

# Spurrekonstruktion - Von der Blasenkammer bis zu Silizium-Pixel-Detektoren

Julius Krause

16 Dezember 2011

## Einführung

Teilchen können nicht direkt gemessen werden. In Detektoren wird daher die Wechselwirkung einzelner Teilchen an verschiedenen Punkten im Raum aufgezeichnet. Die Reichweite im Detektor, die Bahnkrümmung durch das Magnetfeld sowie die Lebensdauer, ermöglichen es anschließend ein Teilchen zu charakterisieren bzw. zu identifizieren. Um Zerfälle kurzlebiger Teilchen direkt nach einer Kollision zu entdecken ist es notwendig durch präzise Messung der Teilchenspur, die Herkunft eines Teilchens zu bestimmen. Der Vortrag behandelt die Erfassung der Teilchenspuren, Energiemessungen. Werden im Vortrag zu Kalorimetern erläutert.

## 1 Wechselwirkung des Teilchenstrahls mit Materie im Detektor

Jeder Detektor besteht aus einem Füllmaterial welches mit dem Teilchenstrahl in Wechselwirkung tritt. Je nach Konstruktionsprinzip handelt es sich dabei um ein Füllgas, eine Flüssigkeit oder wie bei Halbleitern um einen Festkörper. Gemeinsam für jedes Teilchen, dass mit dem Füllmaterial wechselwirkt, ist die Erzeugung von Ionen, diese werden anschließend detektiert. Man spricht daher auch von ionisierender Strahlung. Zusammengefasst wechselwirken die einzelnen Teilchen folgendermaßen mit der Materie:

- **Geladene Teilchen** - Wechselwirken über die EM - Wechselwirkung (Ionisation, Cherenkov-Licht, Übergangsstrahlung).
- **Photonen** - Wirken ab ca. 100 eV Ionisierend, je nach Energie (Photoeffekt, Comptoneffekt, Paarbildung).
- **Neutronen** - Starke Wechselwirkung mit Kernen, geladene Sekundärteilchen.
- **Neutrinos** - Schwache Wechselwirkung mit Kernen und Elektronen.

## 2 Kammerdetektoren

Diesen Detektoren sind mit einem Füllgas oder einer Flüssigkeit gefüllt, in diesem Medium werden die Ionen erzeugt. Anschließend werden die Ionen, die entlang der Spur gebildet wurden, auf unterschiedliche Art und Weise ausgewertet.

### 2.1 Detektoren mit optischer Auslesung

Detektoren mit einer optischen Auslesung eignen sich hervorragend um komplizierte Ereignisse darzustellen. Nachteil dieses Verfahrens ist jedoch eine sehr geringe Anzahl an Messungen wodurch eine anschließende statistische Auswertung ausgeschlossen ist. Darüber hinaus sind die Detektoren nicht Triggerbar und für eine kalorimetrische Messung zu klein.

#### 2.1.1 Blasenkammer

Die Blasenkammer ist eine Kammer gefüllt mit einer Flüssigkeit nahe dem Siedepunkt. Verwendet wird beispielsweise flüssiges  $H_2$ . Die verwendete Flüssigkeit wird in Abhängigkeit der zu messenden Ereignisse gewählt. Entscheidend ist hierbei die Strahlungslänge. Der Grund hierfür ist einfach nachvollziehbar: Geben die Teilchen nicht genügend Energie in der Kammer ab, kann das Ereignis nicht vollständig dargestellt werden - wird die gesamte Energie nach kurzer Zeit abgegeben, kann das Ereignis nicht aufgelöst werden. Das Funktionsprinzip der Kammer lässt sich einfach erläutern:

Ein Teilchendurchgang erzeugt Ionen, nun wird das Volumen durch die Expansion des Kolbens vergrößert. Die Flüssigkeit erreicht die Siedetemperatur und eine Blasenbildung setzt ein. Die Blasenbildung beginnt an Störstellen, in diesem Fall an den Ionen. Dieser Zustand wird fotografisch festgehalten. Anschließend dauert es eine Weile ehe die Kammer für ein neues Ereignis bereit ist.

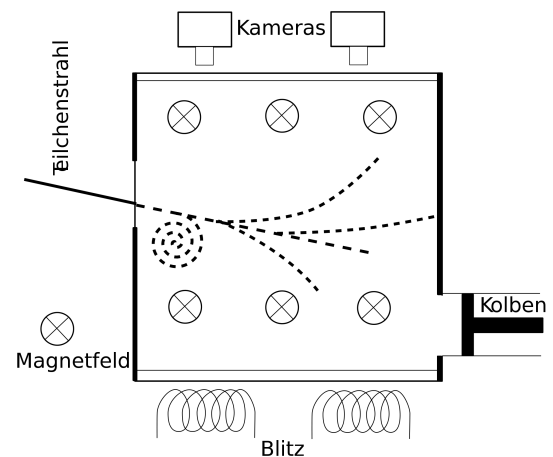


Abbildung 1: Blasenkammer[2]

Anhand eines Magnetfeldes, senkrecht zur Teilchenbahn, kann anschließend durch die Lorentzkraft eine Aussage über die Ladung/Impuls gemacht werden. Wird zusätzlich noch die Dicke der Teilchenbahn untersucht, diese ist proportional zum Energieverlust, kann der Impuls aufgelöst werden. Die Blasenkammer ermöglicht somit die Darstellung komplizierter Ereignisse sowie kalorimetrische Messungen. Teilchen mit höheren Energien können jedoch nicht mehr vollständig aufgelöst werden. Deshalb und aufgrund der fehlenden Triggermöglichkeiten gehört die Blasenkammer zu den historischen Spurdetektoren.

### 2.1.2 Nebelkammer

Die Nebelkammer basiert auf einem ähnlichen Konstruktionsprinzip wie die Blasen-kammer. Es wird jedoch statt einer Flüssigkeit eine mit einem Gas gefüllte Kammer verwendet, die dort auftretenden Strahlungslängen ermöglichen keine kalorimetri-schen Messungen. Grundprinzip der Nebelkammer ist ein Übersättigtes Luft-Gas-Gemisch in welchem sich nach einem Teilchendurchgang ausgehend von den Ionen eine Nebel-spur bildet. Vergleichbar mit den Kondensstreifen von Flugzeugen. Um ein Übersättigtes Luft-Gas-Gemisch zu erzeugen gibt es zwei Konstruktionsprinzipien:

- **Expansionsnebelkammer** Auch nach Ihrem Erfinder Charles Wilson benannt, erzeugt das ein Übersättigtes Gasmischung ähnlich wie die Blasen-kammer durch schnelle Expansion eines Kolbens der das Volumen vergrößert.
- **Diffusionsnebelkammer** Diese wird auch als kontinuierliche Nebelkammer be-zeichnet. Durch ein Temperaturgefälle innerhalb der Kammer wird dabei ein Be-reich erzeugt indem das Luft-Gas-Gemisch übersättigt ist.

Verwendet wird oftmals Alkohol oder Isopropanol welches schon bei Raumtempera-tur ausreichend verdunstet. Präzise Messungen sind in der Nebelkammer jedoch nicht möglich. Sie wird vorwiegend für Demonstrationszwecke verwendet. Hierbei können spektakuläre Nebelspuren allein durch die kosmische Strahlung erzeugt werden.

### 2.1.3 Funkenkammer

Die Funkenkammer ist aus Metallplatten aufgebaut, die Abwechselnd an einer Hoch-spannungsquelle bzw. auf Erdpotential, angeschlossen sind. Durchläuft ein ionisieren-des Teilchen die Funkenkammer wird die Hochspannungsquelle eingeschaltet. Das so entstehende elektrische Feld zwischen den Platten beschleunigt die nach dem Teilchen-durchgang entstandenen Ionen und Elektronen wodurch es an dieser Stelle zu einem Lawineneffekt mit anschließender Gasentladung kommt.

Diese Gasentladungen können ebenfalls fotogra-fisch festgehalten werden. Darüber hinaus gibt es noch die Möglichkeit durch Messdrähte ein Magnetfeld zu detektieren welches durch den Strom-fluss der Gasentladungen entstanden ist.

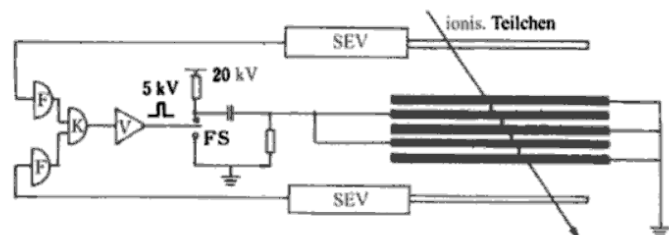


Abbildung 2: Funkenkammer [2]

### 2.1.4 Streamerkammer

Bei der Streamerkammer wird nach einem Teilchendurchlauf ein starkes elektrisches Feld senkrecht zur Teilchenbahn angelegt. Es kommt zu einem Lawineneffekt.

Nach kurzer Zeit wird das elektrische Feld abgeschaltet. Nun rekombinieren Elektronen und Ionen und es kommt zu kurzen Streamern. Diese können fotografisch festgehalten werden. In Abbildung 3 ist dieser Prozess über der Zeitachse zusammengefasst.

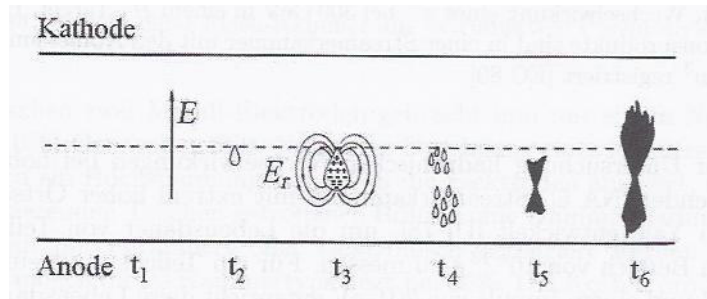


Abbildung 3: Streamerkammer [2]

Die Streamerkammer erzeugt sehr beeindruckende Bilder. Dennoch wird Sie nur noch zu Demonstrationszwecken verwendet.

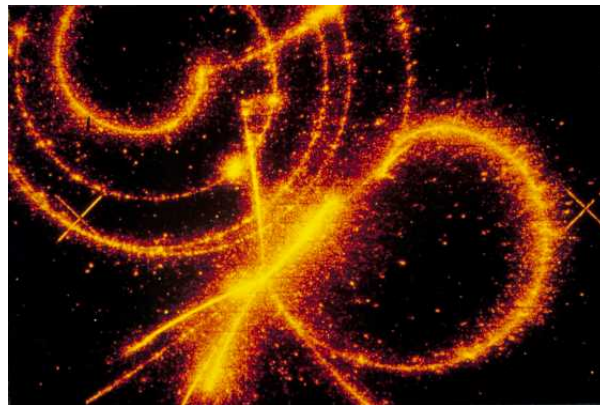


Abbildung 4: Streamerkammer - Aufnahme [1]

### 3 Drahtkammern

Drahtkammern sind die momentan gängigsten Spurdetektoren. Ihre Vorteile gegenüber den anderen Detektoren liegt in

- der elektrischen Auslesbarkeit,
- der Möglichkeit zu Triggern,
- der hohen Messrate durch eine kurze Totzeit,
- dem geringen Kostenumfang bezogen auf das Volumen.

Im Laufe der Zeit wurden verschiedenste Konstruktionsprinzipien entwickelt, nach der grundlegenden Einführung werden die wichtigsten beschrieben.

#### 3.1 Funktionsprinzip der Drahtkammern

Das Funktionsprinzip der Drahtkammern lässt sich ausgehend von dem bekannten Geiger-Müller-Zählrohr am besten beschreiben. Wir betrachten daher zunächst nur einen einzelnen Anodendraht zwischen den Kathoden. Ein durchlaufendes Teilchen erzeugt Ionen und setzt Elektronen frei. Die Anodenspannung liegt unter dem Geiger-Müller Bereich im sogenannten Proportionalbereich. Hier tritt eine Gasverstärkung, aber noch keine Gasentladung auf. Die Bezeichnung Proportionalbereich resultiert daraus, dass zwar durch Stöße zwar neue Ionen bzw. Elektronen erzeugt werden, nur nicht lawinenartig wodurch die am Anodendraht ankommende Ladungsmenge proportional zur Entfernung zum Teilchendurchgang ist.

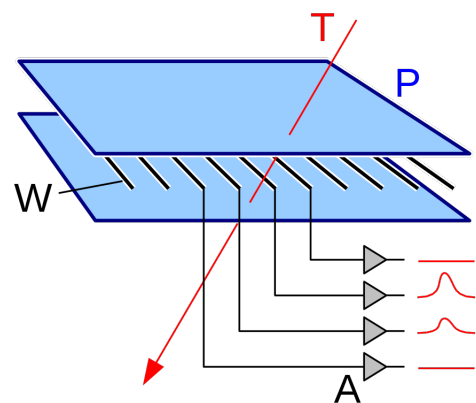


Abbildung 5: Vi drahtproportionaler Kammer [2]

Da die Menge der primär beim Teilchendurchgang erzeugten Elektronen-Ionen-Paare abhängig von der Energie des durchgehenden Teilchens ist kann mit nur einem Draht keine Entfernungsbestimmung durchgeführt werden. Um eine Ortsbestimmung durchführen zu können werden daher mehrere Drähte parallel angeordnet. Das Bild 5 zeigt diese Konfiguration inklusive einem Signal an den Anoden. Durch Berechnung des Ladungsschwerpunktes lässt sich der genaue Ort des Teilchendurchgangs in einer Dimension bestimmen. Für eine Auswertung in der zweiten Dimension werden diese Kammer gekreuzt aufeinander gesetzt. Es gibt weitere Techniken wie den Aufbau mit Kathodenauslese, nachdem diese in Streifen angeordnet werden. Durch eine größere Anzahl an Schichten kann schlussendlich auch die dritte Dimension gemessen werden. Genaueres folgt nun für die zylindrischen Drahtkammern.

## 3.2 zylindrische Drahtkammern

Um wie bei der Blaskammer beschrieben eine Aussage über die Ladung bzw. den Impuls eines Teilchens zu machen wird ein magnetisches Feld in Strahlrichtung erzeugt. Drahtkammern werden anschließend in einer zylindrischen Form um das Strahlrohr angebracht. Da sich das Prinzip einer zylindrischen Proportionalkammer aus der obigen Einführung ergibt sind an dieser Stelle nun zwei weitere grundlegende Typen erklärt.

### 3.2.1 zylindrische Driftkammer

Die Driftkammer unterscheidet sich in ihrem Aufbau nur wenig von der Proportionalkammer. Der wesentliche Unterschied zur Proportionalkammer liegt in dem einführen zusätzlicher Feldformenden Drähten. Hierdurch wird ein elektrisches Feld erzeugt in dem sich die Elektronen mit einer nahezu konstanten Driftgeschwindigkeit auf den Anodendraht zubewegen. Die Entfernung des Teilchendurchgangs zum Anodendraht lässt sich somit über die Zeitaufösung ermitteln. Die Driftkammer benötigt daher weniger Signaldrähte als die Proportionalkammer.

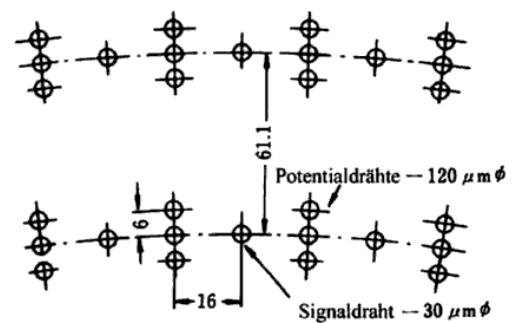


Abbildung 6: zylindrische Driftkammer

### 3.2.2 Zeitprojektionskammer

Die Zeitprojektionskammer unterscheidet sich im Aufbau grundlegend von den vorherigen Kammern. Im inneren der Kammer gibt es ein elektrisches Feld parallel zur Strahlrichtung, genau wie das B-Feld. Elektronen werden somit auf die Endkappen beschleunigt und dort von ebenen Proportionalkammern detektiert. Durch unterschiedlich lange Wegstrecken zu den Endkappen, ergibt sich eine Zeitdifferenz für das Auftreffen der einzelnen Teilchen. Daraus lässt sich die Herkunft der Teilchen im Raum bestimmen.

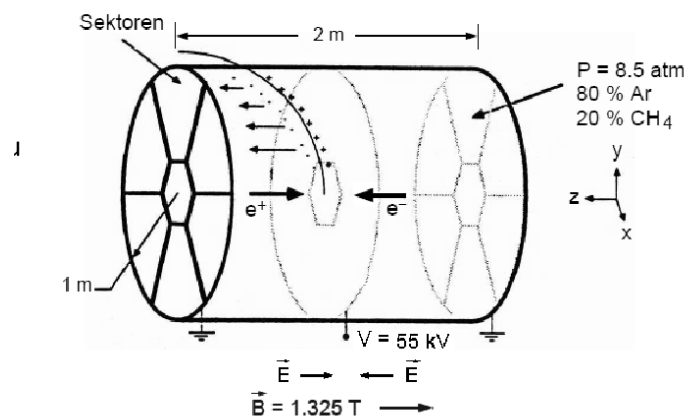


Abbildung 7: Zeitprojektionskammer[2]

In der Zeitprojektionskammer müssen keine Drähte gespannt werden. Dies ist als großer Vorteil zu werten, da andere Detektorgeometrien an diesem Punkt die größten Probleme haben. Neben den elektromagnetischen Kräften auf einzelne Drähte wirken auch noch mechanische Beanspruchungen, da die Drähte zur Positionierung gespannt werden müssen. Häufig sind daher Drähte im Betrieb des Detektors gerissen.

## 4 Halbleiterdetektoren

Halbleiterdetektoren können auch als Festkörperionisationskammern bezeichnet werden. Sie bestehen aus einem PN-Übergang. In der Grenzschicht rekombinieren Elektronen und Löcher durch Diffusion. Durch anlegen einer Spannung in Sperrrichtung wird diese, für die Teilchendetektion empfindliche, Zone vergrößert. Kommt es zu einem Teilchendurchgang durch den Halbleiter werden in der Grenzschicht neue Elektronen-Lochpaare erzeugt. Die angelegte Spannung saugt diese ab und es kann ein Stromfluss detektiert werden.

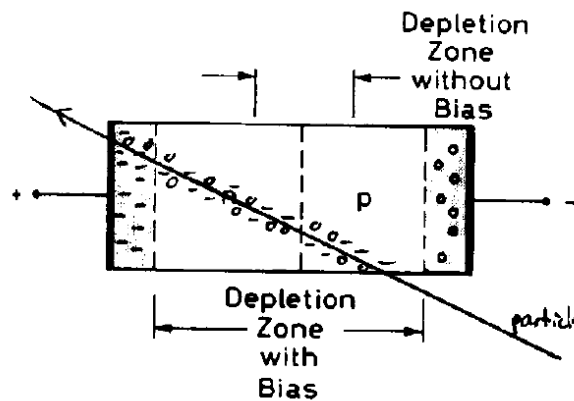


Abbildung 8: PN-Übergang mit Teilchendurchgang[2]

Ein Halbleiterdetektor ist aus vielen verschiedenen PN-Übergängen aufgebaut. Diese können streifenförmig oder als Pixel aufgebracht sein. Um beim Übergang zwischen Halbleiter und der Auswertungs-elektronik (Leiter aus Metall) eine sich aufbauende Sperrspannung (Schottky-Kontakt) zu vermeiden werden unterschiedlich hohe Dotierungen verwendet.

Halbleiterdetektoren ermöglichen eine sehr exakte Ortsbestimmung, sie werden an der innersten Schicht in einem Teilchendetektor verwendet. Halbleiterdetektoren ermöglichen es viele räumlich eng beieinander liegende Ereignisse zu erfassen. Im Laufe der Zeit treten jedoch Strahlenschäden auf, des Weiteren werden Teilchen durch die dichte Struktur stärker gestreut. Außerdem muss die Auswertungs-elektronik räumlich nah angebracht werden. Außerdem ist der Preis bezogen auf das Volumen teurer als bei den vorhergehenden Detektoren.

## 5 Zusammenfassung

Spurdetektoren wie die Nebelkammer finden sich nur noch zu Demonstrationszwecken in Museen o.ä. Moderne Teilchendetektoren, wie der CMS Detektor am LHC, besitzen zur Spurrekonstruktion in ihrer innersten Schicht Halbleiterdetektoren. Drahtkammern werden bei CMS eingesetzt um bei kalorimetrischen Messungen Teilchen nach dem Durchlaufen durch eine 'Bremschicht' zu detektieren. Dies würde mit Halbleiterdetektoren jeden Kostenrahmen sprengen. Insgesamt handelt es sich jedoch immer um ein und das selbe Prinzip, es werden Elektronen und Ionen erzeugt und anschließend eine Ladung, eine Spannung oder ein Strom gemessen.

## Literatur

[1] <http://www.hep.phy.cam.ac.uk/lester/teaching/SparkChamber/2009NovGall/DSCN4787.jpg>

[2] Konrad Kleinknecht, Detektoren für Teilchenstrahlung, Treubner, 2005

[3] Wikipedia

Zur Vorbereitung wurde außerdem noch das Buch 'Particle detectors / Claus Grupen; Boris Shwartz. - 2. ed. Cambridge University Press, 2008' sowie die Homepages des Cern und Desy verwendet.