchenbeschleuniger LHC dient zur Grundlagenforschung. Sind die Investitionen für seinen Bau gerechtfertigt?

Der Bau des LHC hat 14 Jahre gedauert und hat mehr als drei Milliarden Euro gekostet. Ein etwas kleinerer Betrag kam noch für die vier Experimente ATLAS, ALICE, CMS und LHCb hinzu. Die Investitionen in den LHC wurden größtenteils aus dem jährlichen Budget des CERN bezahlt sowie mithilfe von zusätzlichen Zuwendungen von Japan, den USA und anderen Staaten. Die Kosten der Detektoren trugen mehr als 400 Forschungsinstitute aus über 50 Ländern.

Derzeit tragen 22 Mitgliedsstaaten zum CERN-Budget bei, das jährlich etwa eine Milliarde Euro beträgt. Der größte Beitragszahler ist Deutschland.

Der Nutzen des LHC ist dagegen nicht in Zahlen zu messen. Mit dem LHC und anderen Teilchenbeschleunigern wird reine Grundlagenforschung betrieben. Dabei ist kein direkter wirtschaftlicher Nutzen beabsichtigt, wohl aber ein nachhaltiger gesellschaftlicher Nutzen. Es geht in erster Linie um Erkenntnisgewinn: Woraus bestehen wir? Wie hat sich das Universum entwickelt? Was wird in Zukunft mit dem Universum geschehen? Teilchenforschende suchen Antworten auf Fragen, die wohl jeden Menschen berühren.

Nebenbei haben sich aus der Grundlagenforschung in der Vergangenheit auch wichtige Erfindungen ergeben: Das World Wide Web wurde am CERN entwickelt, um Messdaten zwischen Wissenschaftler*innen auszutauschen (s. Abb. 1). Das CERN ist Vorreiter beim Grid-Computing zur Bewältigung der riesigen Datenmengen. Außerdem hat die Entwicklung der Detektoren am CERN die Halbleitertechnologie vorangetrieben.



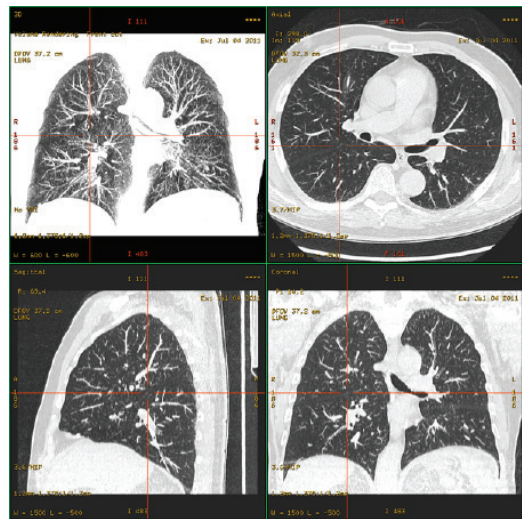
© CERN

► Abb. 1: Im Jahr 1990 bestand das World Wide Web nur aus diesem Server am CERN.

Methoden aus der Kern- und Teilchenphysik kommen auch in anderen wissenschaftlichen Gebieten zum Einsatz. Ionen- und Neutronenstrahlen beispielsweise werden in der Materialforschung, bei der Bearbeitung von Oberflächen und der Herstellung neuer Werkstoffe verwendet.

In der Medizin werden bei verschiedenen Diagnosemethoden Detektorsysteme und Ausleseelektronik eingesetzt, wie sie ursprünglich für die Grundlagenforschung in der Kern- und Teilchenphysik entwickelt wurden: bei der Computergestützten Tomographie (CT, s. Abb. 2), bei der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) und bei der Magnetresonanztomographie (MRT). Schon bald nach der Entwicklung der ersten Beschleuniger wurden Gammastrahlen und Elektronen für die Krebstherapie eingesetzt. Heute verwendet man weiterhin Protonen und schwere Ionen für die Behandlung von Tumoren.

Auch andere Bereiche der Grundlagenforschung haben Nutzen gebracht, obwohl dieser von der wissenschaftlichen Fragestellung her nicht absehbar war. Ohne ein Verständnis der Relativitätstheorie würde GPS-Navigation nicht funktionieren. Computer, Solarzellen, Mobiltelefone und vieles mehr würde es ohne Grundlagenforschung nicht geben.



© Wikipedia/Hg6996

► Abb. 2: Computertomographie-Abbildungen der Lunge



- Sollten Regierungen Geld in Grundlagenforschung investieren? Oder sollte Grundlagenforschung lieber privat oder durch Unternehmen finanziert werden?
- Ein Budget von einer Milliarde Euro pro Jahr, etwa sechs Milliarden Euro für den Bau des LHC und die Experimente: Ist das viel für ein Forschungszentrum mit mehr als 10 000 Mitarbeitenden weltweit? Recherchiere die jährlichen Budgets von Unternehmen vergleichbarer Größe. Was kosten Autobahnen, Sportereignisse (Fußball, Olympiade), große Bauvorhaben etc.?



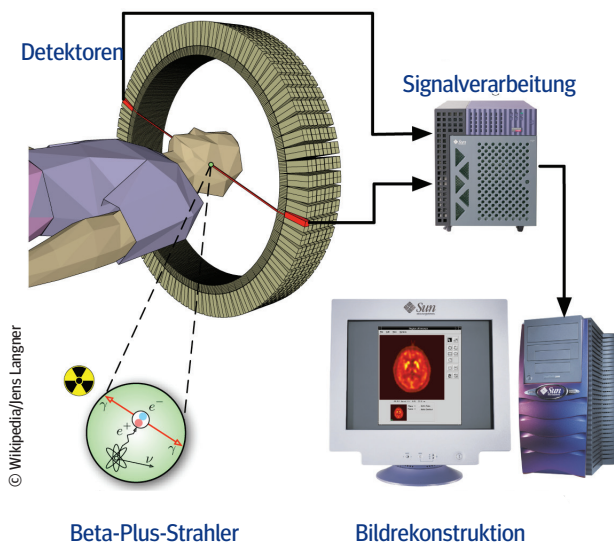
Sinn von Grundlagenforschung: <http://www.weltderphysik.de/thema/bmbf>

Anwendungen der Teilchenphysik: https://www.weltmaschine.de/cern_und_lhc/technologietransfer/

ANWENDUNGEN DER TEILCHENPHYSIK MEDIZIN

Positronen-Emissions-Tomographie (PET)

Die PET ist eine Diagnosemethode, mit der sich unter anderem Tumore sichtbar machen lassen. Hierfür wird dem Patienten eine Flüssigkeit gespritzt, die Positronen aussendet (ein Beta-Plus-Strahler). Dabei handelt es sich meist um eine spezielle Zuckerlösung, in der Fluor-Atome durch das radioaktive Isotop ^{18}F ersetzt wurden (Fluor-Desoxyglucose). Da Tumorzellen mehr Zucker verbrauchen als gesunde Zellen, sammelt er sich insbesondere in Tumorgewebe.



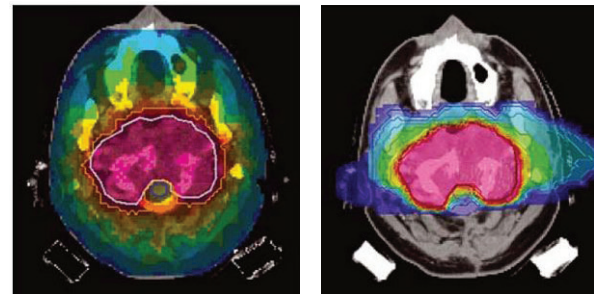
► Abb. 1: Positronen-Emissions-Tomographie (PET)

Die Positronen aus den Umwandlungen der radioaktiven Isotope legen im Körper nur eine sehr kurze Strecke zurück. Sobald ein Positron auf ein Elektron trifft, „annihilieren“ sie, d.h. die gesamte Masse der ursprünglichen Teilchen wandelt sich in zwei Photonen um. Diese bewegen sich mit gleicher Energie in genau entgegengesetzte Richtungen, und sie haben stets die gleiche Energie, die gemäß $E=mc^2$ der Masse des annihilierenden Elektron-Positron-Paares entspricht. Rund um den Patienten sind Detektoren angebracht, welche die Photonen nachweisen. Wenn zwei Photonen mit der richtigen Energie gleichzeitig an gegenüberliegenden Orten ankommen, muss ihr Ursprungsort auf der Verbindungslinie dazwischen liegen. Aus den Daten vieler Detektoren setzt ein Computer ein Bild des Körperinneren zusammen.

Tumorthherapie mit Hadronen

Heute werden hauptsächlich drei Methoden verwendet, um Krebs zu behandeln: Operation, Chemotherapie und Strahlentherapie. Bei der herkömmlichen Strahlentherapie werden Tumore mit hochenergetischen Photonen oder Elektronen bestrahlt. Diese ionisieren auf ihrem Weg durch den Körper Moleküle in den Zellen, was wiederum chemische Reaktionen auslöst, welche die Zellen abtöten oder sie an der Teilung hindern. Obwohl die Strahlung möglichst stark auf den Tumor fokussiert wird, schädigt die Behandlung auch gesunde Zellen – insbesondere, wenn der Tumor tief unter der Haut liegt.

Eine neuartige Form der Strahlentherapie, die am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH in Darmstadt entwickelt wurde, verwendet Hadronen (Protonen oder andere Ionen). Hierbei lässt sich gezielt einstellen, wie tief die Teilchen ins Gewebe eindringen sollen, bevor sie den Großteil ihrer Energie abgeben. So kann gesundes Gewebe geschont werden.



► Abb. 2: Links: Bei der herkömmlichen Strahlentherapie mit Photonen wird ein großer Teil des umliegenden Gewebes in Mitleidenschaft gezogen. Rechts: Bei der Bestrahlung mit Kohlenstoff-Ionen lässt sich die Dosis auf einen kleineren Bereich beschränken.



- Welche Vor- und Nachteile hat die Tumorthherapie mit Hadronen? Für welche Tumorarten ist sie besonders geeignet?
- Es gibt noch weitere medizinische Verfahren, bei denen Technologien und Prinzipien aus der Kern- und Teilchenphysik zum Einsatz kommen. Welche?
- Welche Energie haben die Photonen, die bei der Annihilation eines Positrons mit einem Elektron entstehen?



Grundlagenwissen über die PET: <https://www.krebsinformationsdienst.de/untersuchung/bildgebung/pet.php>
Tumorthherapie mit Hadronen: <https://www.weltderphysik.de/gebiet/leben/tumorthherapie/>

METHODEN DER TEILCHENPHYSIK – 1

TEILCHENKOLLISIONEN

Was geschieht, wenn zwei Protonen zusammenstoßen?

Man kann sich ein Proton als eine „Wolke“ aus vielen kleineren Einzelteilen vorstellen: drei Quarks (zwei Up-Quarks und ein Down-Quark) sowie Gluonen, die für den Zusammenhalt der Quarks sorgen.

Wenn sich Protonen nun wie Autos verhielten, die bei einem Unfall Splitter in die Umgebung verstreuen, müssten bei Protonen-Zusammenstößen immer Quarks und Gluonen herauskommen. Aber in Wirklichkeit entstehen auch völlig neue Teilchen: Elektronen, Neutrinos, und sogar Teilchen, die um ein Vielfaches schwerer sind als die ursprünglichen Protonen zusammen!

Wie ist das möglich? Dafür ist es wichtig zu verstehen, was Einstein mit der Formel $E=mc^2$ ausdrückte: Masse ist eine Form von Energie, genau wie Bewegungsenergie, thermische Energie oder elektrische Energie. Diese Tatsache wird beispielsweise in Kernkraftwerken genutzt. Dort werden Uran- und Plutonium-Atomkerne gespalten, wobei sich ein geringer Teil ihrer Masse in thermische Energie verwandelt; diese wird im Kraftwerksprozess letztendlich in elektrische Energie umgewandelt. Bei Teilchenkollisionen geschieht das Gegenteil: Ein Teil der Bewegungsenergie der Teilchen verwandelt sich in Masse. Je höher die Energie der ursprünglichen Teilchen war, desto massereicher können die entstehenden Teilchen sein.

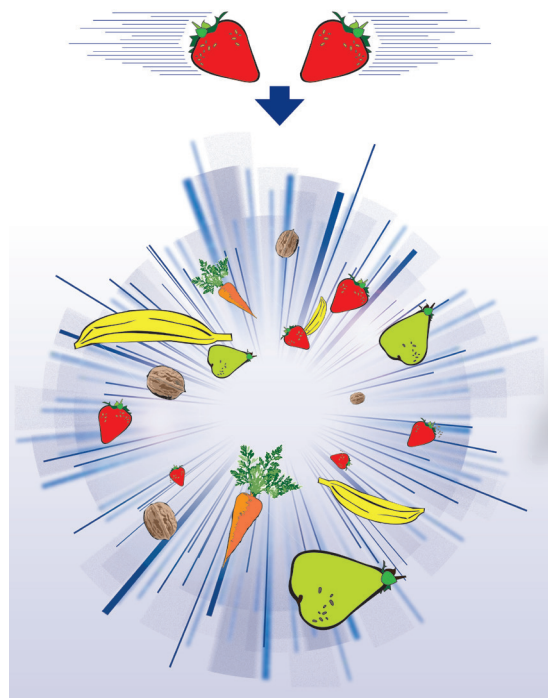
Die Bewegungsenergie zweier kollidierender Protonen im Teilchenbeschleuniger LHC am internationalen Forschungszentrum CERN beträgt zusammen 13 Tera-Elektronenvolt. Wenn sich diese Energie vollständig in Masse umwandeln würde, entspräche das mehr als 13800 Protonen! In Wirklichkeit wandelt sich nur ein Bruchteil der Bewegungsenergie in Masse um. Doch das genügt, um eine Vielzahl neuer Teilchen entstehen zu lassen.

Warum lassen Forschende Teilchen kollidieren?

Wenn Protonen, Atomkerne oder auch Elektronen und Positronen mit hohen Bewegungsenergien zusammenstoßen, können bisher unbekannte Teilchen erzeugt werden. Die Spuren der entstandenen Teilchen oder ihrer Umwandlungsprodukte werden durch Messinstrumente aufgezeichnet. Auf diese Weise suchen Forschende beispielsweise nach „supersymmetrischen“ Partnerteilchen der normalen Materie oder nach Teilchen, aus denen die geheimnisvolle Dunkle Materie bestehen könnte.

Welche Teilchen bei einer bestimmten Kollision entstehen, ist vom Zufall bestimmt. Man kann lediglich Wahrscheinlichkeiten für bestimmte Teilchenkombinationen berechnen. Bei den allermeisten Kollisionen entstehen nur bekannte Teilchen. Die meisten davon sind vergleichsweise leicht; massereiche Teilchen wie beispielsweise Top-Quarks oder W- und Z-Teilchen entstehen seltener. Wirklich exotische Teilchen entstehen nur etwa einmal pro einer Billion Kollisionen oder noch seltener. Deswegen finden in modernen Teilchenbeschleunigern viele Millionen Teilchenkollisionen pro Sekunde statt.

Auf diese Weise haben Forschende am CERN 2012 ein bis dahin unbekanntes Elementarteilchen nachgewiesen, bei dem es sich um ein Higgs-Teilchen handelt.



© Netzwerk Teilchenwelt



- Wie kommen die Protonen in den LHC?
- Wie werden die Protonen im LHC beschleunigt und auf eine Kreisbahn gelenkt?
- Was versteht man unter der Luminosität eines Teilchenbeschleunigers? Warum ist sie wichtig, und wie kann man sie erhöhen?



Webseite des LHC: <http://www.weltmaschine.de>

Fragen und Antworten rund um den LHC:

<http://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/experimente/teilchenbeschleuniger/lhc/lhc-faq/>

Die Masse-Energie-Äquivalenz ($E=mc^2$):

<http://www.drillingsraum.de/room-emc2/emc2.html>

Artikel rund um das Higgs-Teilchen:

<http://www.weltderphysik.de/thema/higgs>

- Bei Zusammenstößen von Teilchen hoher Energie (symbolisiert durch Erdbeeren) im LHC können ein oder mehrere vollkommen neue Teilchen entstehen.



METHODEN DER TEILCHENPHYSIK – 2

DIE SUCHE NACH NEUEN TEILCHEN

Wie erzeugt man exotische Teilchen?

Am CERN suchen Forschende beispielsweise nach dem Higgs-Teilchen oder Kandidaten für Dunkle Materie. Diese Teilchen existieren nicht ständig in unserer Umgebung, sondern entstehen nur selten und für kurze Zeit – beispielsweise bei Kollisionen von kosmischen Teilchen mit Atomkernen in der Erdatmosphäre. Um solche exotischen Teilchen zu erforschen, muss man sie also gezielt erzeugen. Dazu beschleunigt man Teilchen (z.B. Protonen oder Elektronen) auf sehr hohe Energien und bringt sie zur Kollision. Beim Zusammenstoß entstehen völlig neue Teilchen – mit viel Glück ist auch einmal ein echter Exot dabei.

Wie weist man neue Teilchen nach?

Die meisten gesuchten Teilchen sind sehr kurzlebig – das Higgs-Teilchen beispielsweise existiert im Mittel nur 10^{-22} Sekunden. In einer derart winzigen Zeitspanne gelangen Teilchen nicht einmal aus dem Beschleuniger hinaus in den Detektor. Bis dahin haben sie sich schon in leichtere Teilchen umgewandelt.

Man kann exotische Teilchen also nicht direkt in Detektoren nachweisen. Doch sie hinterlassen trotzdem Spuren. Eine Teilchensorte kann sich nur in ganz bestimmte Kombinationen von Teilchen umwandeln – welche, bestimmt insbesondere die **Ladungserhaltung**: Die elektrische Ladung des Teilchens vor der Umwandlung muss gleich der Summe der elektrischen Ladungen danach sein. Dasselbe gilt für die starke Ladung und für die schwache Ladung. Ein Higgs-Teilchen kann sich beispielsweise in folgende Teilchenkombinationen umwandeln:

- ▶ zwei Photonen
- ▶ zwei Z-Teilchen (siehe Abbildung)
- ▶ ein W^+ - und ein W^- -Teilchen
- ▶ ein Bottom-Quark und ein Anti-Bottom-Quark

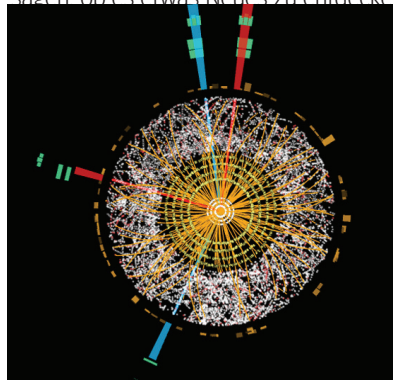
Physiker*innen suchen also nach entsprechenden Teilchenkombinationen, sogenannten „**Signalereignissen**“, die darauf hinweisen, dass sich ein unbekanntes Teilchen umgewandelt hat.

Woher weiß man, ob es sich wirklich um ein neues Teilchen handelt?

Wenn interessante Teilchenkombinationen (Signalereignisse) auftauchen, die auf exotische Teilchen hindeuten, fängt die Datenauswertung erst richtig an. Stammen die Signalereignisse – oder zumindest ein Teil davon – wirklich von einem bisher unbekanntem Teilchen oder doch nur von längst bekannten Prozessen? Wenn man Signalereignisse einzeln betrachtet, kann man das unmöglich feststellen. Also sind zur Auswertung der Messdaten andere Methoden notwendig.

Physiker*innen gehen dabei so ähnlich vor, als ob man herausfinden wollte, ob ein Würfel manipuliert ist. Dazu würde man sehr oft würfeln und notieren, wie oft welche Augenzahl vorkommt. Bei einem normalen Würfel wäre zu erwarten, dass jede Zahl etwa gleich oft auftaucht. Bei einem manipulierten Würfel dagegen werden die Häufigkeiten der verschiedenen Zahlen von der Erwartung abweichen. Je öfter man würfelt, desto sicherer kann man sagen, ob der Würfel manipuliert ist oder nicht.

In der Teilchenphysik funktioniert es analog: Anstatt zu würfeln, lassen Forschende bei Kollisionen verschiedene Teilchenkombinationen entstehen. Sie zählen, wie häufig die gesuchten Signalereignisse vorkommen, und tragen die Ergebnisse als Histogramme auf. Um diese auswerten zu können, berechnen Physiker*innen zunächst, was man für verschiedene Fälle erwarten würde: Für den Fall, dass es kein neues Teilchen außer den schon bekannten gibt, und für den Fall, dass ein neues Teilchen existiert, wie beispielsweise das Higgs-Teilchen. Man vergleicht die gemessenen Häufigkeiten der Signalereignisse mit den Erwartungen, die sich aus dem Standardmodell oder anderen Theorien ergeben (Supersymmetrie etc.). Je mehr Messungen durchgeführt werden, desto sicherer kann man sagen, ob es etwas Neues zu entdecken gibt.



© ATLAS Collaboration

- ▶ Die Grafik stellt einen Querschnitt des ATLAS-Detektors dar. Darin sind Spuren bzw. von Teilchen erzeugte Signale zu sehen, die bei einer Protonen-Kollision entstanden. Farblich hervorgehoben sind die **Umwandlungsprodukte eines Higgs-Teilchens**: zwei Elektronen und zwei Positronen. Das Higgs-Teilchen wandelte sich zunächst in zwei Z-Teilchen um, die sich dann jeweils in ein Elektron und ein Positron umwandelten.



- Wieviele Daten produziert der LHC pro Jahr? Wie werden die Daten an Forschende weltweit verteilt?
- Welche Eigenschaften haben W-Teilchen? In welche Teilchen können sie sich umwandeln?



Das LHC-Grid: https://www.weltmaschine.de/cern_und_lhc/experimente_am_lhc/lhc_computing_grid/

Homepage der International Masterclasses (Identifikation von W-Teilchen):

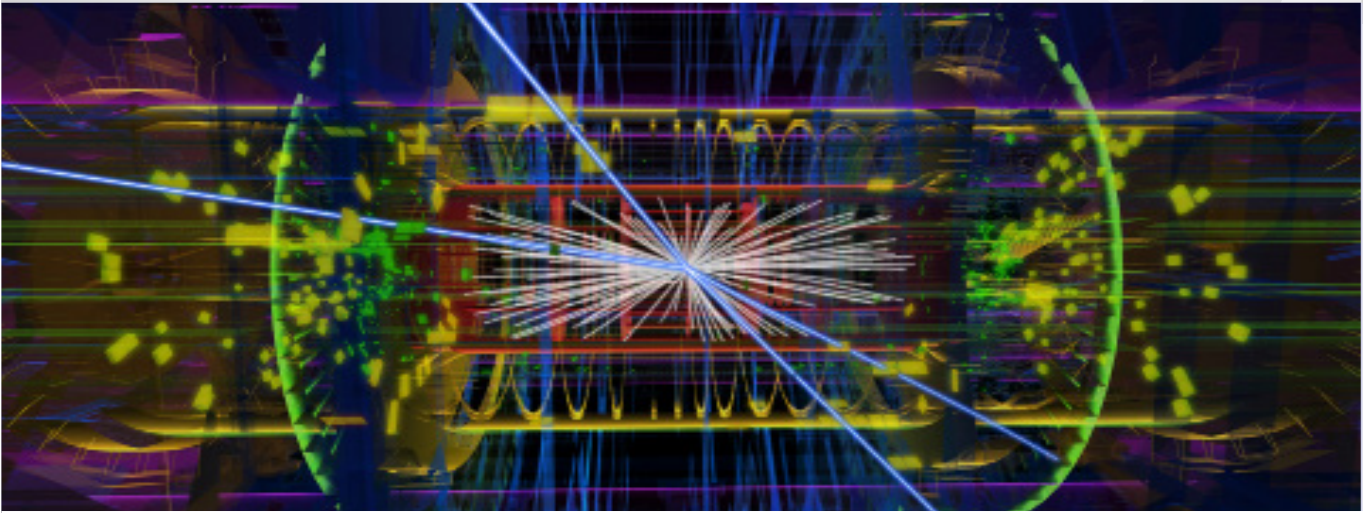
http://atlas.physicsmasterclasses.org/de/wpath_ereignis.htm

Geschichte der Teilchenphysik:

<http://kworkquark.desy.de/zeitleiste/uebersicht/1/index.html>



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

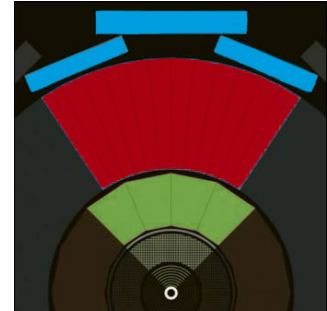
Im Teilchenbeschleuniger LHC am Forschungszentrum CERN bei Genf kollidieren Protonen mit einer Energie von jeweils 6,5 Tera-Elektronenvolt (TeV). Bei der Kollision entstehen neue Teilchen, die mithilfe von Detektoren nachgewiesen werden.

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?

- | | | |
|---|--|------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Elektronen | <input type="checkbox"/> Myonen | <input type="checkbox"/> Neutrinos |
| <input type="checkbox"/> Protonen | <input type="checkbox"/> Photonen | <input type="checkbox"/> Neutronen |
| <input type="checkbox"/> alle elektrisch geladenen Teilchen | <input type="checkbox"/> alle Hadronen | |
| <input type="checkbox"/> alle elektrisch neutralen Teilchen | <input type="checkbox"/> 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?

- | | |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> Energie des ursprünglichen Teilchens | <input type="checkbox"/> Impuls des Teilchens |
| <input type="checkbox"/> elektrische Ladung des Teilchens | <input type="checkbox"/> Spur des Teilchens |

5. Woraus besteht dieser Teil von ATLAS?

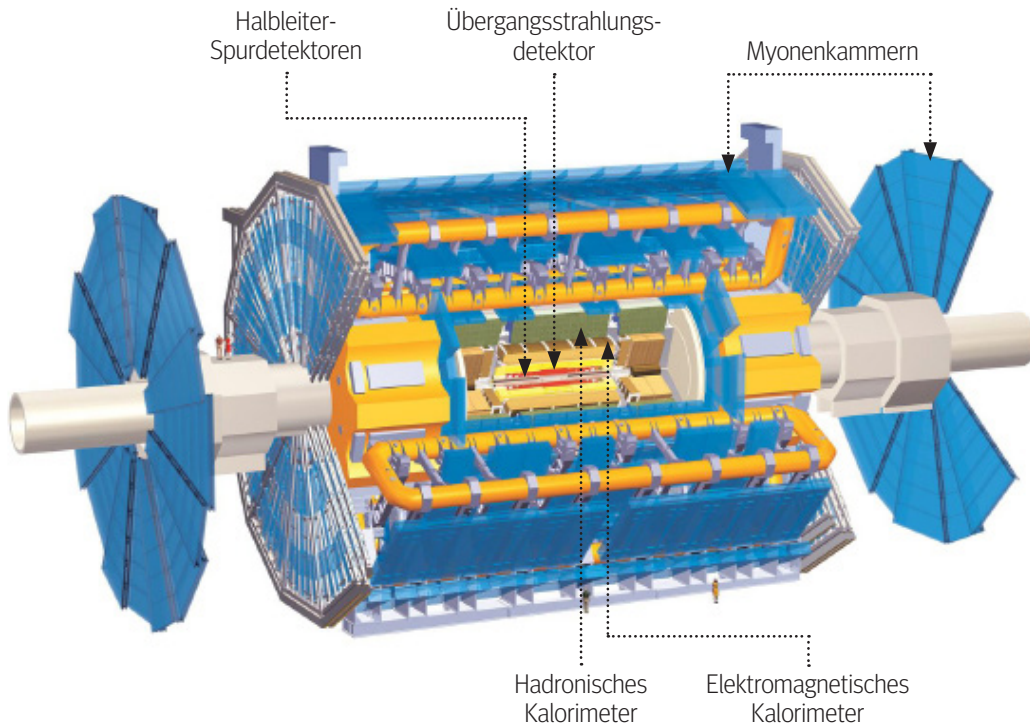
- | | | |
|-----------------------------------|--|---|
| <input type="checkbox"/> Silizium | <input type="checkbox"/> flüssiges Argon | <input type="checkbox"/> Gas in Driftröhren |
| <input type="checkbox"/> Blei | <input type="checkbox"/> Stahl | <input type="checkbox"/> Szintillatoren |

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



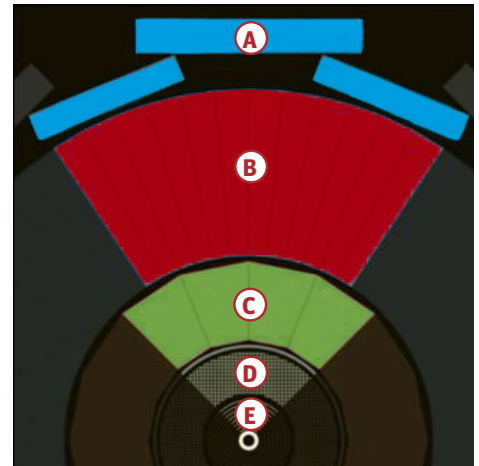
DER ATLAS-DETEKTOR

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

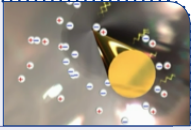


1a. Halbleiter-Spurdetektor 

Nachgewiesene Teilchen:

Physikalische Größe(n):


Beschreibung des Prozesses:

1b. Übergangsstrahlungsdetektor 

Nachgewiesene Teilchen:

Physikalische Größe(n):

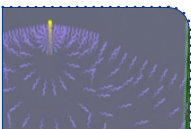
Beschreibung des Prozesses:

2a. Elektromagnetisches Kalorimeter 

Nachgewiesene Teilchen:

Physikalische Größe(n):

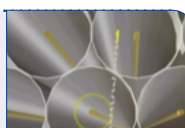
Beschreibung des Prozesses:

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



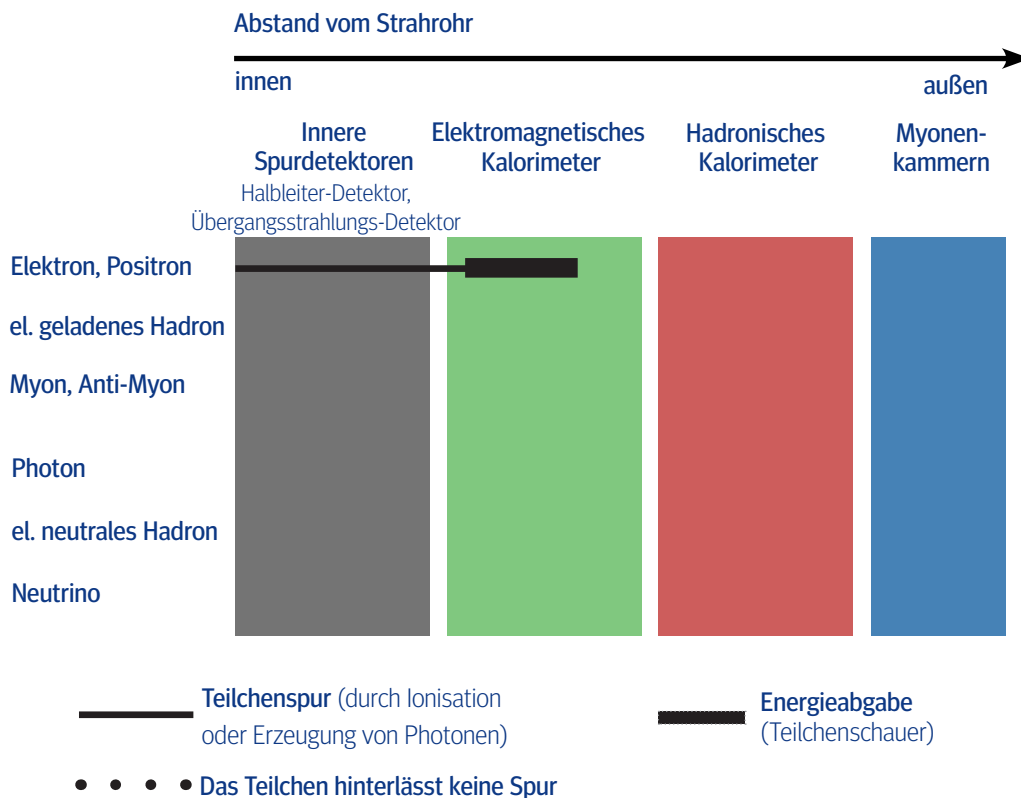
Im Teilchenbeschleuniger LHC am internationalen Forschungszentrum CERN bei Genf kollidieren Protonen mit einer Bewegungsenergie von jeweils 6,5 TeV. Bei der Kollision entsteht eine Vielzahl neuer Teilchen. Diese können sogar eine größere Masse haben als die ursprünglichen Protonen, da bei der Kollision 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

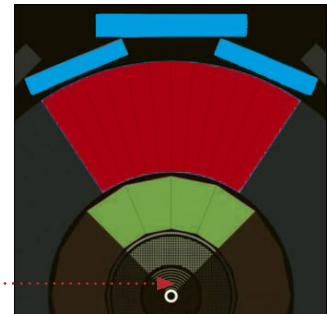
LÖSUNG FÜR ARBEITSBLATT 1/GRUPPE 1A: HALBLEITER-SPURDETEKTOREN



- 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?

- | | | |
|--|--|------------------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> Elektronen | <input checked="" type="checkbox"/> Myonen | <input type="checkbox"/> Neutrinos |
| <input checked="" type="checkbox"/> Protonen | <input type="checkbox"/> Photonen | <input type="checkbox"/> Neutronen |
| <input checked="" type="checkbox"/> alle elektrisch geladenen Teilchen | <input type="checkbox"/> alle Hadronen | |
| <input type="checkbox"/> alle elektrisch neutralen Teilchen | <input type="checkbox"/> 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?

- | | |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> Energie des ursprünglichen Teilchens | <input checked="" type="checkbox"/> Impuls des Teilchens |
| <input checked="" type="checkbox"/> elektrische Ladung des Teilchens | <input checked="" type="checkbox"/> Spur des Teilchens |

5. Woraus besteht dieser Teil von ATLAS?

- | | | |
|--|--|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> Silizium | <input type="checkbox"/> flüssiges Argon | <input type="checkbox"/> Gas in Driftröhren |
| <input type="checkbox"/> Blei | <input type="checkbox"/> Stahl | <input type="checkbox"/> 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 Lötkugeln 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.



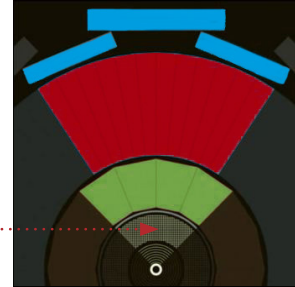
LÖSUNG FÜR ARBEITSBLATT 1/GRUPPE 1B: ÜBERGANGSSTRAHLUNGSDETEKTOR



- 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?

- | | | |
|---|--|------------------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> Elektronen | <input type="checkbox"/> Myonen * | <input type="checkbox"/> Neutrinos |
| <input type="checkbox"/> Protonen * | <input type="checkbox"/> Photonen | <input type="checkbox"/> Neutronen |
| <input type="checkbox"/> alle elektrisch geladenen Teilchen * | <input type="checkbox"/> alle Hadronen | |
| <input type="checkbox"/> alle elektrisch neutralen Teilchen | <input type="checkbox"/> 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.



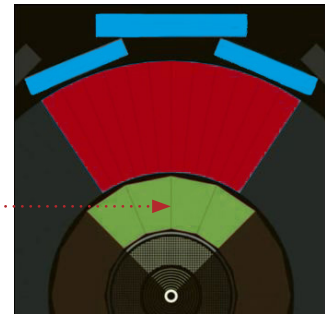
LÖSUNG FÜR ARBEITSBLATT 1/GRUPPE 2A: ELEKTROMAGNETISCHES KALORIMETER



- 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?

- | | | |
|--|--|------------------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> Elektronen | <input type="checkbox"/> Myonen* | <input type="checkbox"/> Neutrinos |
| <input type="checkbox"/> Protonen* | <input checked="" type="checkbox"/> Photonen | <input type="checkbox"/> Neutronen |
| <input type="checkbox"/> alle elektrisch geladenen Teilchen* | <input type="checkbox"/> alle Hadronen | |
| <input type="checkbox"/> alle elektrisch neutralen Teilchen | <input type="checkbox"/> 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?

- | | |
|--|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> Energie des ursprünglichen Teilchens | <input type="checkbox"/> Impuls des Teilchens |
| <input type="checkbox"/> elektrische Ladung des Teilchens | <input type="checkbox"/> Spur des Teilchens |

5. Woraus besteht dieser Teil von ATLAS?

- | | | |
|--|---|---|
| <input type="checkbox"/> Silizium | <input checked="" type="checkbox"/> flüssiges Argon | <input type="checkbox"/> Gas in Driftröhren |
| <input checked="" type="checkbox"/> Blei | <input checked="" type="checkbox"/> Stahl | <input type="checkbox"/> 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.



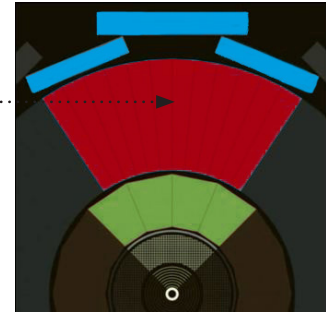
LÖSUNG FÜR ARBEITSBLATT 1/GRUPPE 2B: HADRONISCHES KALORIMETER



- 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?

- | | | |
|---|---|---|
| <input type="checkbox"/> Elektronen | <input type="checkbox"/> *Myonen | <input type="checkbox"/> Neutrinos |
| <input checked="" type="checkbox"/> Protonen | <input type="checkbox"/> Photonen | <input checked="" type="checkbox"/> Neutronen |
| <input type="checkbox"/> alle elektrisch geladenen Teilchen | <input checked="" type="checkbox"/> alle Hadronen | |
| <input type="checkbox"/> alle elektrisch neutralen Teilchen | <input type="checkbox"/> 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?

- | | |
|--|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> Energie des ursprünglichen Teilchens | <input type="checkbox"/> Impuls des Teilchens |
| <input type="checkbox"/> elektrische Ladung des Teilchens | <input type="checkbox"/> Spur des Teilchens |

5. Woraus besteht dieser Teil von ATLAS?

- | | | |
|-----------------------------------|---|--|
| <input type="checkbox"/> Silizium | <input type="checkbox"/> flüssiges Argon | <input type="checkbox"/> Gas in Driftröhren |
| <input type="checkbox"/> Blei | <input checked="" type="checkbox"/> Stahl | <input checked="" type="checkbox"/> 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.



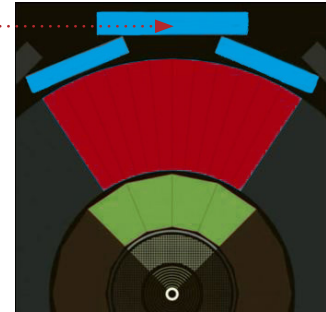
LÖSUNG FÜR ARBEITSBLATT 1/GRUPPE 3: MYONENKAMMERN



- 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?

- | | | |
|---|--|------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Elektronen | <input checked="" type="checkbox"/> Myonen | <input type="checkbox"/> Neutrinos |
| <input type="checkbox"/> Protonen | <input type="checkbox"/> Photonen | <input type="checkbox"/> Neutronen |
| <input type="checkbox"/> alle elektrisch geladenen Teilchen | <input type="checkbox"/> alle Hadronen | |
| <input type="checkbox"/> alle elektrisch neutralen Teilchen | <input type="checkbox"/> 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?

- | | |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> Energie des ursprünglichen Teilchens | <input checked="" type="checkbox"/> Impuls des Teilchens |
| <input checked="" type="checkbox"/> elektrische Ladung des Teilchens | <input checked="" type="checkbox"/> Spur des Teilchens |

5. Woraus besteht dieser Teil von ATLAS?

- | | | |
|-----------------------------------|--|--|
| <input type="checkbox"/> Silizium | <input type="checkbox"/> flüssiges Argon | <input checked="" type="checkbox"/> Gas in Driftröhren |
| <input type="checkbox"/> Blei | <input type="checkbox"/> Stahl | <input type="checkbox"/> 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.

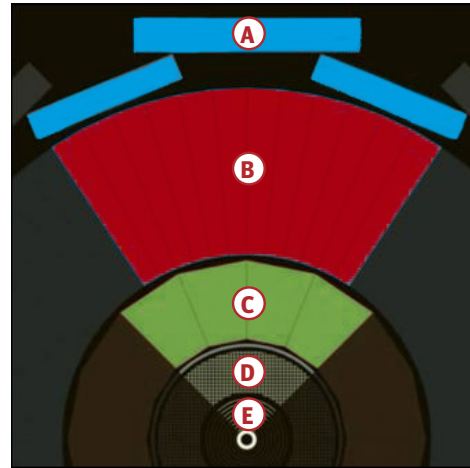


ATLAS-DETEKTOR

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.



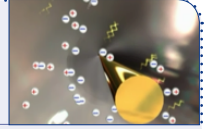
LÖSUNG FÜR ARBEITSBLATT 3

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

alle elektrisch geladenen Teilchen

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

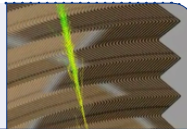
Beschreibung des Prozesses: Elektrisch geladene Teilchen ionisieren die Atome im Siliziumkristall. Die freigesetzten Elektronen bewegen sich zu Lötkegeln unter dem Kristall. Die stromdurchflossenen Kugeln zeigen an, wo das ursprüngliche Teilchen entlang flog.

1b. Übergangsstrahlungsdetektor**Nachgewiesene Teilchen:**

hauptsächlich Elektronen und Positronen

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

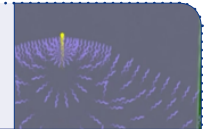
Beschreibung des Prozesses: Sehr schnelle elektrisch geladene Teilchen erzeugen im Detektormaterial Photonen. Das ursprüngliche Teilchen und die Photonen setzen Elektronen frei. Deren elektrische Ladung wird gemessen.

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

Elektronen, Positronen und Photonen

Physikalische Größe(n): Energie

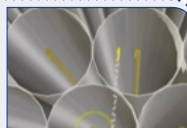
Beschreibung des Prozesses: Elektronen, Positronen und Photonen erzeugen in Blei- und Stahlschichten Teilchenschauer, die wiederum aus all diesen Teilchen bestehen. Die Sekundärteilchen ionisieren flüssiges Argon. Die freigesetzten Elektronen bewegen sich zu Elektroden. Aus der insgesamt gemessenen elektrischen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

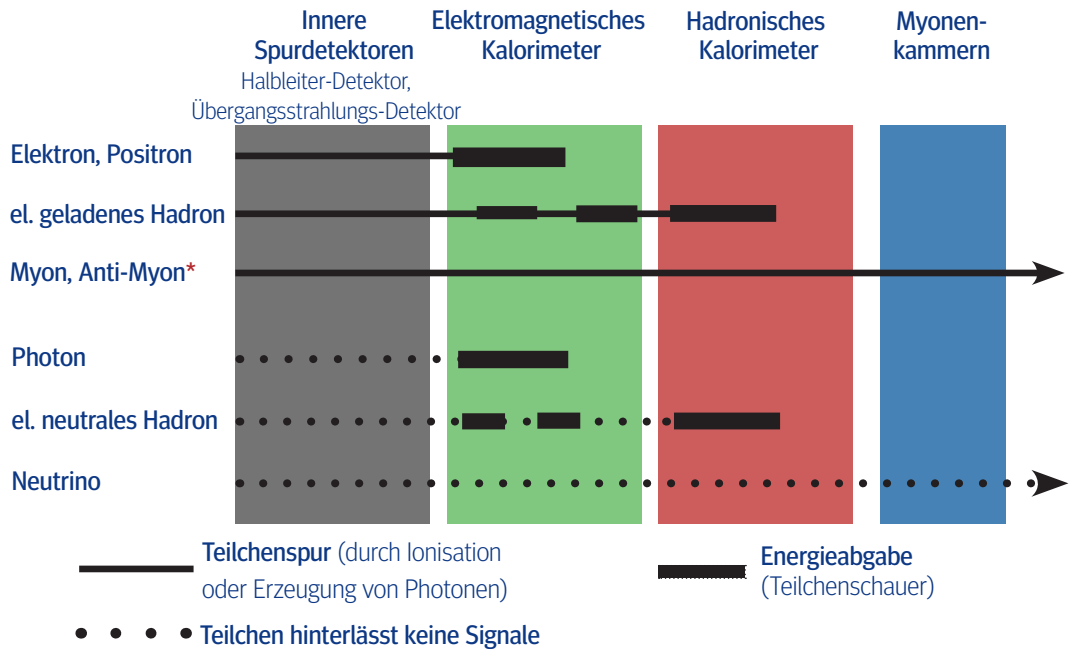


ATLAS-DETEKTOR

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 Lötägeln 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.



[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).

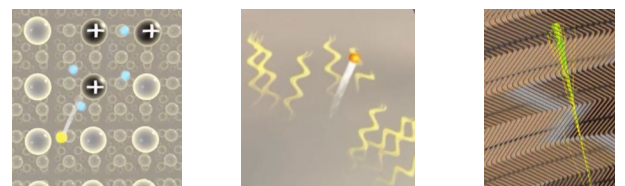
Diese Prozesse sind je nach Teilchensorte und Detektorart verschieden. So lassen sich Teilchensorten voneinander unterscheiden (s. auch Frage 11 und die zugehörige Präsentation, Folie 11-13).

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).

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.

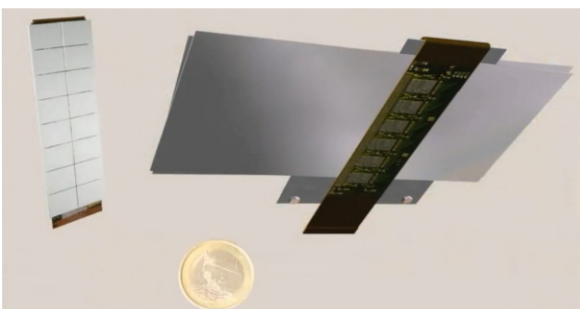
5. Wie funktionieren die Halbleiter-Spurdetektoren?

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 Lötkegel 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).

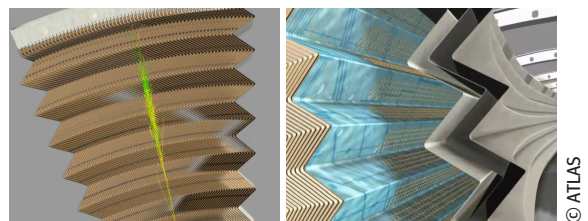
Die ursprünglichen Teilchen und die Elektronen ionisieren das Gas in den Driftröhren (eine Mischung aus Xenon, Kohlendioxid und Sauerstoff). Die freigesetzten Elektronen werden über einen Draht in der Mitte der Röhre abgeleitet und in ein digitales Signal umgewandelt. Die Driftzeit der Elektronen wird 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.

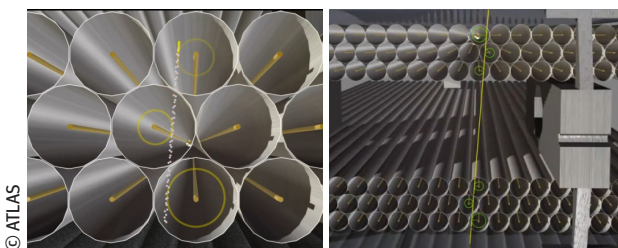
Diese Teilchen fliegen durch Szintillatoren; das sind Materialien, die Photonen aussenden, wenn ein elektrisch geladenes Teilchen hindurch fliegt. Anhand der gemessenen Intensität lässt sich die Energie des ursprünglichen Hadrons berechnen.

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 µm 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.

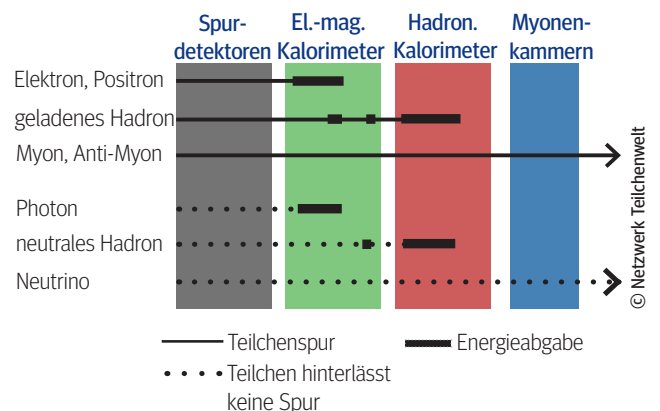
Im elektromagnetischen Kalorimeter erzeugen Elektronen, Positronen und Photonen Teilchenschauer, die wiederum aus allen diesen Teilchen bestehen. Das ursprüngliche Teilchen wird dabei absorbiert. Andere Teilchen geben nur einen Teil ihrer Energie ab und bewegen sich weiter.

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

Impressum

Herausgeber: Netzwerk Teilchenwelt © Technische Universität Dresden

Autoren: Didaktiker*innen, Wissenschaftskommunizierende und Forschende von Netzwerk Teilchenwelt

Design und Grafiken: büro quer, www.buero-quer.de

Redaktion: Manuela Kuhar, Flora Brinckmann, Uta Bilow, Caroline Förster, Franziska Viebach

Bildnachweis: Netzwerk Teilchenwelt (Titelbild)

Projektleitung: Michael Kobel, Uta Bilow | Netzwerk Teilchenwelt | TU Dresden, Institut für Kern- und Teilchenphysik | www.teilchenwelt.de, mail@teilchenwelt.de

4. Auflage 2020

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.

