

# Gliederung

<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>1 Einführung in die Teilchenphysik</b>	<b>5</b>
1.1 Physikalische Grundlagen	5
1.2 Konzepte der Teilchenphysik	13
1.3 Die Suche nach dem Higgs–Boson	18
<b>2 Teilchendetektoren</b>	<b>21</b>
2.1 Einige Detektortypen	24
2.2 Das Hadronische Endkappen–Kalorimeter (HEC) im ATLAS–Detektor	30
<b>3 Qualitätskontrolle großflächiger Read–Out–Boards (ROBs)</b>	<b>36</b>
3.1 Aufbau und Produktion der ROBs	37
3.2 Produktion großflächiger Photovorlagen für Platinenätzungen	41
3.3 Visuelle Tests der ROBs	44
3.4 Dickenmessung	49
3.5 Hochspannungstest (HV–Test)	56
3.5.1 Eigenschaften der Mylarelektroden	57
3.5.2 Aufbau und Ergebnisse des HV–Test	58

3.5.3	Induzierte Durchschläge	62
3.6	Zusammenfassung	64
	<b>Anhang</b>	<b>66</b>
	Dokumentation im Rahmen der ATLAS-QAP (Quality Assurance policy)	66
	Geplante Tests – Aufbau einer Testhardware	70
	<b>Literaturverzeichnis</b>	
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	

# Einleitung

Die Elementarteilchenphysik ist ein Kind des 20. Jahrhunderts, ein recht moderner Teilbereich der Physik. Sie versucht durch wenige Sorten punktförmiger, d.h. als unteilbar angesehener Teilchen und ihrer Wechselwirkungen untereinander, die Struktur der Materie zu beschreiben. Da ihre Aussagen und Erkenntnisse wenig mit den Erfahrungen unseres alltäglichen Lebens, dem sogenannten Makrokosmos, zu tun haben, umgibt die Teilchenphysik ein Hauch von Geheimnisvollem. Einerseits sind ihre Ideen und Theorien im Detail nur wenigen Fachleuten der Physik bekannt und Experimente finden meistens an gigantischen Forschungszentren statt, von der Öffentlichkeit wenig beachtet. Andererseits sind viele Schlagwörter – z.B. Quarks, Antimaterie, Photonenimpuls etc. – nicht allein durch Science Fiction im gesellschaftlichen Sprachgebrauch adaptiert, sondern vielleicht gerade durch das Interesse an dem, "was die Welt im Innersten zusammenhält". Diesem Interesse muß die Physik, muß jede Form der Grundlagenforschung Rechnung tragen.<sup>1</sup>

Wie weit unsere Alltagswelt von der mikroskopischen Welt der kleinsten Teilchen größenverhältnismäßig entfernt ist, soll Bild 1 verdeutlichen. Beginnend mit einem Salzkorn, das wir noch mit bloßem Auge sehen können, steigt es 16 Größenordnungen bis zu den Elektronen und Quarks ab, die im Standardmodell der Teilchenphysik bislang als elementar gelten. Diese Teilchen sind also mindestens 10 Billionen mal kleiner als das Salzkorn. [Schm97]

---

<sup>1</sup> Sie muß zudem den Umstand berücksichtigen, daß ein solches Interesse auch immer die Grundlage von Forschungsfinanzierung ist. Meines Erachtens nach gilt es hier viele Informationsdefizite auszuräumen.

Abstieg.doc

**Bild 1** Vom Kristall bis zu den kleinsten Teilchen

Um die Ziele und Ergebnisse dieser Staatsexamensarbeit richtig einordnen zu können, ist eines ihrer Hauptanliegen die Vermittlung der wesentlichen Konzepte der Elementarteilchenphysik. Diesem Anliegen ist *Kapitel 1* der Arbeit gewidmet. Es versucht einen Abriß der Physik des 20. Jahrhunderts zu geben.

Die Instrumente, die uns Einblicke in den Mikrokosmos gewähren – Teilchenbeschleuniger und –detektoren – sind im Grunde genommen nichts anderes als Mikroskope. Da diese Art von Mikroskopen jedoch nur wenigen Menschen zugänglich ist, ist die Lehre von der Teilchenphysik zwangsläufig eher abstrakter Natur. Und doch lassen sich einige Versuche zur Teilchendetektion sogar mit relativ wenig Aufwand im Labor durchführen. *Kapitel 2* wird sich mit solchen grundlegenden Prinzipien von Teilchendetektoren bis hin zur Skizzierung der Funktionsweise des Hadronischen Endkappen–Kalorimeters im ATLAS–Detektor am CERN befassen und somit ein Bindeglied zum *3. Kapitel* darstellen, welches die experimentelle Phase dieser Arbeit dokumentiert.

Die Qualitätskontrolle der großflächigen Ausleseelektroden des ATLAS–Detektors umfaßte visuelle Tests, die die Reinheit und ordnungsgemäße Herstellung untersuchten, Dickenmessungen und Tests der Hochspannungsfestigkeit. Darüberhinaus erfolgten Untersuchungen zu induzierten Durchschlägen an einer Ausleseelektrode und insbesondere zu den Eigenschaften der als Hochspannungselektroden benutzten, beidseitig aluminisierten Mylarfolie. *Kapitel 3* beinhaltet die Testergebnisse.

Die Ergebnisse wurden im Rahmen der ATLAS–Quality–Assurance–Policy dokumentiert. Über die erstmalige Nutzung dieses Informationsdienstes berichtet ein *Anhang*. Ebenfalls dort finden sich Hinweise auf geplante Tests und den Aufbau einer Test–hardware.

# 1 Einführung in die Teilchenphysik

## 1.1 Physikalische Grundlagen

Die Physikalische Welt besteht hauptsächlich aus Materie und Licht. Ob Materie aus kleinsten Bausteinen besteht, war schon seit jeher eine zentrale Frage der Naturwissenschaften. Zurückverfolgen läßt sich die Suche nach dem "Unteilbaren" (griechisch: atomos) bis in das 5. Jahrhundert v.C. (Anaxagoras, Demokrit, Leukipp).

Im 19. Jahrhundert waren die meisten Wissenschaftler davon überzeugt, daß alle Materie aus verschiedenen Sorten von Atomen, welche man Elemente nannte, aufgebaut ist. Die Elemente ließen sich nach ihren chemischen Eigenschaften in Gruppen einteilen (1869 hatte Mendelejev das Periodensystem der Elemente ausgearbeitet.).

Es gab in der 2. Hälfte des 19. Jhd. ebenfalls eine geschlossene Theorie über das Licht in Form der Maxwellschen Gleichungen der Elektrodynamik. Das Wellenmodell hatte spätestens mit dieser Theorie den Vorzug vor dem Teilchenmodell erhalten, wie es etwa von Newton in Gegnerschaft zu Huygens im 17. Jhd. vertreten wurde. Phänomene wie Beugung und Interferenz ließen sich eher mit dem Wellencharakter des Lichtes erklären.

Zum Ende des Jahrhunderts hin führten Thomson, Becquerel und das Ehepaar Curie Versuche durch, die den Schluß nahelegten, daß Atome doch teilbar sind: Thomson entdeckte das Elektron ( $e^-$ ) als Bestandteil von Atomen, Becquerel und das Ehepaar Curie stellten fest, daß Atome Teilchen aussenden, die später (Wilson, 1912) in Nebelkammern auch sichtbar gemacht werden konnten und als  $\alpha$ -Teilchen (Heliumkerne, bestehend aus zwei Protonen und zwei Neutronen) identifiziert wurden. Mit diesen Teilchen beschossen Geiger und Marsden 1909 eine Goldfolie, und Rutherford deutete ihre Ergebnisse in einem neuen Atommodell, in dem 99,9% der Masse eines Atoms einen Durchmesser von etwa  $10^{-$

$10^{-15}$  m hat, während das Atom selbst  $10^{-10}$  m mißt. Stellen wir uns den Atomkern in der Größe eines Apfels vor, so kreisen die Elektronen in einer Entfernung von 5 km um den Apfel. Materie besteht also im Wesentlichen aus Nichts.

Parallel zu diesen Entdeckungen vollzog sich ein Umdenken bei der Beschreibung des Lichtes. Planck fand heraus, daß nach der klassischen Thermodynamik die gesamte abgestrahlte Energie eines Körpers unendlich wird, wenn Licht jeder Farbe (Frequenz) in beliebig kleinen Energiemengen emittiert werden kann. Er mußte daraus folgern, daß Licht einer festen Frequenz nur in Vielfachen eines fundamentalen Energiequants abgegeben werden kann:

$$E = h \cdot \nu \quad , \quad h = \text{Plancksches Wirkungsquantum}$$

Auch Einsteins Erklärung des Photoeffektes, bei dem ein Metall Elektronen aussenden kann, wenn es mit Licht bestrahlt wird, mußte Licht wieder als Teilchen interpretieren. 1923 schließlich zeigte Compton mit Streuversuchen von Lichtteilchen an Elektronen, daß jene wie klassische Teilchen einen Impuls tragen, wobei gilt:

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad , \quad \lambda = \text{Wellenlänge des Lichts}$$

Damit war die Quantentheorie des Lichts begründet, und die Tatsache, daß sich Licht in manchen Experimenten wie eine Welle, in anderen wie ein Teilchen verhält, kursiert seitdem unter dem Schlagwort "Welle–Teilchen–Dualismus".

Den Versuch einer Quantentheorie des Atoms stellt das Bohrsche Atommodell (um 1913) dar, das – theoretisch unbefriedigend – postulieren mußte, daß die um den Kern kreisenden Elektronen nur gewisse Bahnen einnehmen und auf diesen nicht strahlen dürfen, was nach den Gesetzen der Physik eigentlich jede auf eine Kreisbahn gezwungene Ladung tun müßte. Jedoch konnte dieses Atommodell das diskrete Linienspektrum zumindest des Wasserstoffs sehr gut erklären.

Anders ging de Broglie 10 Jahre später vor und löste so den geistigen Funken zur Entwicklung der Quantenmechanik aus: In Umkehrung der Tatsache, daß Licht – seit

Jahrhunderten als Wellenphänomen gesehen – sich in ausgewählten Situationen wie ein Teilchen verhält, sollten Elektronen, die bis dahin als extrem kleine, harte Kügelchen gegolten hatten, sich wie ausgedehnte Wellen verhalten können mit einer Wellenlänge von

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad . \quad p = \text{Impuls des } e^-$$

Diese Beziehung sollte für alle Teilchen gelten, jedoch ist sie bei Teilchen großer Masse (und damit großen Impulses) wegen der daraus resultierenden kleinen Wellenlänge kaum beobachtbar.

Unmittelbar auf de Broglies Ideen aufbauend entwickelte Schrödinger analog zur Wellengleichung, die das Verhalten von Lichtwellen in Zeit und Raum beschreibt, eine Gleichung für Materiewellen, in der ein Teilchen durch die Wellenfunktion  $\psi$  beschrieben wird:

$$\frac{-\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + V\psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad .$$

$\hbar = h/2\pi$   
 $m = \text{Masse des Teilchens}$   
 $V = \text{Potential der Kraft}$   
 auf das Teilchen  
 $i = \text{Eulersche Zahl; } i^2 = -1$

Die Größe  $\psi$  hat keine physikalische Bedeutung. Die Wahrscheinlichkeit, das Teilchen in einem Volumenelement  $dV$  anzutreffen, ist gegeben durch

$$|\psi(x,t)|^2 dV$$

und ist eine durch Messung zugängliche Größe.

Parallel zu Schrödinger entwickelte Heisenberg eine Quantenmechanik, deren Grundgedanke war, daß nur diejenige Beschreibung eines Systems sinnvoll sei, die seine Beobachtung mitberücksichtigt. Beobachtung ist nämlich immer verbunden mit irgendeiner Form der Wechselwirkung, z.B. der Streuung eines Elektrons am System, und wird in Heisenbergs



Formulierung als mathematische Funktion dargestellt, die auf den Quantenzustand des Systems wirkt. Die Differentialgleichung, die sich daraus ergibt, ist äquivalent zu Schrödingers Wellengleichung.

Eines der wichtigsten und fruchtbarsten Prinzipien der Physik, die Heisenbergsche Unschärferelation, folgt aus der Tatsache, daß jede Beobachtung eines Systems dieses beeinflußt. Will man etwa den Ort eines Elektrons sehr genau bestimmen, indem man ein Photon an ihm streut, muß das Photon eine kleine Wellenlänge haben (analog dazu ist die kleinste Struktur, die ein Mikroskop auflösen vermag, in der Größenordnung des verwendeten Lichts). Kleine Wellenlänge heißt aber großer Impuls des Photons, sodaß das Elektron stark gestört wird. Kennt man einen Parameter des Teilchens sehr genau, verliert man das Wissen über den anderen, sogenannten konjugierten Parameter. Die Fehler bei gleichzeitiger Orts- und Impulsmessung müssen immer folgender Ungleichung genügen:

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq h$$

Ähnliches gilt bei der Energiemessung zu einem bestimmten Zeitpunkt:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h$$

Besonders diese Version der Heisenbergschen Unschärferelation ist ein mächtiges Instrument in der Teilchenphysik, wenn es etwa darum geht, Lebensdauern von kurzlebigen Teilchen aus deren Energieverteilung abzuschätzen.

Obwohl die Quantenmechanik ein ausgeklügeltes Bild der Elektronenwellenfunktion eines Atoms liefert, ist das Bohrsche Atommodell eine gute Näherung zur Berechnung von Atomspektren. In solchen Spektren fanden sich jedoch bisweilen zwei statt einer vorausgesagten Linie. Um dieses Rätsel zu lösen, schlugen Goudsmit und Uhlenbeck 1925 das Modell des Elektron-Eigenspins vor. So, wie sich die Erde um die Sonne und gleichzeitig um sich selbst dreht, sollte sich das Elektron um den Atomkern und um sich selbst drehen. Das aus dieser Bewegung resultierende Magnetfeld addiert oder subtrahiert sich zum atomaren Magnetfeld je nach Lage der beiden zueinander. Projiziert man den

Eigenspin auf die Achse des atomaren Magnetfeldes, ergeben sich zwei erlaubte Spineinstellungen:

$$s = \pm \frac{1}{2} h$$

Ebenfalls 1925 formulierte Pauli für solche Spin- $\frac{1}{2}$ -Teilchen, zu denen auch Protonen und Neutronen gehören, ein Ausschließungsprinzip, was besagt, daß zwei gleiche Teilchen nie exakt im gleichen Quantenzustand (d.h. gleicher Impuls und Spin im gleichen Raumgebiet) sein dürfen. Spin- $\frac{1}{2}$ -Teilchen (und ebenfalls Teilchen mit Spin  $\pm \frac{3}{2}, \pm \frac{5}{2}$  usw.) nennt man Fermionen, weil die Impulsverteilung eines Ensembles von ihnen durch die Fermi-Dirac-Statistik beschrieben wird.

Teilchen mit ganzzahligem Spin (z.B. Photonen) gehorchen der Bose-Einstein-Statistik und werden Bosonen genannt. Die Unterscheidung in Fermionen und Bosonen spielt eine wichtige Rolle im Standardmodell, einem erfolgreichen Konzept der Teilchenphysik.

Obwohl das Bild einer sich drehenden geladenen Kugel verlockend ist, muß klar sein, daß dieses Modell sehr einfach ist und schnell an seine Grenzen stößt, so wie sich das Modell vom Elektron, das auf festen Bahnen satellitenähnlich um den Kern kreist, als falsch erweist. Alles, was zu  $h$  proportional ist, ist ein Quanteneffekt. Man muß sich das Elektron also als Welle vorstellen, die außer dem Quant der elektrischen Ladung ein Quant des Eigendrehimpulses trägt. Ähnlich, wenn auch ein wenig abstrakter, wurden später der Isospin, der z.B. Proton und Neutron als gleiche Teilchen mit unterschiedlichen Isospineinstellungen behandelt, die Seltsamkeit, die Farbladungen und viele andere Quantenzahlen eingeführt, deren unterschiedliche diskrete Einstellungen die Teilchen klassifizieren.

In der Quantenmechanik geht es nicht mehr um exakte Aussagen über ein System, sondern es werden Wahrscheinlichkeiten für physikalische Prozesse berechnet. Grundlage für solche Berechnungen ist ein Prinzip, mit dem sich schon die Newtonsche Mechanik herleiten läßt: das Hamiltonsche Variationsprinzip. Dieses Prinzip besagt, daß sich jedes System so verhält, daß seine Lagrange-Funktion, also die Differenz aus kinetischer und potentieller Energie, unter Berücksichtigung von Randbedingungen, minimal wird.

Während die Quantenmechanik das Werk vieler Physiker war, wurde die zweite große physikalische Theorie dieses Jahrhunderts – die spezielle Relativitätstheorie – von Einstein praktisch im Alleingang entwickelt. Zwei Einsichten lassen sich wohl als Grundsteine dieser Theorie ansehen:

- (i) Jedes Inertialsystem (also alle Bezugssysteme, die sich gleichförmig gegeneinander bewegen) ist gleichberechtigt, was Beobachtung und Beschreibung physikalischer Gesetze angeht.
- (ii) Die Lichtgeschwindigkeit im leeren Raum ist eine Konstante.

Der erste Punkt ist ein schon von Galilei im 17. Jahrhundert formuliertes Relativitätsprinzip, auf die Lichtausbreitung ausgedehnt und damit die Ablehnung des Äthers. Der Äther sollte das Ausbreitungsmedium des Lichts sein, wurde jedoch schon 1881 durch Michelsons Experiment <sup>2</sup> ausgeschlossen.

Aus der speziellen Relativitätstheorie folgen einige erstaunliche physikalische Effekte, wie z.B. die Zeitdilatation (die Tatsache, daß die Zeit in bewegten Systemen langsamer läuft) und die relativistische Massenzunahme:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad . \quad \begin{array}{l} m_0 = \text{Masse des Teilchens in Ruhe} \\ v = \text{Geschwindigkeit des Teilchens} \\ c = \text{Lichtgeschwindigkeit} \end{array}$$

Eine Taylorentwicklung der Wurzel nach  $v^2$  und anschließende Multiplikation mit  $c^2$  ergibt:

$$m c^2 = m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2 + \dots \quad .$$

---

<sup>2</sup> Michelson hatte untersucht, ob sich Licht senkrecht zur Erdrotation mit anderer Geschwindigkeit fortpflanzt als Licht parallel dazu, und stellte wider Erwarten die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit fest.

Der zweite Term ist die klassische kinetische Energie, während der erste die mit der Masse selbst verbundene Energie angibt. Der ganze Ausdruck steht für die Gesamtenergie. Diese Formel ist der Ursprung für die wohl berühmteste Formel der Physik:

$$E = mc^2$$

Ebenso läßt sich der Zusammenhang zwischen Impuls ( $p = mv$ ), Ruheenergie ( $E_0 = m_0 c^2$ ) und Gesamtenergie eines Teilchens herleiten:

$$E^2 = m_0^2 c^4 + p^2 c^2$$

## 1.2 Konzepte der Teilchenphysik

Das Hauptanliegen der Teilchenphysik besteht darin, mittels weniger elementarer Bausteine und ihrer fundamentalen Wechselwirkungen die Welt in ihrer Vielfalt und Komplexität zu erklären.

Seit ca. 25 Jahren existiert das sogenannte Standardmodell. Demnach besteht alle Materie aus Fermionen, die sich in drei Familien aufteilen lassen (siehe Bild 2).

		Three Generations of Matter (Fermions)			Force Carriers (Gauge Bosons)	
		I	II	III		
Q u a r k s	Up $+2/3$	Charm $+2/3$	Top $+2/3$	Photon 0	Electro- magnetism	
	<b>u</b> $3$	<b>c</b> $3$	<b>t</b> $3$	<b><math>\gamma</math></b> $0$		
	2-8	1000-1600	180000			
L e p t o n s	Down $-1/3$	Strange $-1/3$	Bottom $-1/3$	Gluon 0	Strong Interactions	
	<b>d</b> $3$	<b>s</b> $3$	<b>b</b> $3$	<b>g</b> $8$		
	5-15	100-300	$\sim 4500$	$0$		
	Electron 0 Neutrino	Muon 0 Neutrino	Tau 0 Neutrino	Z zero 0	Weak Interactions	
<b><math>\nu_e</math></b> $0$	<b><math>\nu_\mu</math></b> $0$	<b><math>\nu_\tau</math></b> $0$	<b>Z</b> $0$			
$<.0000070$	$<.27$	$<31$	91187			
	Electron -1	Muon -1	Tau -1	W plus $\pm 1$ minus $\pm 1$		
<b>e</b> $3$	<b><math>\mu</math></b> $3$	<b><math>\tau</math></b> $3$	<b>W</b> $3$			
	.511	105.66	1777.1	80220		

Bild 2 Das Standardmodell

Drei verschiedene Arten der Wechselwirkungen zwischen Materie werden beschrieben: die elektromagnetische, die schwache und die starke Wechselwirkung; die vierte und schwächste Kraft – die Gravitation – entzieht sich noch einer einheitlichen Beschreibung. Teilchen, die der starken Wechselwirkung unterliegen, heißen Hadronen; sie bestehen aus Quarks. Teilchen, die nicht an der starken Wechselwirkung teilnehmen, nennt man Leptonen. Es gibt drei Leptonen (Elektron, Myon, Tauon), die die Familien (engl.: generations) benennen, und jeweils ein zugehöriges Neutrino. Pro Familie gibt es noch zwei Quarks. Zu allen Teilchen existiert zudem ein Antiteilchen, das gleiche Masse, Lebensdauer und gleichen Spin hat, dessen andere Quantenzahlen wie Ladung, magnetisches Moment usw. aber sämtlich den entgegengesetzten Zahlenwert haben. Zu jeder Wechselwirkung kennt das Standardmodell ein Austauscheteilchen (engl.: force carriers). Es handelt sich dabei jeweils um Teilchen mit ganzzahligem Spin (Bosonen). Die insgesamt vier Wechselwirkungen lassen sich phänomenologisch wie folgt beschreiben [Kla95]:

- a) Die Gravitation ist an die Masse gekoppelt. Sie ist im Vergleich zu den anderen Kräften so klein (vgl. Bild 3), daß sie im Reich der Elementarteilchen meistens vernachlässigt werden kann. Da sie aber eine unendliche Reichweite hat, spielt sie in der Kosmologie eine entscheidende Rolle. Es gibt bis heute weder eine Quantentheorie der Gravitation, noch einen experimentellen Hinweis auf das Austauscheteilchen, das Graviton.
- b) Die elektromagnetische Wechselwirkung koppelt an die elektrische Ladung eines Teilchens. Sie wird erfolgreich durch die Quantenelektrodynamik (QED) beschrieben. Das Austauscheteilchen ist das Photon.
- c) Die starke Wechselwirkung bewirkt den Zusammenhalt von Nukleonen (Protonen und Neutronen) im Atomkern und von Quarks in den Nukleonen. In Analogie zur schwachen Kraft nennt man die Quantenzahl, an die die starke Kraft koppelt, Farbladung (meist rot, grün und blau genannt) und die beschreibende Theorie Quantenchromodynamik (QCD), deren Quant/Austauschteilchen das Gluon ist. Die starke Wechselwirkung hat eine sehr kurze Reichweite ( $\approx$  Kerndurchmesser) und nimmt zu kleinen Abständen hin gegen 0 ab (asymptotische Freiheit). Das ist der Grund dafür, daß Quarks nur in gebundenen Zuständen existieren (quark-confinement).
- d) Nach der Gravitation ist die schwache Kraft die universellste Wechselwirkung, weil sie auf alle Fermionen wirkt. Zwei ihrer insgesamt drei Feldquanten ( $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ ) tragen

Ladungen, sodaß sie die Ladungen der beteiligten Teilchen zu verändern vermag. Ebenso ist eine Veränderung des Quarktyps (engl.: flavour; down, up, strange usw.) möglich. Sie ist u.a. für den  $\beta$ -Zerfall verantwortlich, bei dem z.B. ein Neutron spontan in ein Proton, ein Elektron und ein Antineutrino zerfällt. Ihre Reichweite ist extrem gering ( $< 10^{-18}$  m) und ihre extrem geringe Stärke ist der Grund dafür, daß Neutrinos aus dem Weltall in den meisten Fällen die Erde durchfliegen, ohne ein einziges Mal zu wechselwirken.

Kraft	Reichweite	Stärke	Boson	Wirkungsbereich
Schwerkraft	$\hat{1}$	$G \textcircled{5} 6 \blacksquare 10^{-39}$	Graviton	alle Teilchen
Schwache Kraft	$< 10^{-18}\text{m}$	$G_F \textcircled{5} 10^{-5}$	$W^+, W^-, Z^0$	Leptonen, Hadronen
Elektromagnetismus	$\hat{1}$	$\alpha = 1/137$	$\gamma$	geladene Teilchen
Starke Kraft	$\textcircled{5} 10^{-15}\text{m}$	$g^2 \textcircled{5} 1$	Gluon	Hadronen

**Bild 3** Vergleich der fundamentalen Wechselwirkungen

Bisher werden also vier Theorien gebraucht, um die vier Grundkräfte zu beschreiben. Das Ziel der Teilchenphysiker ist es jedoch, eine übergreifende Theorie zu formulieren, die bislang unbekannte Zusammenhänge der Wechselwirkungen erkennen läßt und gleichzeitig die Unterschiede zu erklären vermag. Seit ca. 30 Jahren gibt es für die elektromagnetische und die schwache Kraft eine gemeinsame Theorie: die Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung von Glashow, Weinberg und Salam. Es zeigte sich, daß die Theorien (auch die der starken Kraft) die gleiche Struktur aufweisen: sie setzen die Eigenschaften der Kräfte mit Symmetrien in der Natur in Beziehung.

Der Symmetriebegriff stammt eigentlich aus der Geometrie. Die Symmetrie eines regelmäßigen Sechsecks z.B. läßt sich durch die Drehungen beschreiben, die es nicht verändern. So erkennt man, daß jede Drehung um  $60^\circ$  um eine Achse durch den Mittelpunkt diese Bedingung erfüllt. In anderen Worten: Das Sechseck ist invariant gegenüber Drehungen um  $60^\circ$ . Ein Quadrat ist invariant gegen Drehungen um  $90^\circ$ , und ein Kreis ist

gegen alle Drehungen invariant, er besitzt die höchste Symmetrie. Drehungen lassen sich durch mathematische Transformationen (Matrizen) beschreiben, und auf jede Transformation lassen sich Symmetriebetrachtungen anwenden – auch ohne geometrische Bedeutung.

In der Physik soll die Lagrangefunktion, die die Wechselwirkungen von Teilchen (bzw. deren Wellenfunktionen) beschreibt, invariant bleiben gegen Transformationen, welche die Erhaltungssätze der Natur widerspiegeln (Den mathematischen Beweis für den Zusammenhang zwischen Symmetrie und Erhaltungssatz in der klassischen Mechanik hat Emmy Noether 1918 erbracht.). So folgt z.B. aus der Invarianz der Lagrangefunktion gegenüber Drehungen der Drehimpulserhaltungssatz, und aus der Invarianz gegen Phasenverschiebungen in der Wellenfunktion eines geladenen Teilchens erhält man die Erhaltung der elektrischen Ladung.

Um nun verschiedene Theorien in einem gemeinsamen Modell zu beschreiben, ist das Konzept der Symmetriebrechung wichtig. Anschaulich wird dieses erneut durch eine geometrische Analogie: Ein Regentropfen ist kugelsymmetrisch, alle Raumrichtungen sind gleichberechtigt. Wenn der Tropfen gefriert und eine Schneeflocke bildet, wird diese Kugelsymmetrie gebrochen. Die Symmetrie der Schneeflocke ist zwar reizvoll, aber nicht vollkommen, da diese nicht in alle Richtungen gleich aussieht, oder nicht mehr um alle Winkel ohne Veränderung gedreht werden kann. Die Schneeflocke ist nur noch invariant gegen ausgesuchte Transformationen. Schmilzt sie, kommt die vollständige Symmetrie wieder zum Vorschein. Die Physiker glauben, einen ähnlichen "Schmelzprozeß" im Verhalten der Elementarteilchen entdecken zu können. Es scheint, daß die elektromagnetische, die schwache und die starke Wechselwirkung bei hohen Energien gleich stark sind und ihre Symmetrie nach dem Urknall, der nach einhelliger Meinung der Physiker den Beginn unseres Universums dargestellt hat, gleichsam eingefroren ist, sodaß sie bei den heute im Weltall vorherrschenden Energien unterschiedliche Stärke und verschieden schwere Austauschteilchen besitzen.

Mathematische Konzepte, die eine Vereinigung der drei Theorien vorhersagen und zu erklären versuchen, faßt man unter dem Sammelbegriff "Große Vereinheitlichte Theorien" (engl.: Grand Unified Theories; abgek. GUTs) zusammen. GUTs gehen von masselosen Austauschteilchen aus, die unter bestimmten Bedingungen aber Masse erhalten, wie z.B.  $W^+$ ,  $W^-$  und  $Z^0$ , die Mittlerteilchen der schwachen Wechselwirkung. Ein dieses leistender Mechanismus – die spontane Symmetriebrechung –, der von Higgs 1964 ins Gespräch



gebracht wurde, muß ein neues Teilchen postulieren: das Higgs-Boson (Genaugenommen fordert die Theorie vier Higgs-Bosonen, von denen aber nur eins experimentell beobachtbar sein soll.) [t'Ho95].

Eines der wichtigsten Ziele des LHC (Large Hadron Collider) am CERN, dem europäischen Zentrum für Teilchenphysik, ist der Nachweis des Higgs-Bosons.

### **1.3 Die Suche nach dem Higgs-Boson**

Das schwere Higgs-Teilchen kann auf viele verschiedene Weisen zerfallen, am häufigsten in schwere Eichbosonen und Quark-Paare.

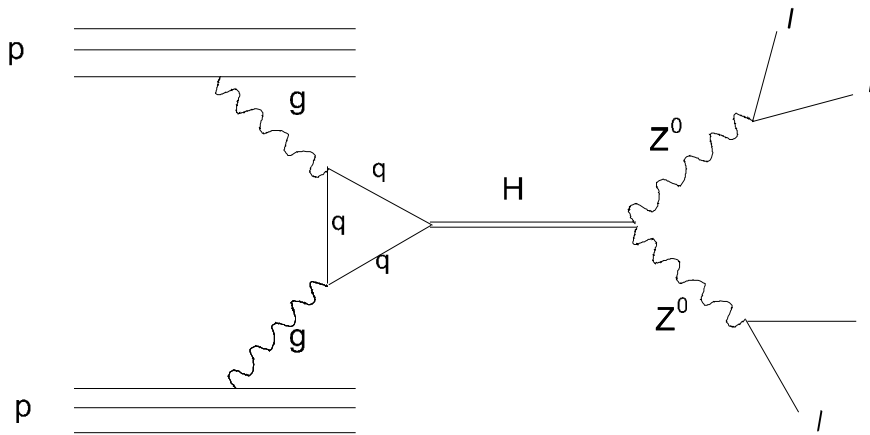
- (i) Der experimentell am leichtesten nachzuweisende Zerfall hat vier Leptonen im Endzustand:

$$H \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow 4l \quad \text{bei } 180 \text{ GeV} < M_{\text{Higgs}} < 800 \text{ GeV} .$$

(mit  $4l = e^+ e^- e^+ e^- , e^+ e^- \mu^+ \mu^- , \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$ )

Offensichtlich ist dieser Zerfall nur möglich, falls das Higgs-Teilchen mindestens doppelt so schwer wie zwei  $Z^0$  ist; für sehr hohe Higgs-Massen ist die Rate für einen Nachweis zu gering.

Bild 4a zeigt ein Feynman-Diagramm dieses Zerfalls, der auch "Goldener Zerfallskanal" genannt wird.



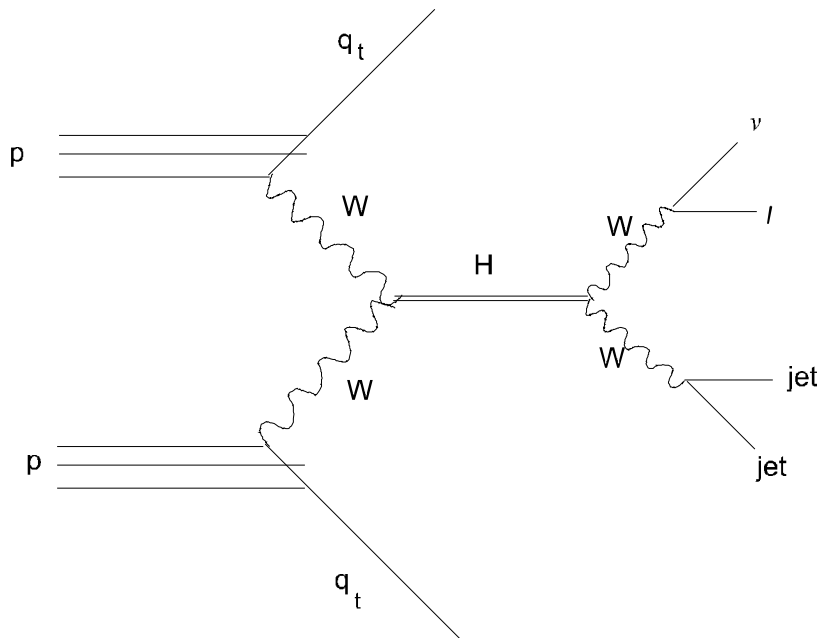
**Bild 4a** Entstehung und Zerfall eines Higgs-Teilchens im Feynman-Diagramm

- (ii) Für Higgsmassen größer als 800 GeV werden folgende Zerfälle herangezogen:

$$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu \text{ jet jet} + 2 \text{ Vorwärtsjets}$$

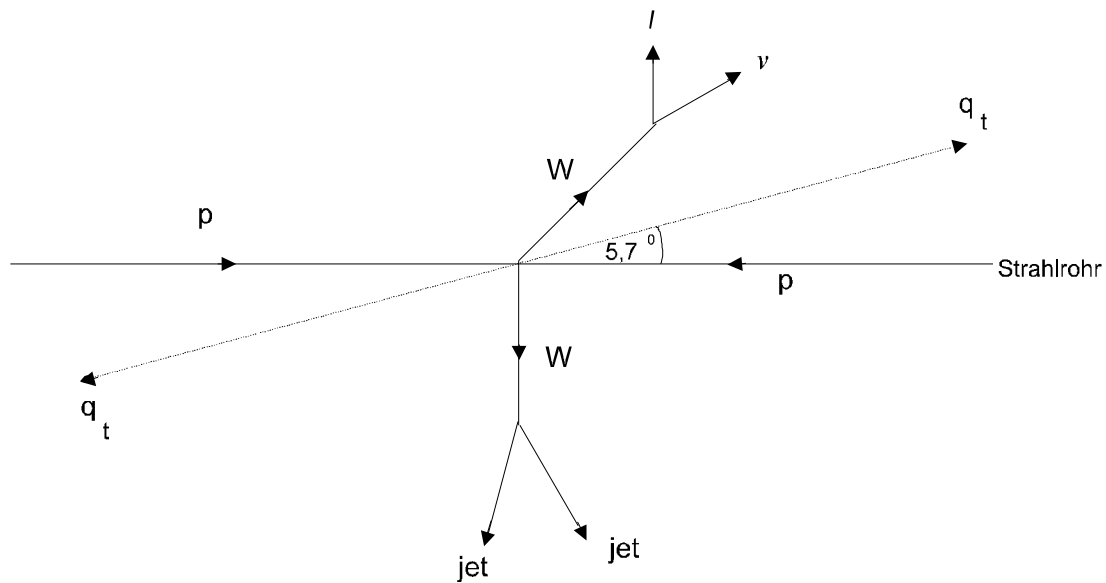
$$H \rightarrow ZZ \rightarrow ll \text{ jet jet} + 2 \text{ Vorwärtsjets}$$

Bild 4b zeigt die Entstehung und den Zerfall des Higgs in W–Paare im Feynman–Diagramm.



**Bild 4b** Entstehung und Zerfall eines Higgs–Teilchens im Feynman–Diagramm

Dieser Zerfall ist besonders wichtig, weil er sich anhand der im Diagramm mit  $q_t$  bezeichneten Vorwärtsjets identifizieren läßt. Sie bilden mit dem Protonen–strahl im Mittel einen Winkel von  $5,7^\circ$  und verlassen noch innerhalb des Detektors das Strahlrohr. Daher wird bei diesen Zerfallskanälen eine vollständige Überdeckung des Vorwärts– und Rückwärtsbereichs mit Kalorimetern benötigt. Hier zeigt sich die große Bedeutung des HEC. Bild 5 zeigt schematisch die Teilchenbahnen bezüglich des Strahlrohrs.



**Bild 5** Schema der Teilchenbahnen im Detektor

Darüberhinaus können mit ATLAS Voraussagen der Minimalen Supersymmetrischen Erweiterung des Standardmodells (MSSM), welche u.a. fünf Higgsteilchen ( $A$ ,  $H^\pm$ ,  $H$ ,  $h$ ) voraussagt, überprüft werden.

Ebenfalls kann das Auffinden von supersymmetrischen Partnern (Sfermionen, Bosinos) aus supersymmetrischen Erweiterungen des Standardmodells (SUSY) viel zur Konsistenz solcher Theorien beitragen.

Schließlich soll noch erwähnt werden, daß ATLAS sensitiv auf die bislang noch nicht gefundene CP-Verletzung bei B-Mesonen ist und diese mit hoher Genauigkeit untersuchen kann [CERN94].

## 2 Teilchendetektoren

Die Auflösung eines Mikroskops ist durch die Wellenlänge der benutzten "Sonden" begrenzt. Sind die Strukturen, die man mit einem herkömmlichen Lichtmikroskop sichtbar machen möchte, kleiner als die Wellenlänge des Lichts, kann man sich eines Ultraviolett- oder schließlich eines Elektronenmikroskops bedienen. Ähnlich gehen die Physiker vor, indem sie Teilchen auf immer höhere Energien beschleunigen und so deren Wellenlänge verkleinern um immer kleinere Objekte (Atome  $\rightarrow$  Atomkerne  $\rightarrow$  Nukleonen  $\rightarrow$ ...) aufzulösen. Vergleicht man die Auflösung eines Lichtmikroskops von  $\approx 0,5 \mu\text{m}$  mit der Auflösung, die in Beschleunigern erreichbar ist ( $\approx 10^{-19}\text{m}$ ), so stellt man eine Verbesserung um einen Faktor  $10^{13}$  fest [Gru93].

Neben den Sonden werden Meßgeräte benötigt, die Informationen über die beobachteten Objekte sammeln. Beim Lichtmikroskop übernimmt diese Aufgabe meistens das menschliche Auge. In der Teilchenphysik wurden zu diesem Zweck viele spezielle Detektoren entwickelt. Einige dieser Meßgeräte sollen in diesem Kapitel dargestellt werden am Beispiel des ATLAS-Detektors (**A** Toroidal LHC **A**pparatu**S**), der aus vielen Subdetektoren besteht.

ATLAS umschließt einen von drei Wechselwirkungspunkten des großen Hadronbeschleunigers LHC am CERN, der Protonen und Antiprotonen in einem 27 km langen ringförmigen Strahlrohr entgegengesetzt auf Schwerpunktsenergien von bis zu 14 TeV beschleunigt und zur Kollision bringt. Bild 6 zeigt ATLAS und seine Subdetektoren.

Der Aufbau von ATLAS soll gewährleisten, daß die entstehenden Teilchen möglichst verlustfrei und mit hoher Genauigkeit nachgewiesen werden können. Die Detektoren müssen deshalb den Wechselwirkungspunkt gut umschließen. Sie sind daher angeordnet in einem zylinderförmigen Mittelteil (Barrel) und den beiden Endkappen.

Der innere Teil muß aufgrund der hohen Teilchendichte sehr strahlungshart sein. Durch einen Solenoidmagnet wird im inneren Bereich ein Magnetfeld parallel zum Strahlrohr erzeugt, sodaß geladene Teilchen senkrecht zu ihrer Bewegungsrichtung abgelenkt werden.

Zur Rekonstruktion ihrer Spuren werden Siliziumstreifen-, Pixel- und Übergangsstrahlungsdetektoren verwendet. Damit sind Vertex- und Impulsbestimmung der Teilchen möglich.

Der innere Detektor wird von Kalorimetern umschlossen. Mit Ausnahme des hadronischen Ziegel- (Tile-) Kalorimeters, welches Szintillatorplatten als aktives Medium enthält, hat man sich bei allen Kalorimetern für Flüssigargon als Detektormedium entschieden.

Im Barrel befindet sich ein elektromagnetisches "Akkordeon"-Kalorimeter, das aus mit Edelstahl überzogenen Bleiabsorberplatten besteht. In den Endkappen befinden sich das elektromagnetische, das hadronische und – in der Mitte um das Strahlrohr – das Vorwärtskalorimeter (vgl Bild 8).

Juergenseite12.ps

**Bild 6** Dreidimensionale Sicht des ATLAS–Detektors

## 2.1 Einige Detektortypen

### *Detektoren zur Orts- und Ionisationsmessung*

Die meisten Detektoren nutzen die ionisierende Wirkung von Teilchen, die ein Medium durchqueren. Zwei der ältesten Detektoren zur Orts- und Ionisationsmessung sind die Nebelkammer (Wilson-Kammer) und die Blasenkammer [Gru93].

Bei der Blasenkammer wird ein Flüssiggas ( $H_2$ ,  $D_2$ , Ne, Ar ...) in einem Druckbehälter nahe dem Siedepunkt gehalten. Vor dem Durchgang von Teilchen wird das Kammervolumen mittels eines Kolbens vergrößert und dadurch die Siedetemperatur überschritten. Die von den durchgehenden Teilchen längs ihres Weges erzeugten positiven Ionen bilden dabei Keime für die Blasenbildung. Die Blasenspur wird durch Blitze erleuchtet und fotografiert (Ortsauflösung im Bereich  $20\ \mu\text{m}$ ).



**Bild 7** Blasenkammeraufnahme eines Pions, das von links eintritt und zwei ungeladene Teilchen erzeugt, die keine Spur hinterlassen und nach unterschiedlichen Wegstrecken in jeweils zwei geladene Teilchen zerfallen



Der Vorteil der Nebelkammer ist, daß sie durch einen Teilchendurchgang getriggert werden kann. In ihr befindet sich ein Gas–Dampf–Gemisch (z.B. Argon–Alkohol) beim Sättigungsdampfdruck. Die relativ lange Lebensdauer der gebildeten Ionen erlaubt eine Triggerung durch das zu detektierende Teilchen nach seinem Durchgang. Die ausgelöste schnelle Expansion bewirkt eine Kondensation des Dampfes an den Ionen und die Tröpfchenspur kann photographiert werden. Die langen Totzeiten zwischen zwei Zyklen (1–10 Minuten) stellen jedoch einen Nachteil dar.

Blasen– und Nebelkammern werden heute nicht mehr verwendet, da sie nicht mit hohen Teilchenraten betrieben werden können<sup>3</sup>. Stattdessen werden oft elektrische Signale ausgenutzt, die beim Durchgang von Teilchen durch ein Medium entstehen.

Den einfachsten Typ einer Ionisationskammer stellt ein Plattenkondensator dar, zwischen dessen Platten eine Spannung von einigen Kilovolt anliegt. Ionisierende Teilchen erzeugen beim Durchgang durch den Detektor Elektronen–Ionen–Paare ( $e^-/Ionen\text{-}Paare$ ) längs ihres Weges. Die Ladungsträger – besonders die viel beweglicheren Elektronen – driften in Richtung der Platten und influenzieren dabei auf diesen eine Ladung, die über einen Arbeitswiderstand abfließt und einen Spannungsimpuls erzeugt. Dieser wird verstärkt und gemessen. Wird ein Teilchen vollständig innerhalb der Kammer abgebremst, läßt sich über die Bethe–Bloch–Formel die Gesamtenergie des Teilchen ermitteln<sup>4</sup>.

Eine besonders hohe Ladungsausbeute erhält man in Halbleiterzählern, die mit mikroskopischen Auslestreifen versehen sind und eine sehr gute Ortsauflösung im  $\mu\text{m}$ –Bereich bieten. Sie werden meist als Vertexdetektoren im inneren Detektor (vgl. Bild 6) eingesetzt.

Ionisationskammern, in denen eine Ladungsträgervermehrung durch sogenannte Gasverstärkung stattfindet, werden Proportionalkammern genannt. Die Elektronen werden im stark inhomogenen Feld des Anodendrahtes beschleunigt und bilden weitere  $e^-/Ionen\text{-}Paare$ ; es kommt zu einer Elektronenlawine in unmittelbarer Nähe des Drahtes, die einen Spannungspuls liefert, der über weite Bereiche der angelegten Spannung proportional zur Energie des Teilchens ist [Klei94; S.84].

Mit Erhöhung der Feldstärke werden immer mehr UV–Photonen beim Lawinenaufbau gebildet, die eine große freie Weglänge besitzen und an ganz anderen Orten im Zähler neue

<sup>3</sup> Die Nebelkammer läßt sich jedoch sehr gut in Schulversuchen verwenden und liefert in Verbindung mit einer Videokamera beeindruckende Bilder von Teilchenbahnen.

<sup>4</sup> Die meisten Ionisationskammern sind Zylinderkondensatoren mit Anodendraht und äußerer Kathode. Die im Strahlenschutzbereich benutzten Dosimeter nutzen das Prinzip der Ionisationskammer, jedoch so, daß die einmal geladene Kammer durch ionisierende Strahlung ihre Ladung, die jederzeit optisch bestimmt werden kann, verliert (Elektroskop).

$e^-$ /Ionen-Paare bilden können. In diesem Spannungsbereich arbeitet ein Geiger-Müller-Zählrohr, das Teilchen lediglich registriert ohne Energiemessung.

Das Prinzip der (zylindrischen) Ionisationskammer bildet die Grundlage für viele weitere Detektoren, z.B. Driftkammern und Time Projection Chambers. Solche Detektoren zeigen zwar keine bessere Ortsauflösung als die alte Blasenkammer, besitzen jedoch minimale Totzeiten ( $< 10^{-8}$  s) und können in fast beliebiger Geometrie um einen Wechselwirkungspunkt von Teilchen (Vertex) gebaut werden.

Juergenseite13.ps

**Bild 8** Die Kalorimetrie bei ATLAS

*Detektoren zur Energiemessung*

Bei hohen Energien ( $> 1$  GeV) erfolgt die Messung der Energie über kalorimetrische Verfahren. In elektromagnetischen Kalorimetern werden Photonen und Elektronen vermessen, in Hadronkalorimetern stark wechselwirkende Teilchen.

Für kleinere Energien (MeV) bieten Halbleiterzähler eine präzise Energie- und Ortsbestimmung<sup>5</sup>.

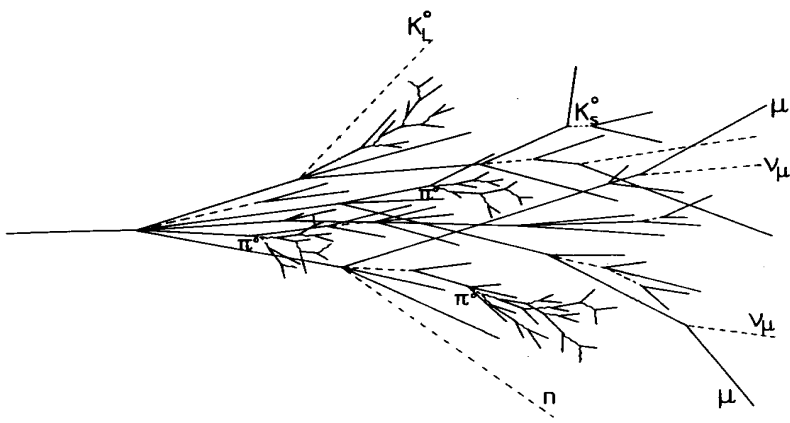
Die Wechselwirkung hochenergetischer Photonen und Elektronen mit Materie führt über  $e^+e^-$ -Paarbildung und Bremsstrahlung der Elektronen und Positronen zu einer Kaskade ("Schauer"). Dabei verlieren die Elektronen und Positronen ihre Energie im Feld der Atomkerne des Detektormediums durch Emission von Photonen (Bremsstrahlung), die bei ausreichender Energie wiederum  $e^+e^-$ -Paare bilden. Der Schauer bricht ab, wenn der Verlust durch Ionisation gleich demjenigen durch Bremsstrahlung wird. Zum Nachweis von elektromagnetischen Schauern können hintereinander angeordnete planare Ionisationskammern mit Flüssigargon (LAR) dienen, die durch Bleiplatten, in denen die Schauer entstehen, voneinander getrennt sind. Eine Kalorimeterstruktur aus alternierenden Detektor- und Absorberlagen nennt man Sampling-Kalorimeter.

Im Prinzip arbeiten Hadronkalorimeter auf die gleiche Art. Die Erzeugung der Sekundärteilchen erfolgt durch inelastische hadronische Prozesse, bei denen hauptsächlich Pionen, seltener Kaonen, Nukleonen und andere Hadronen erzeugt werden (Bild 9). Hadronkaskaden haben dabei eine größere longitudinale Ausdehnung, weshalb Hadronkalorimeter viel größer als elektromagnetische Schauerzähler sind (Bild 8).

Besonders in Hadronkalorimetern bleibt ein beträchtlicher Teil der Energie unsichtbar, was das Energieauflösungsvermögen deutlich schmälert. Zum einen werden ca. 20% der Gesamtenergie dazu aufgebracht, um Kernbindungen aufzubrechen, andererseits können viele der entstehenden Teilchen wie Neutronen, neutrale Kaonen und Neutrinos aus dem Kalorimeter entweichen. Die Myonen aus Pion- und Kaonzerfällen werden in einem zusätzlichen Detektor nachgewiesen (Bild 6).

---

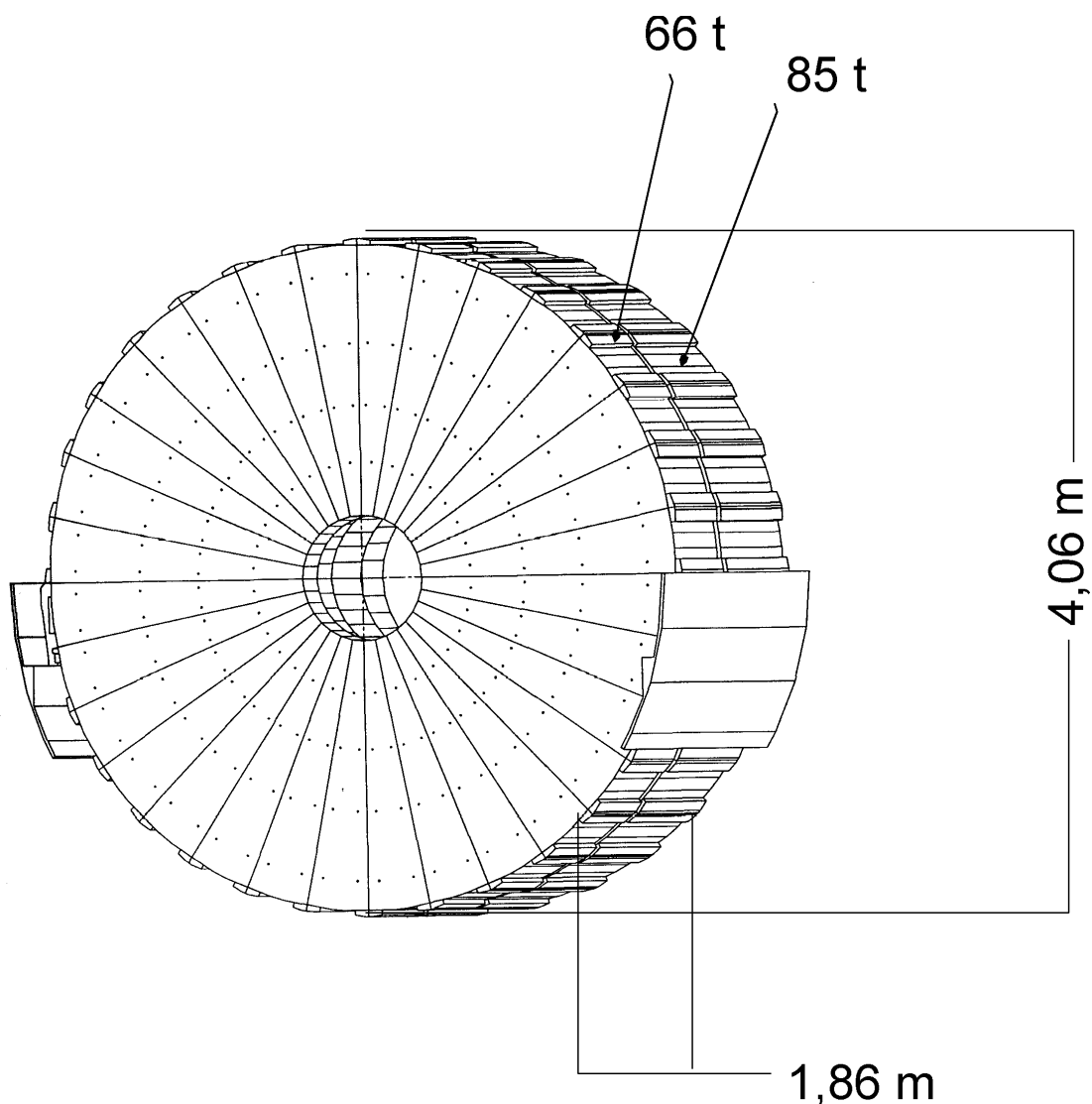
<sup>5</sup> Für den Haus- bzw. Schulgebrauch tut es auch eine Photodiode, bei der die Glasabdeckung entfernt ist, um auch  $\alpha$ -Teilchen detektieren zu können.



**Bild 9** Skizze einer Hadronkaskade in einem Absorber

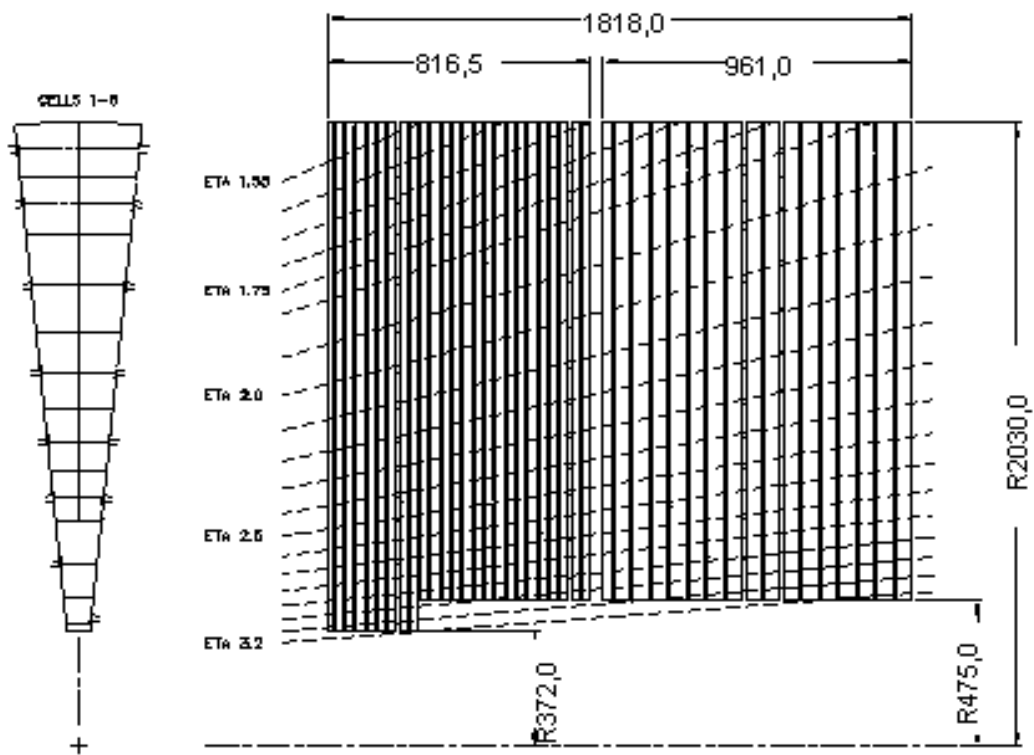
## 2.2 Das Hadronische Endkappenkalorimeter (HEC) im ATLAS-Detektor

Das HEC ist ein Flüssigargon-Sampling-Kalorimeter mit Kupferplattenabsorbern [LAr-TDR]. Diese Technik ist ausgewählt worden, weil sie ein einfaches mechanisches Design bei vergleichsweise geringen Kosten und außerdem hohe Strahlungshärte besitzt. Es besteht aus zwei Rädern mit jeweils 32 Modulen.

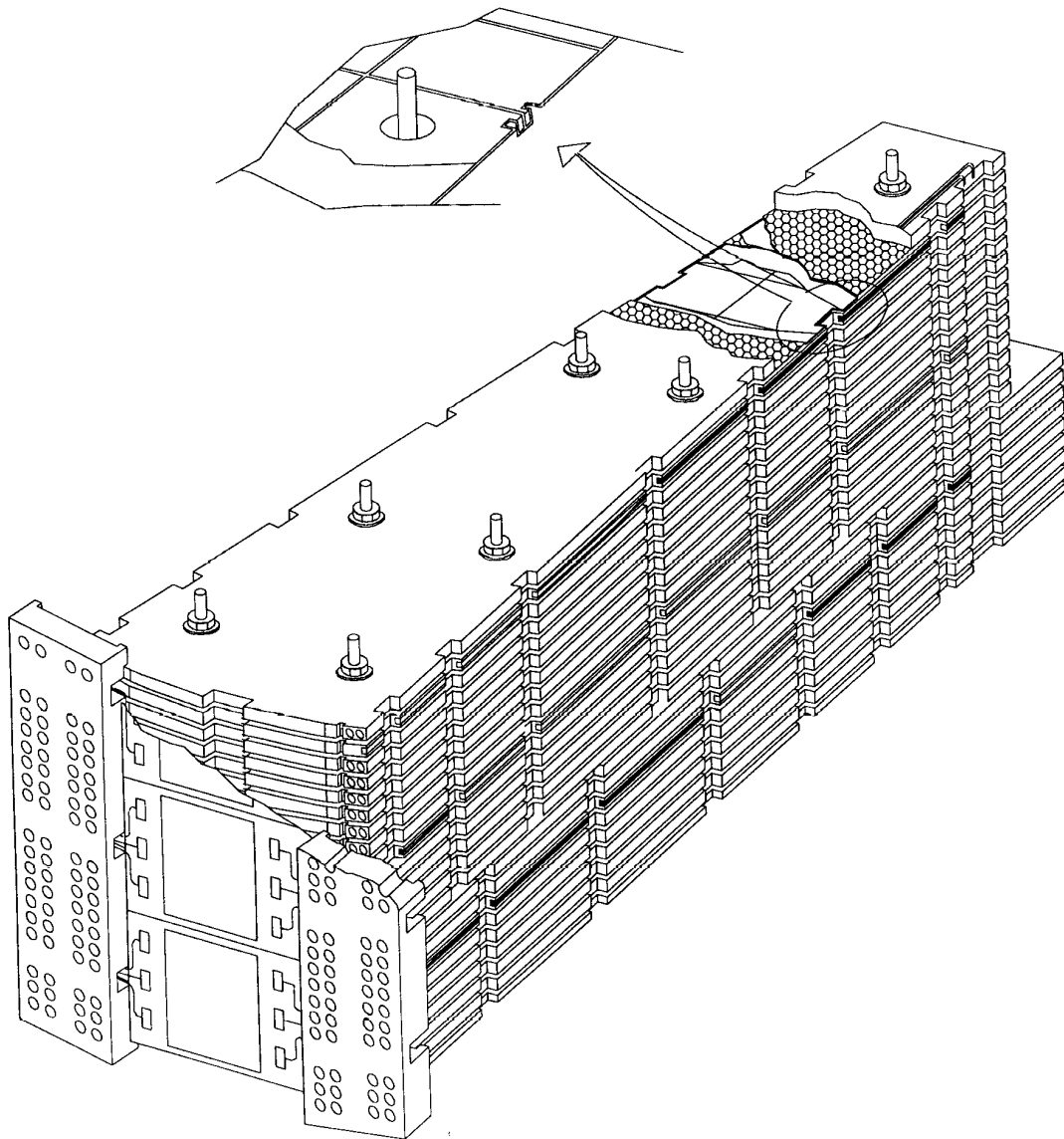


**Bild 10** Dreidimensionale Sicht des HEC

Jedes Modul des Frontrades hat 25 Kupferplatten und 24 Auslesezwischenräume; die Module des hinteren Rades haben 17 Kupferplatten und entsprechend 16 Auslesezwischenräume. Die Kupferplatten der Frontmodule sind 25 mm dick, die der hinteren 50 mm. Die Abstände zwischen den Kupferplatten sind auf 8,5 mm festgelegt worden. Hier werden Auslesestrukturen in 7 verschiedenen Designs eingebaut, mit der Anordnung 8/8/8 vorne und 4/4/4/4 hinten.



**Bild 11** Vorderansicht einer Ausleseelektrode und Seitenansicht des HEC

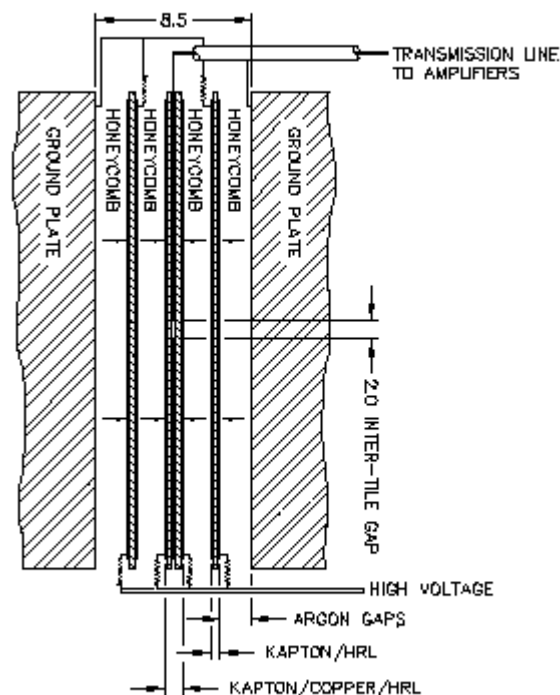


**Bild 12** "Tortenstück" aus vorderem und hinterem Modul

In den Auslesezwischenräumen befinden sich jeweils 3 Elektroden. Die Abstände zwischen den Elektroden und Kupferplatten werden mit honigwabenförmigen Matten aus Aramidfiber fixiert ("honeycomb") und die gesamten Module von 7 Stahlstäben zusammengehalten.



Jedes Modul besitzt seine eigenen Vorverstärker und Hochspannungsanschlüsse, die jeweils eine temperaturisolierende Verbindung nach außen haben müssen, da die Betriebstemperatur unterhalb der Siedetemperatur von Argon (ca.  $-186^{\circ}\text{C}$ ) liegen muß.

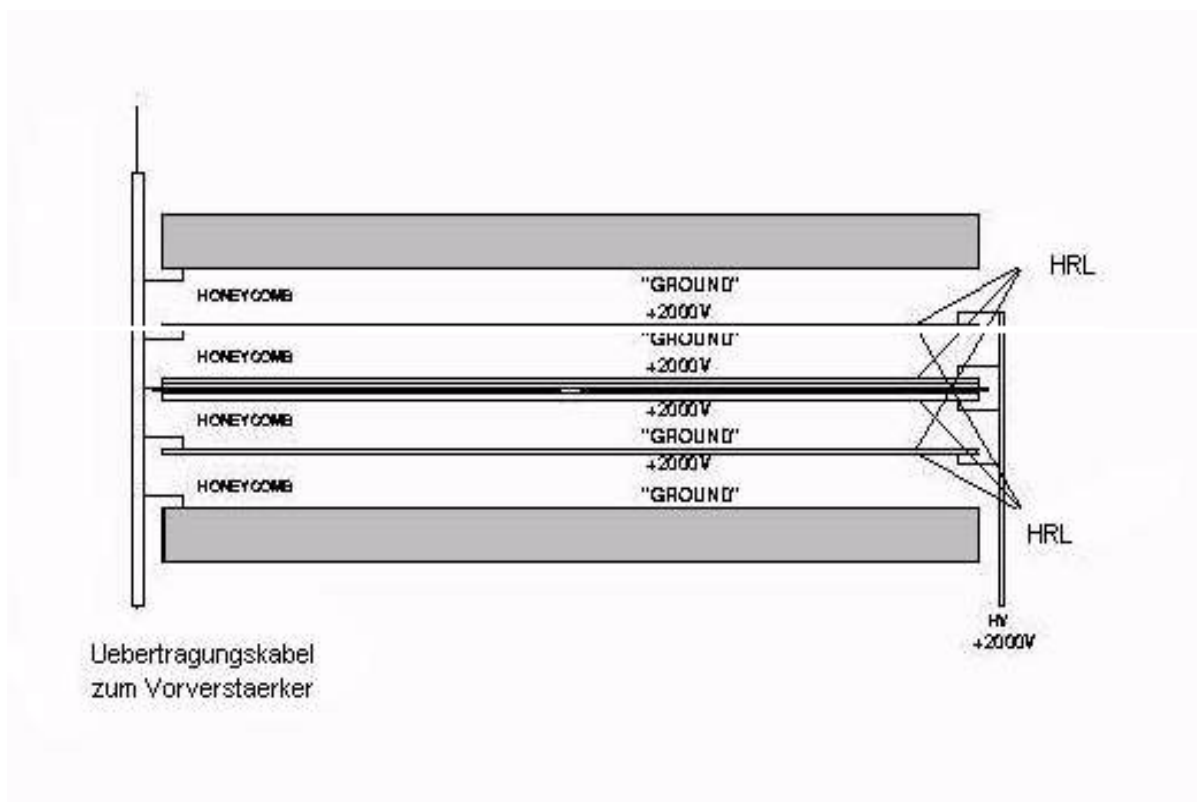


**Bild 13** Die Struktur der Auslesezwischenräume

Die drei Elektroden zwischen zwei Absorberplatten lassen sich in zwei Typen unterscheiden: eine zentrale Ausleseelektrode (engl.: read-out board, abgek. ROB), und zwei EST-Boards (von engl.: electrostatic transformer).

Das Prinzip des elektrostatischen Transformators beruht auf einer Serienschaltung von Kondensatoren und der damit verbundenen Reduzierung der Detektorkapazität. Diese

Reduzierung ermöglicht ein Angleichen an die Eingangskapazität der Vorverstärker, welche typischerweise im Bereich von pF liegt und optimiert das Signal/Rauschen-Verhältnis. Jedes EST-Board besteht aus einem Isolator (Polyimidfolie KAPTON der Firma DuPont), der beidseitig mit einer Hochwiderstandslage (engl.: high resistive layer, abgek. HRL) beschichtet ist, die einen Widerstand von  $1 \text{ M}\Omega/\text{square}$  auf der Seite der Kupferabsorber (an Hochspannung) und von  $0,5 \text{ M}\Omega/\text{square}$  zu den ROBs hin hat (auf Erdpotential). Deutlicher wird der Potentialverlauf in Bild 14.



**Bild 14** Zellstruktur mit elektrischen Potentialen

Es wurde darauf geachtet, daß zwischen jedem Spannungsgefälle mindestens zwei Lagen Isolator vorhanden sind, damit sich nicht ein Fehler im Polyimid (PI) durch den ganzen Isolator erstreckt und so einen Kurzschluß erzeugt.

Zu beachten ist auch noch, daß der Wärmeausdehnungskoeffizient der beteiligten Materialien sich nicht mehr als  $10^{-5}/\text{K}$  voneinander unterscheiden sollte [Fra96].