

Detektorphysik

Eine kleine Einführung

Prof. Dr. Florian Bernlochner
florian.bernlochner@uni-bonn.de

UNIVERSITÄT **BONN**



Detektoren im Alltag

In unserem Alltag gibt es viele Teilchendetektoren:

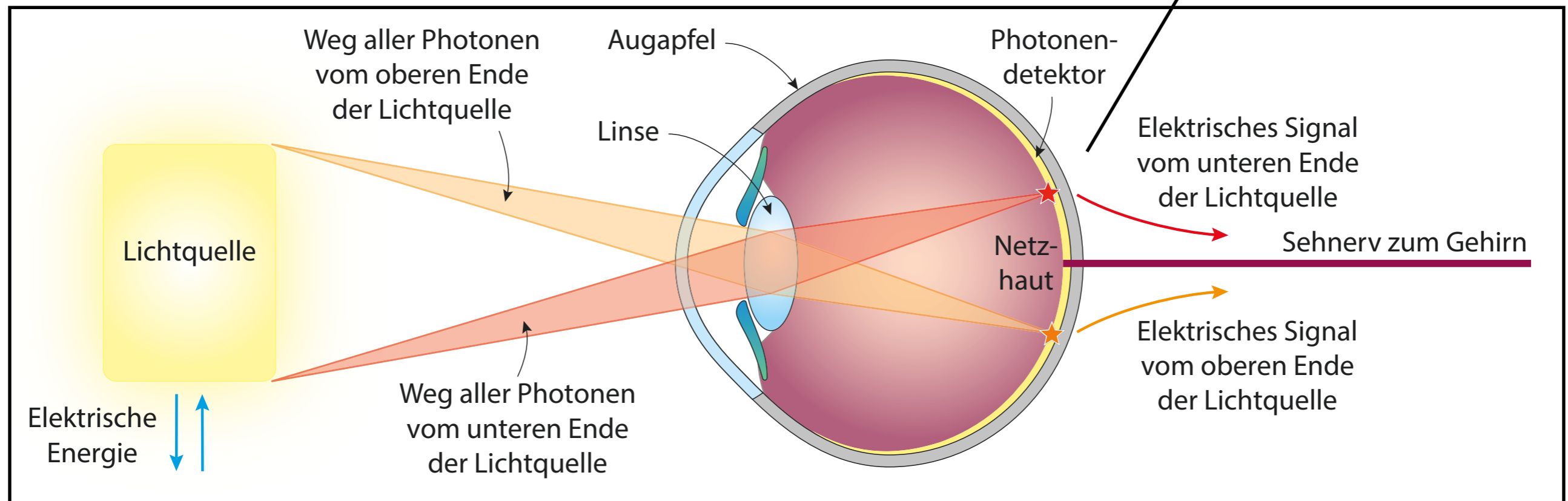
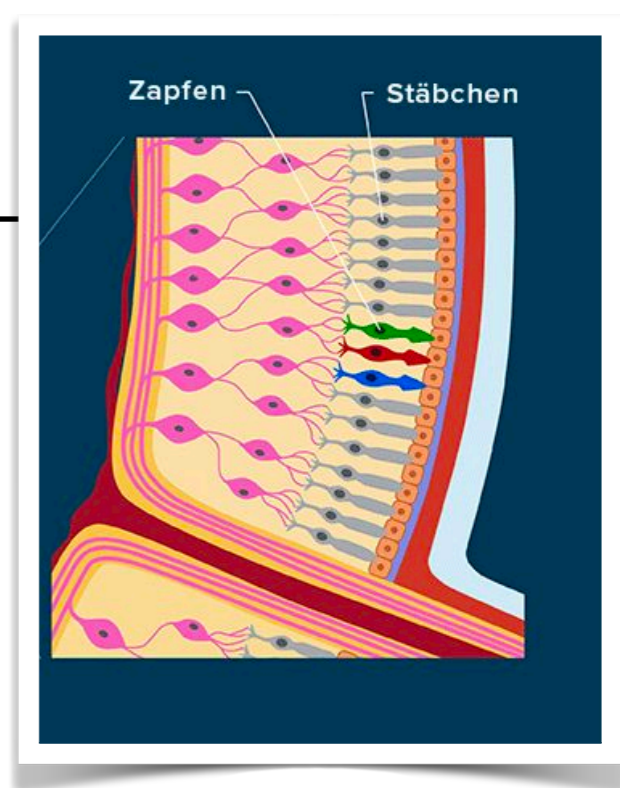
z.B. Diode in einer Lichtschranke misst Teilchen des Lichts (Photonen) oder analog Sensoren in einer Kamera

Teilchendetektor, den wir immer dabei haben: **Unsere Augen**

Zäpfchen : unterscheiden Licht verschiedener Farben

Stäbchen : empfindlich gegenüber allen Lichtteilchen

(Strukturen von 1 mm können über eine Distanz von 5 m aufgelöst werden)

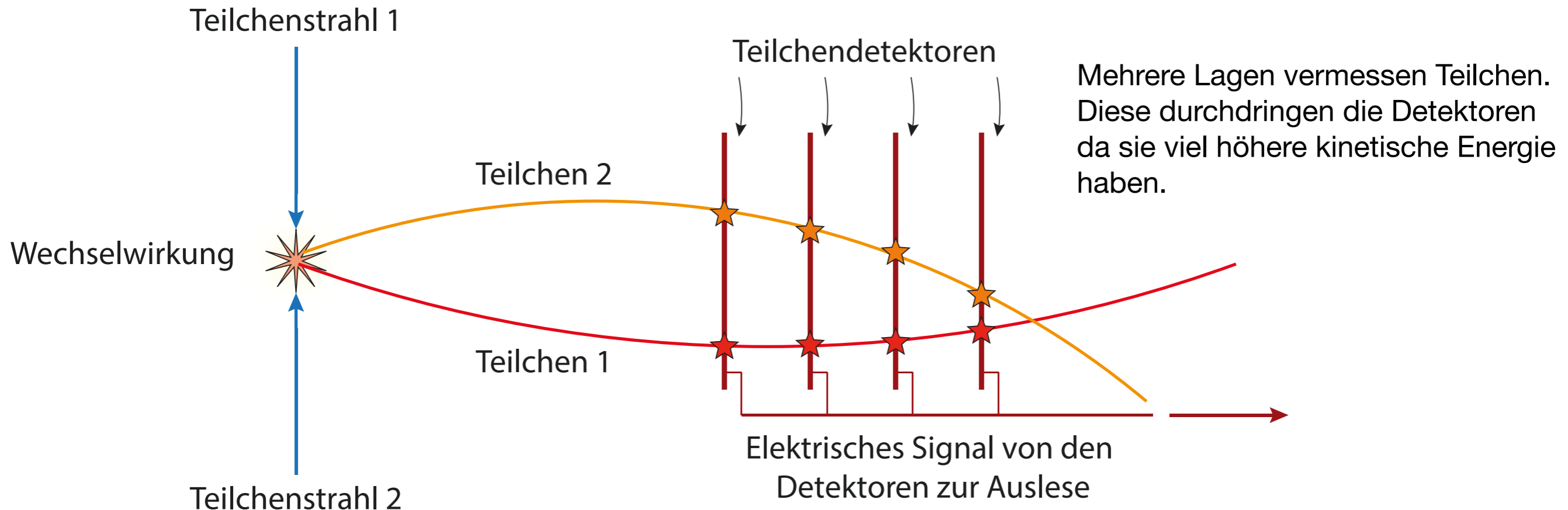


Signale werden mit bei modernen Teilchenphysikdetektoren verarbeitet, bevor sie ans Gehirn geschickt werden.

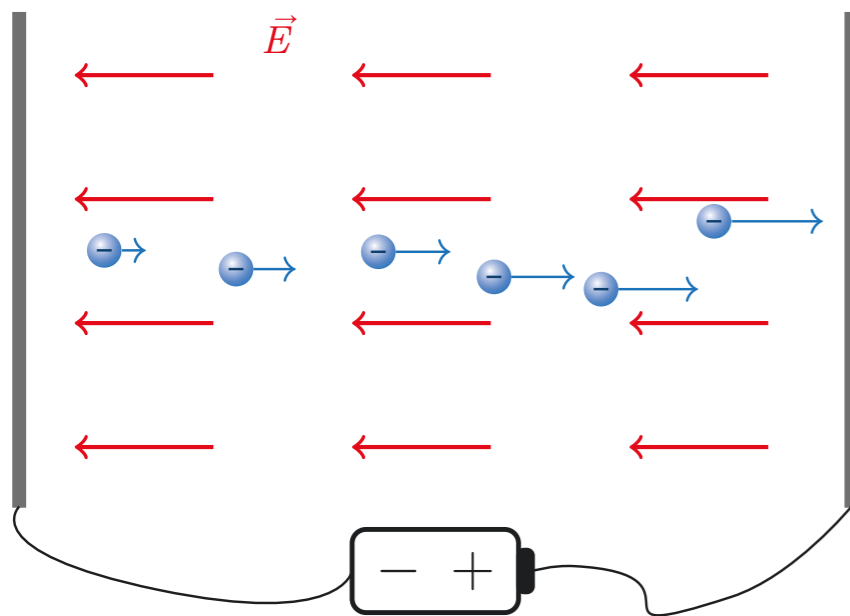
Extrem empfindlich: 5 Photonen während 1/30 Sekunde reichen aus um ein Signal zu erzeugen.

Dynamikumfang: 1 : 1'000'000

Detektor in der Teilchenphysik: **Dynamikumfang:** 1 : 1'000



Werden heute **natürliche Einheiten** benutzen:



Kinetische Energie, die ein Elektron gewinnt wenn es eine Spannung von 1 Volt durchläuft = **Elektronvolt**

Einige Ruhemassen:

Proton: ca. $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$

Elektron: $0.51 \text{ MeV} = 0.51 \times 10^6 \text{ eV}$

Higgs Boson: 125 GeV

Umrechnung von Energieeinheiten

In den Basiseinheiten Meter, Kilogramm und Sekunde ausgedrückt, hat die Energie die Einheit

$$1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2 = 1 \text{ J} .$$

Zur Vereinfachung wurde die Einheit Joule (J) eingeführt. Da die Leistung Energie pro Zeit ist, gilt für die Einheit

$$1 \text{ kg m}^2/\text{s}^3 = 1 \text{ J/s} = 1 \text{ W} ,$$

was auch als Watt (W) bezeichnet wird. Nun gilt natürlich auch $1 \text{ J} = 1 \text{ Ws}$. Da eine Stunde (Einheit: h) 3.600 Sekunden hat und $1 \text{ W} = 1/1.000 \text{ kW}$ ist, kann man schreiben

$$\begin{aligned} 1 \text{ J} &= \text{W} \cdot 1/3.600 \cdot \text{h} = 1/3.600.000 \text{ kWh} \\ &= 2,78 \cdot 10^{-7} \text{ kWh} . \end{aligned}$$

Ein Elektron, das eine Spannung von einem Volt durchläuft, gewinnt ein Elektronenvolt (eV) an Energie. Die Elementarladung ist $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb (C)}$. In der Elektrizitätslehre lernt man, dass ein Coulomb \times Volt einem Joule entspricht, also

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} .$$

Damit wir Teilchen, die wir untersuchen wollen in unseren Detektoren registriert und vermessen werden können, müssen sie zwei Bedingungen erfüllen:

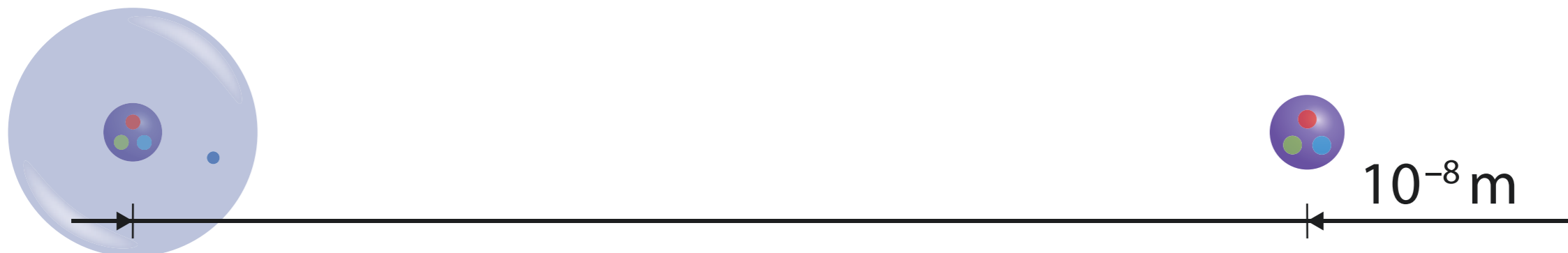
1. **Wechselwirkung** mit dem **Detektormaterial**.
2. **Reaktion** des Detektormaterials muss **registriert werden**.

Aus den bekannten Wechselwirkungen kommen dafür primär

Elektromagnetismus & Starke Kraft

in Frage. Die Gravitation und schwache Kraft sind viel zu schwach zur Erzeugung von elektronischen Signalen in Detektoren.

(a)



(a)

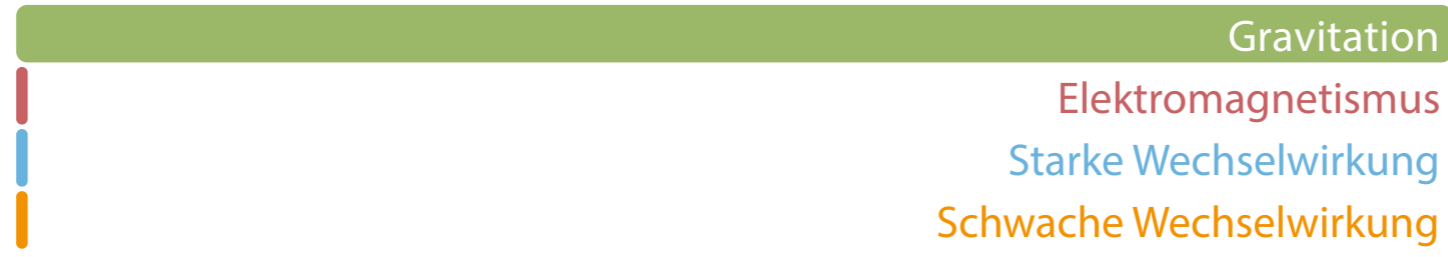


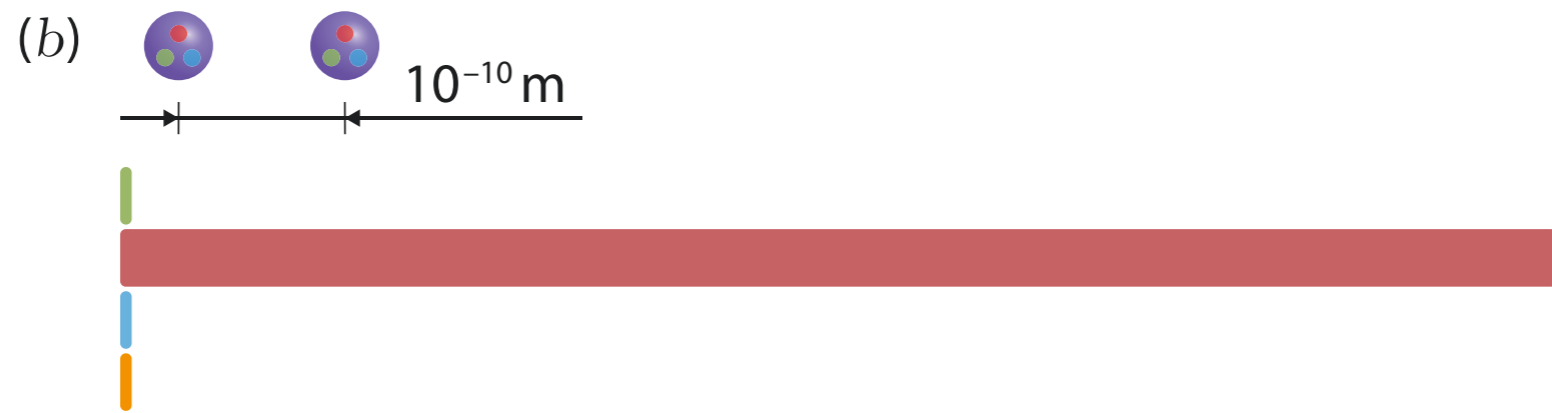
Gravitation

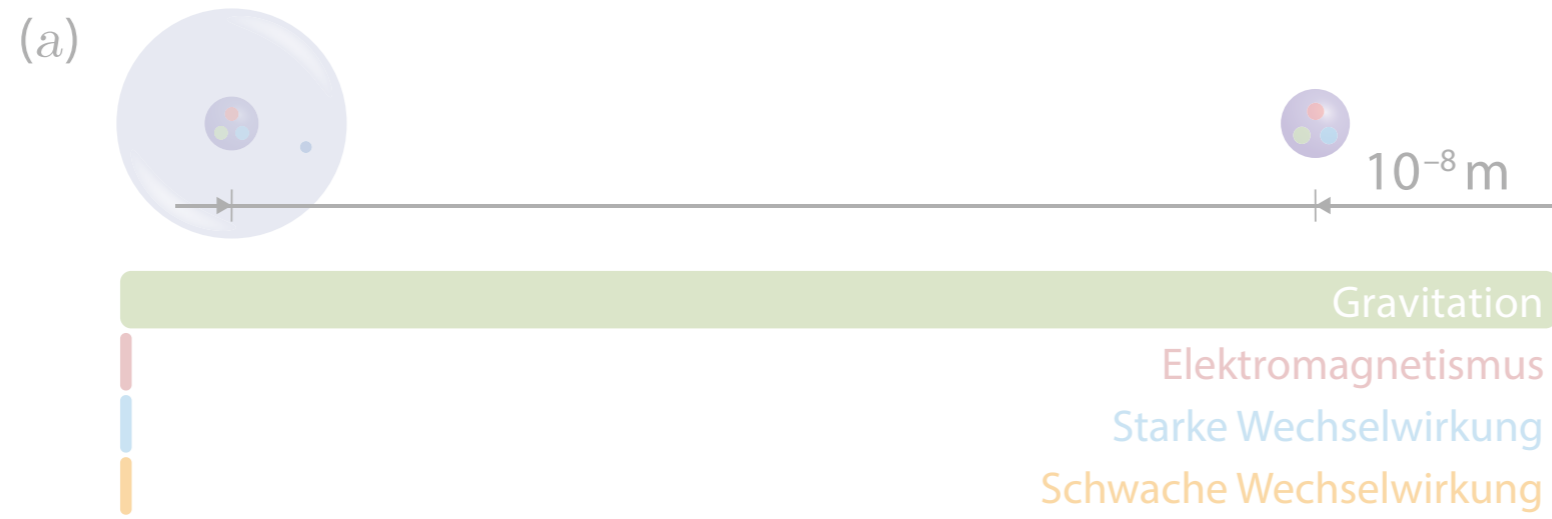
Elektromagnetismus

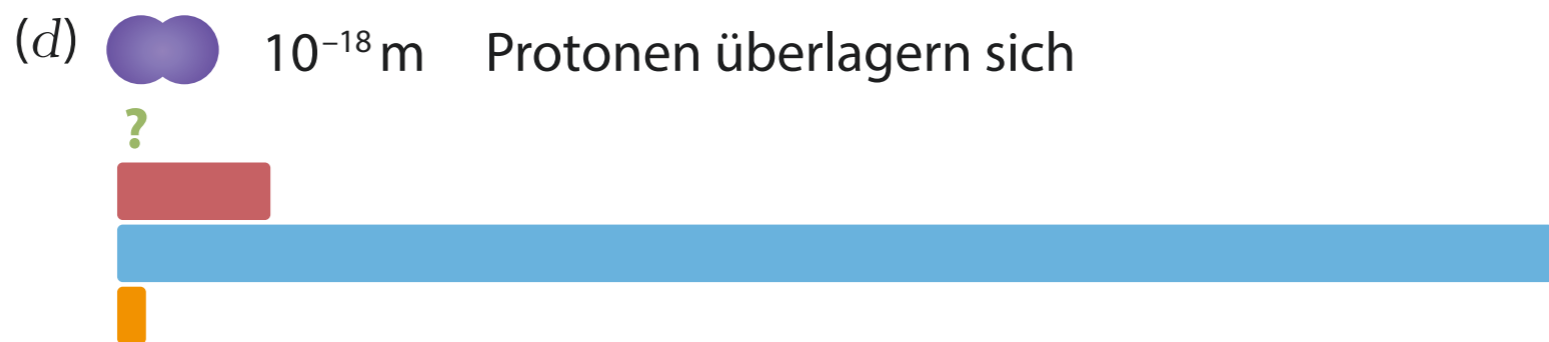
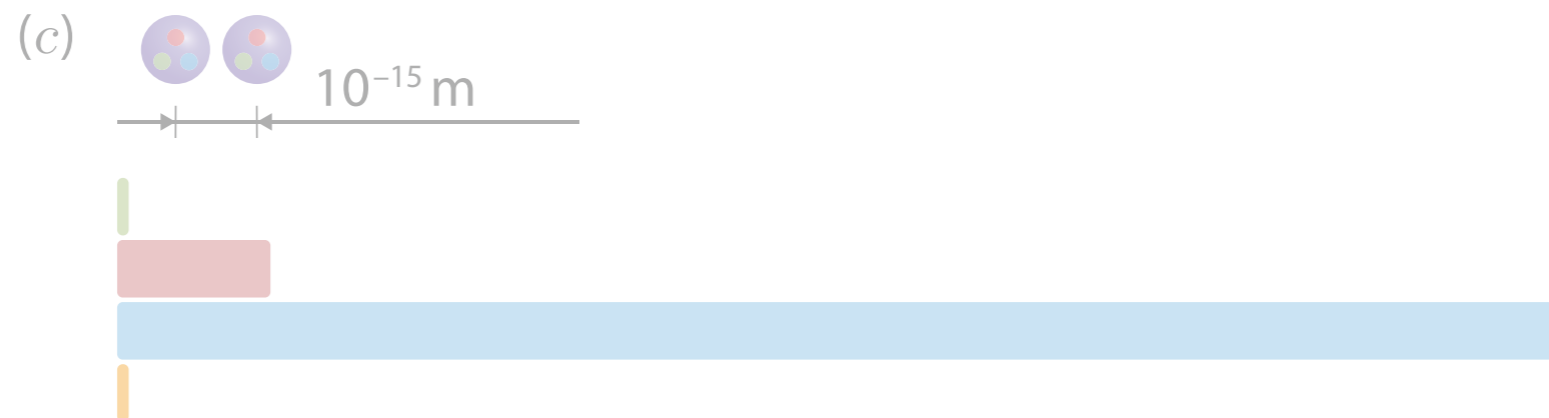
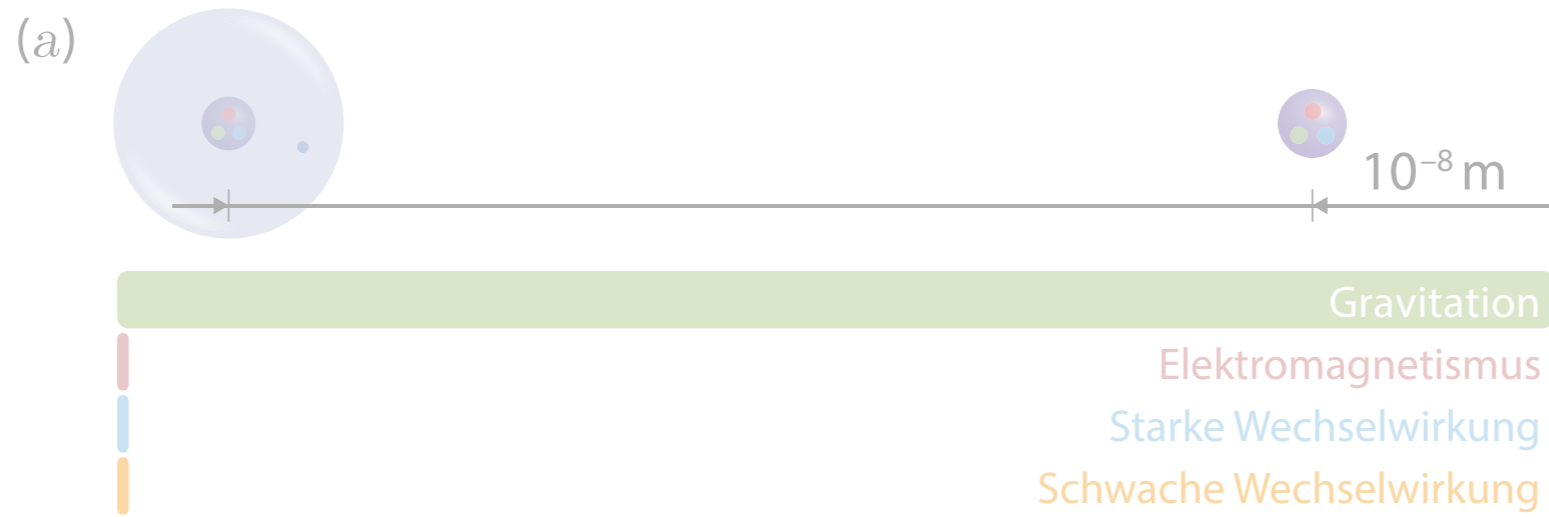
Starke Wechselwirkung

Schwache Wechselwirkung









Die anderen Kräfte können natürlich trotzdem untersucht werden (z.B. wenn man Neutrinos oder Gravitationswellen untersuchen möchte)

Bei allen elektrisch geladenen Teilchen → **EM Wechselwirkungen**

Muss den Detektor aber so konstruieren, dass alle zur Messung notwendigen in einem passenden Energiebereich liegen.

Die Energie und Masse entscheiden dann, wie genau das geladene Teilchen mit dem Detektor wechselwirkt. Interessant sind **Szintillation, Ionisation, Strahlung**

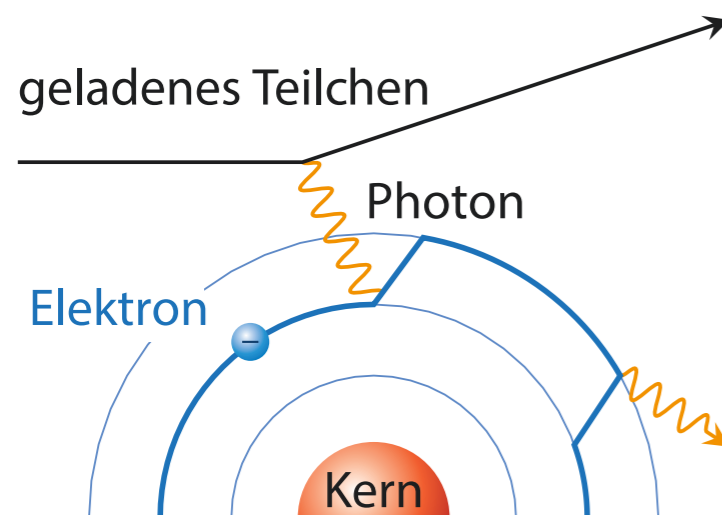
Die anderen Kräfte können natürlich trotzdem untersucht werden (z.B. wenn man Neutrinos oder Gravitationswellen untersuchen möchte)

Bei allen elektrisch geladenen Teilchen → **EM Wechselwirkungen**

Muss den Detektor aber so konstruieren, dass alle zur Messung notwendigen in einem passenden Energiebereich liegen.

Die Energie und Masse entscheiden dann, wie genau das geladene Teilchen mit dem Detektor wechselwirkt. Interessant sind **Szintillation, Ionisation, Strahlung**

Szintillation

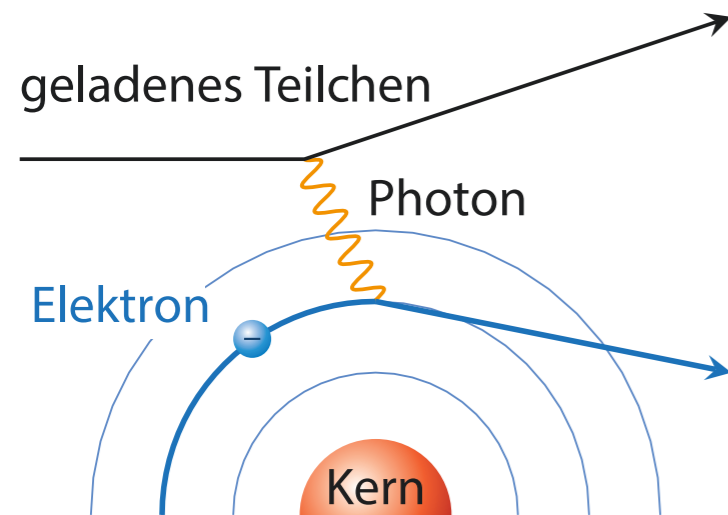


Bei **niedriger Energie** : Teilchen wird im Feld des Atomkerns abgelenkt ; nicht nachweisbar

Etwas **höhere Energie** : Hüllenelektron kann auf höheres Energieniveau gehoben werden. Hüllenelektron begibt sich durch Aussendung eines Photons wieder auf sein Anfangsniveau.

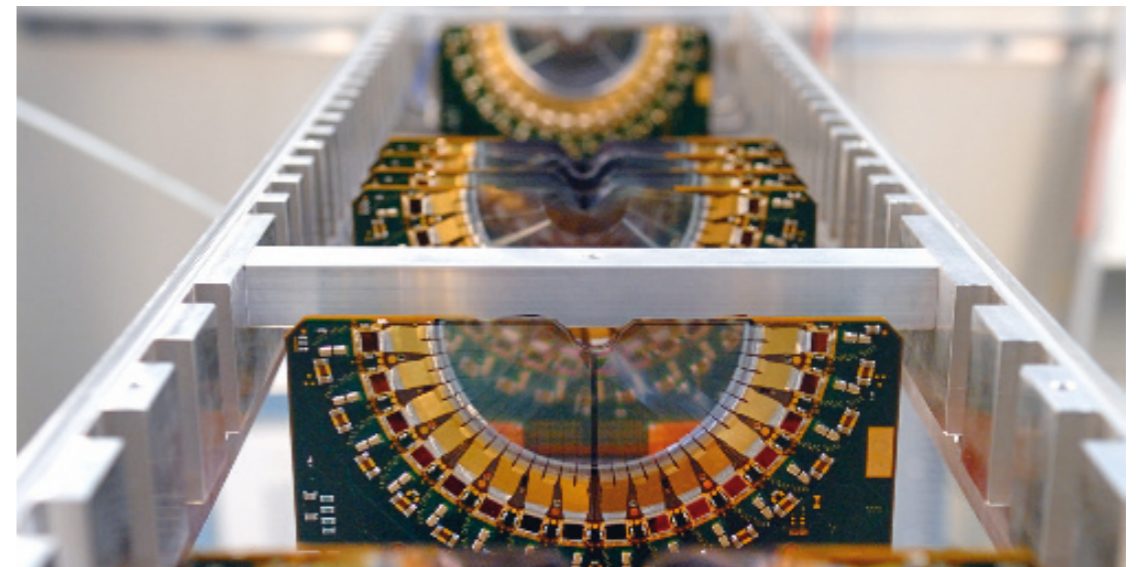
Falls **Material durchsichtig** für die Wellenlänge des so produzierten Lichts → kann Photon nachweisen, sog. **Szintillation**

Ionisation



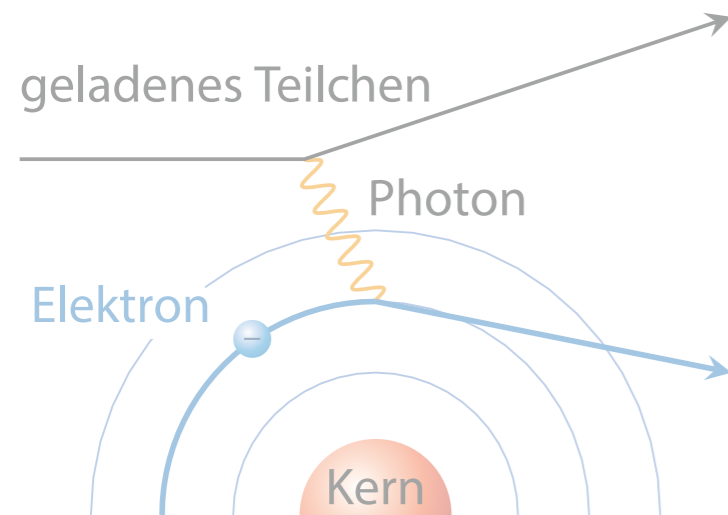
Noch **höhere Energie** : Hüllenelektron wird aus dem Atomkern gestossen. Es entsteht ein geladenes Ion und ein freies Elektron, das als elektrisches Signal registriert werden kann.
Sog. Ionisation.

Halbleiterdetektor
benutzt Ionisation im
Silizium

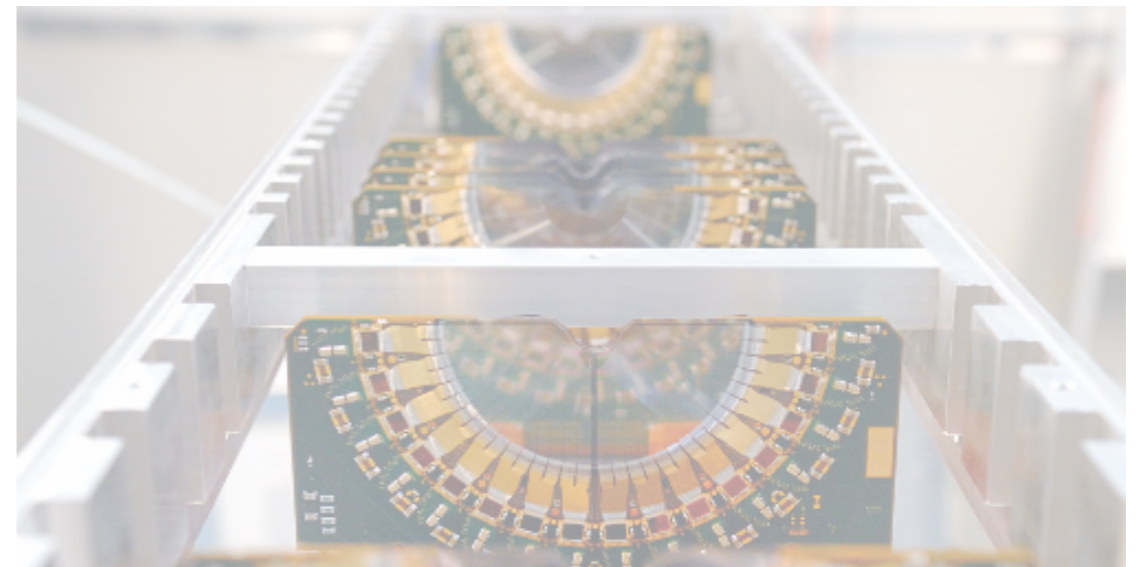


Noch **höhere Energie** : Hüllenelektron wird aus dem Atomkern gestossen. Es entsteht ein geladenes Ion und ein freies Elektron, das als elektrisches Signal registriert werden kann.
Sog. Ionisation.

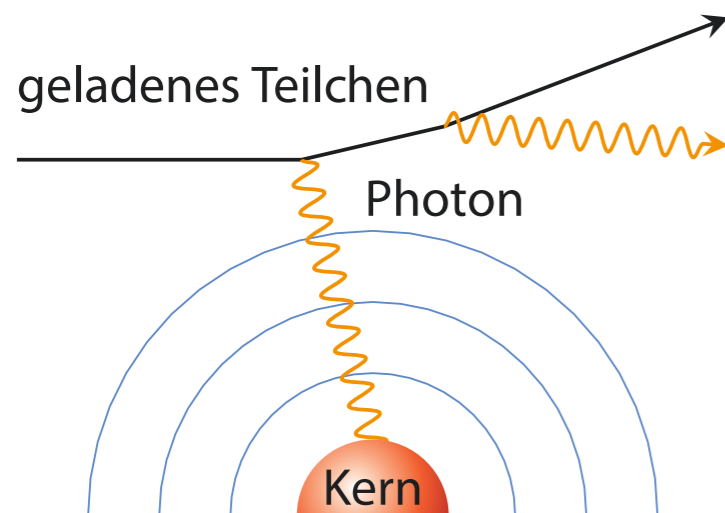
Ionisation



Halbleiterdetektor
benutzt Ionisation im
Silizium



Strahlung



Übersteigt die Energie des Teilchens etwas das hundertfache seiner Ruhemasse, wird **Strahlung** der **dominante** Prozess.

Bei sehr leichten Teilchen wie dem Elektron spielt dieser Prozess schon bei 100 MeV eine große Rolle.

Driftkammer ionisiert Teilchen im Gas



Bei allen elektrisch neutralen Teilchen abhängig vom Teilchentyp → **Photon z.B. mit sog. EM-Schauern.**

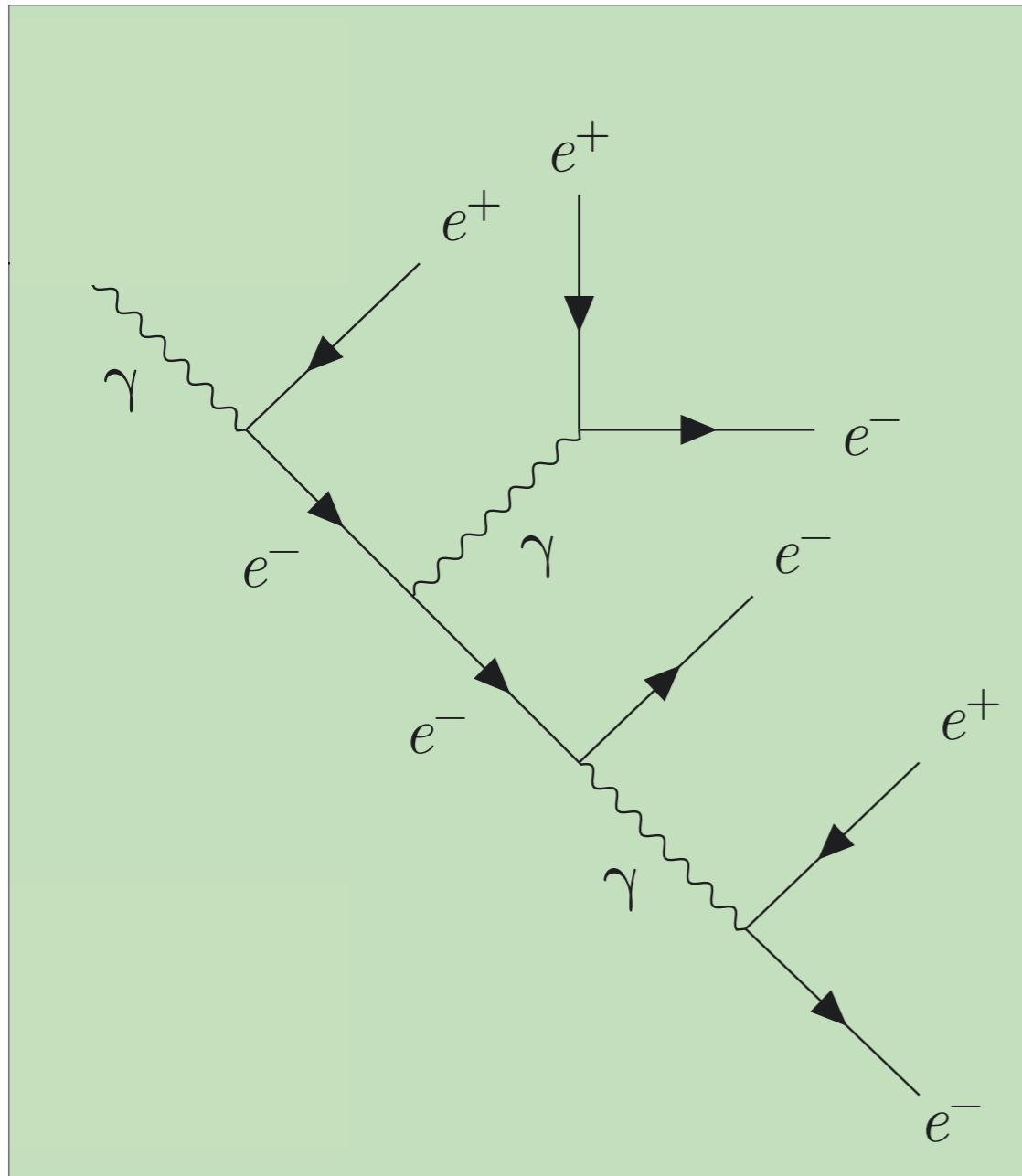
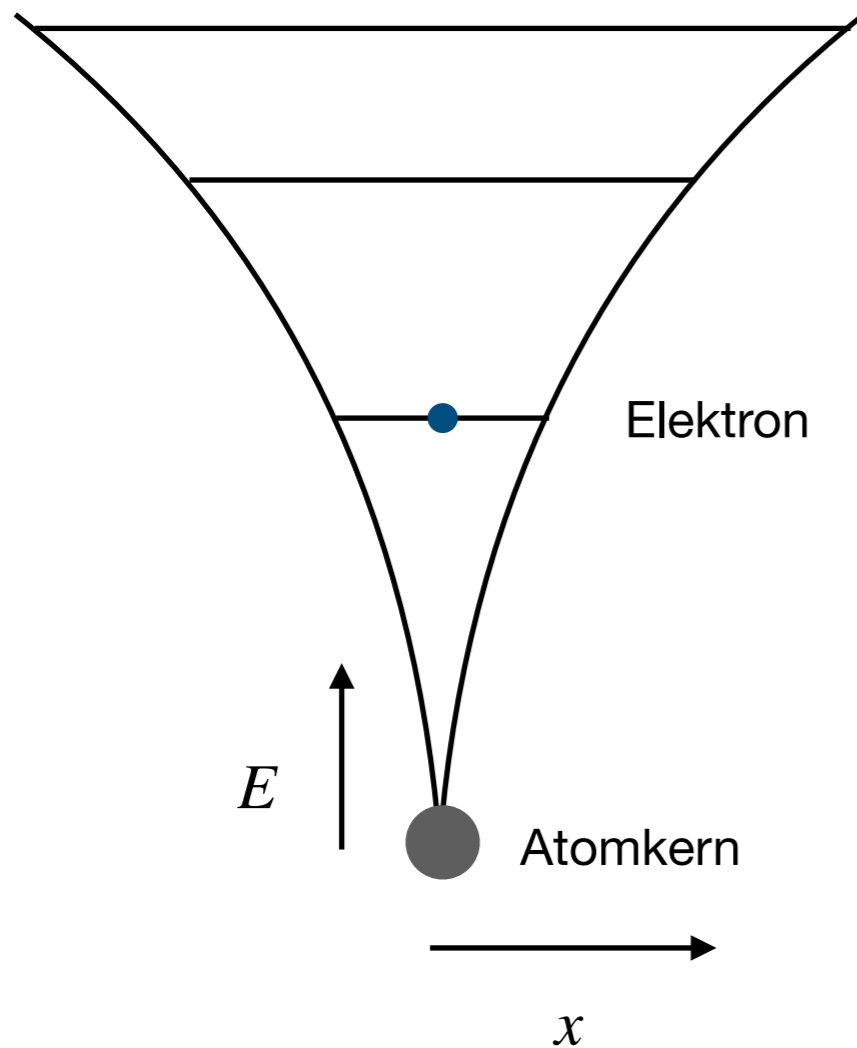


Illustration eines EM- Schauers

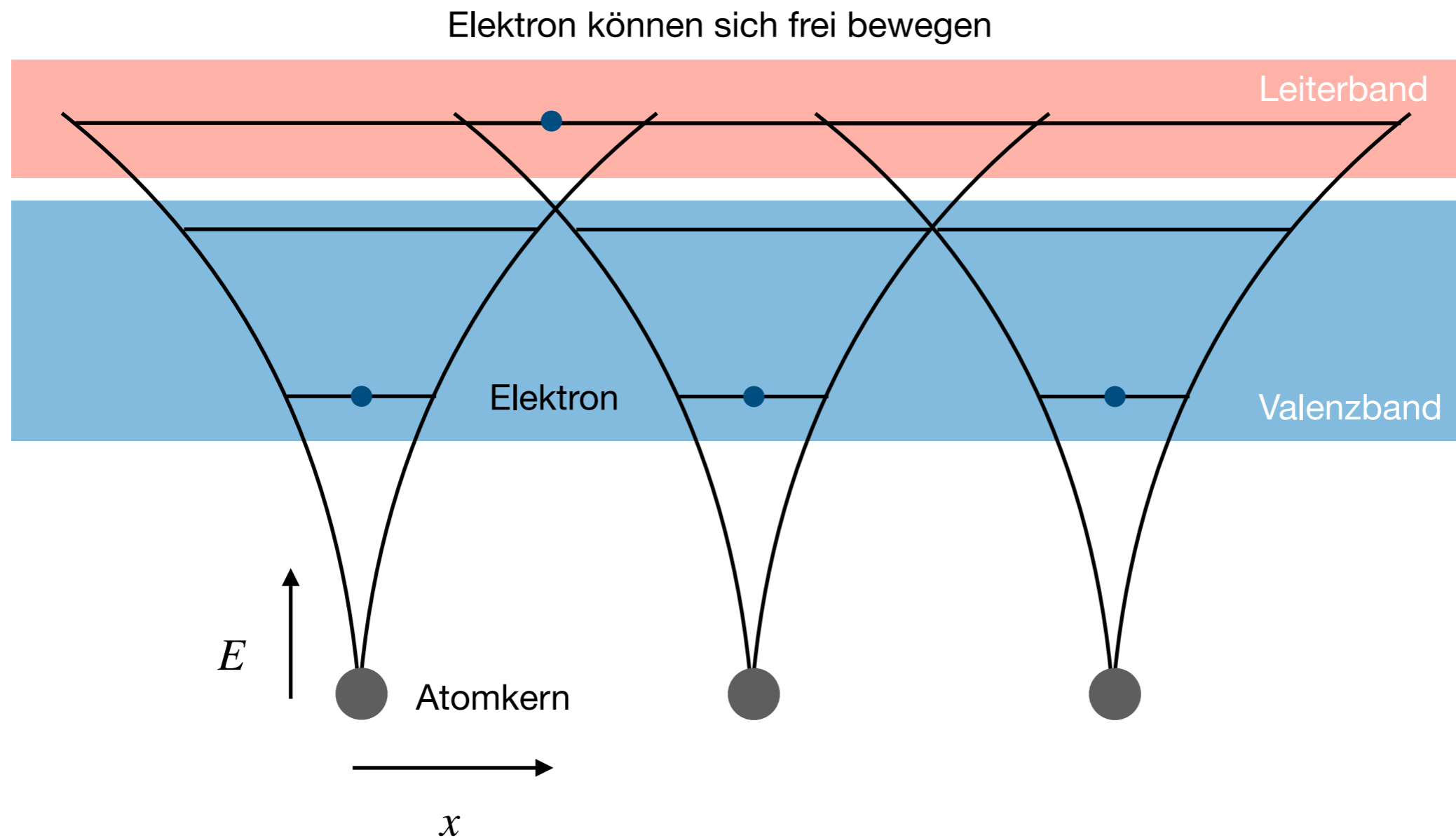
Die meisten von euch tragen **Millionen** von Halbleitern mit euch herum.

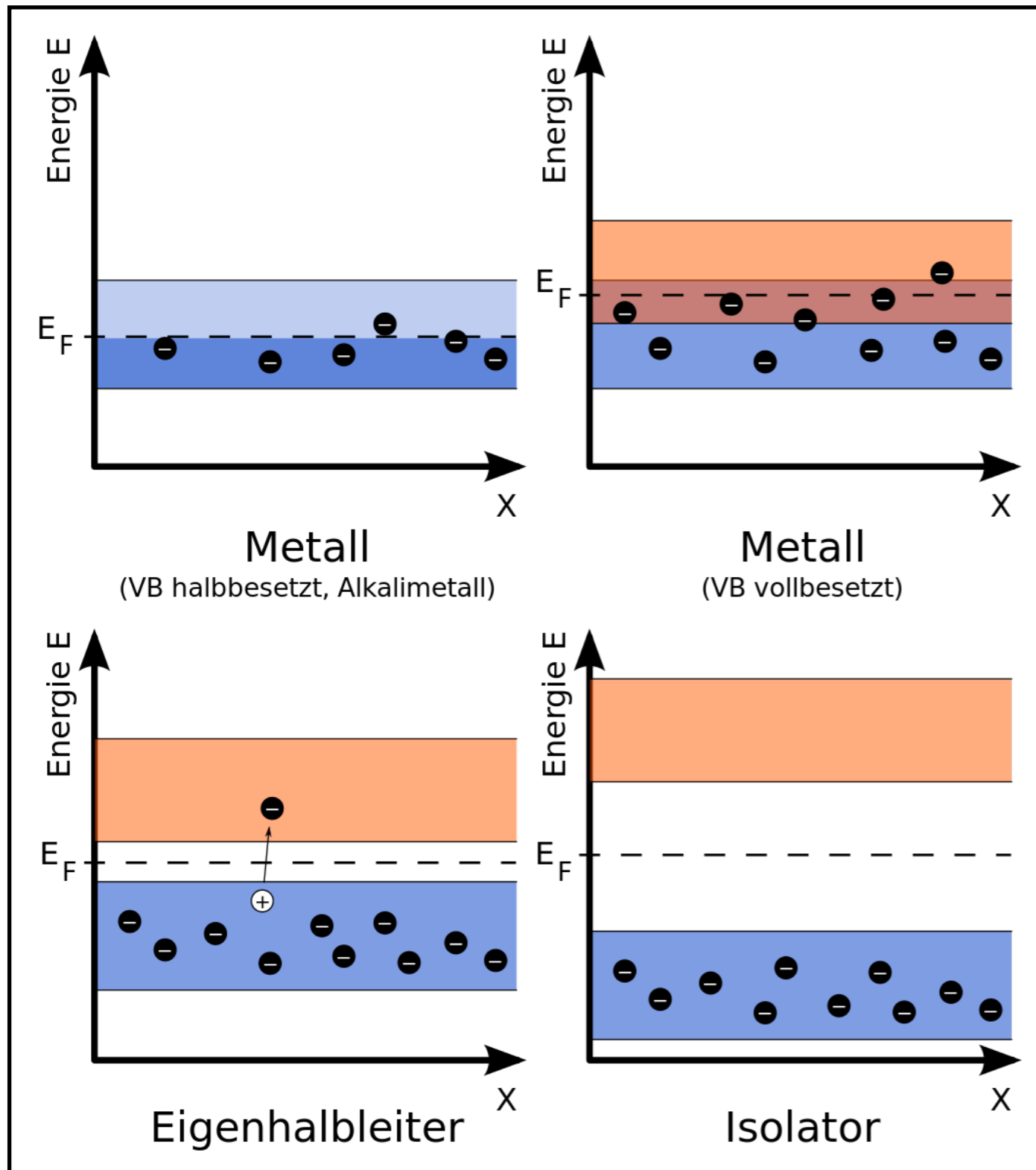
Was ist ein **Halbleiter**?



Die meisten von euch tragen **Millionen** von Halbleitern mit euch herum.

Was ist ein **Halbleiter**? Was ist ein **Leiter**?





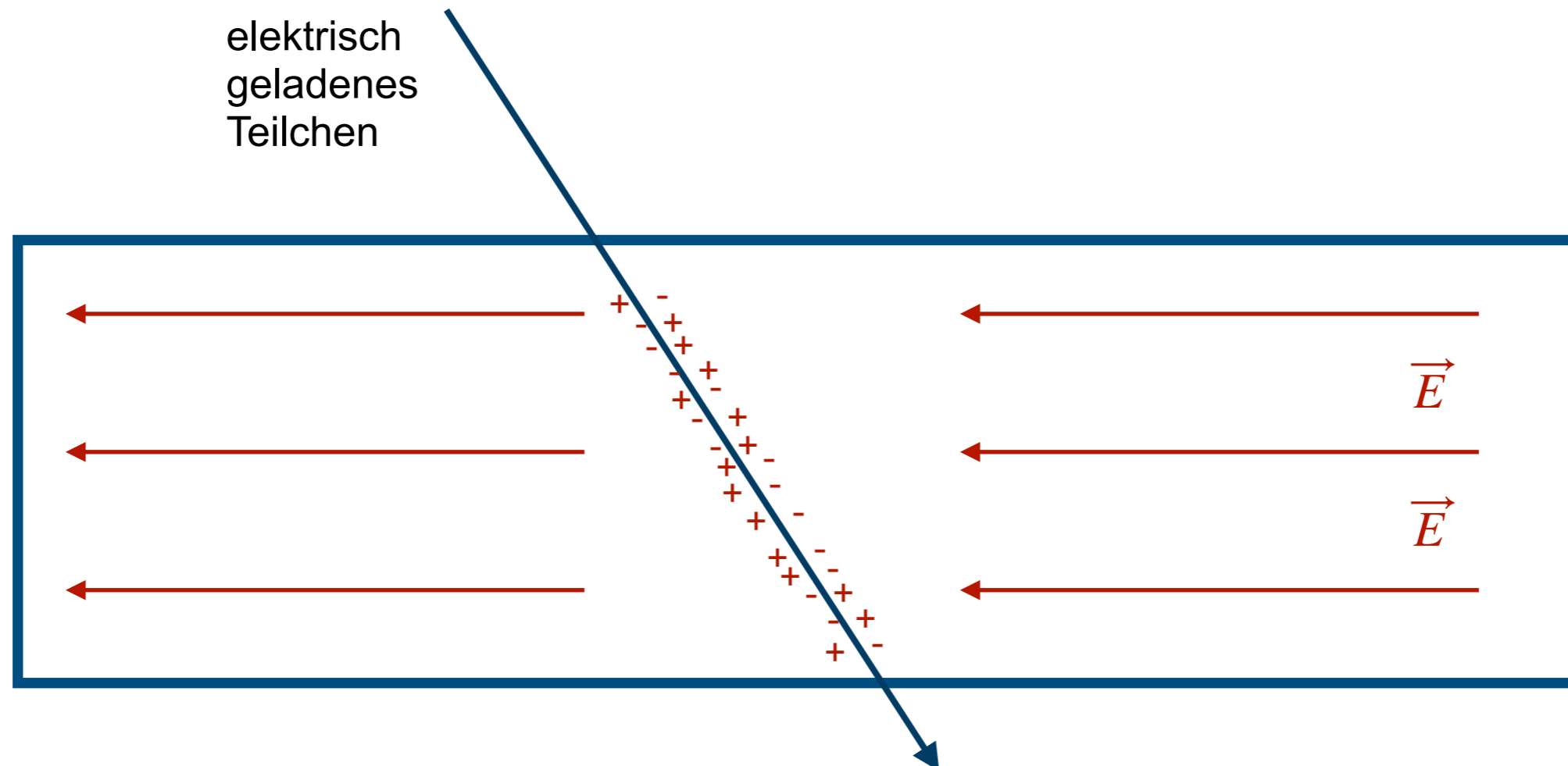
Leiter
Halbleiter
Isolator

● Elektron ⊕ Defektelektron
■ Leitungsband ■ Valenzband

Wenn ein geladenes Teilchen einen Halbleiter durchdringt, werden Elektronen vom **Valenzband** ins **freie Leitungsband** befördert.

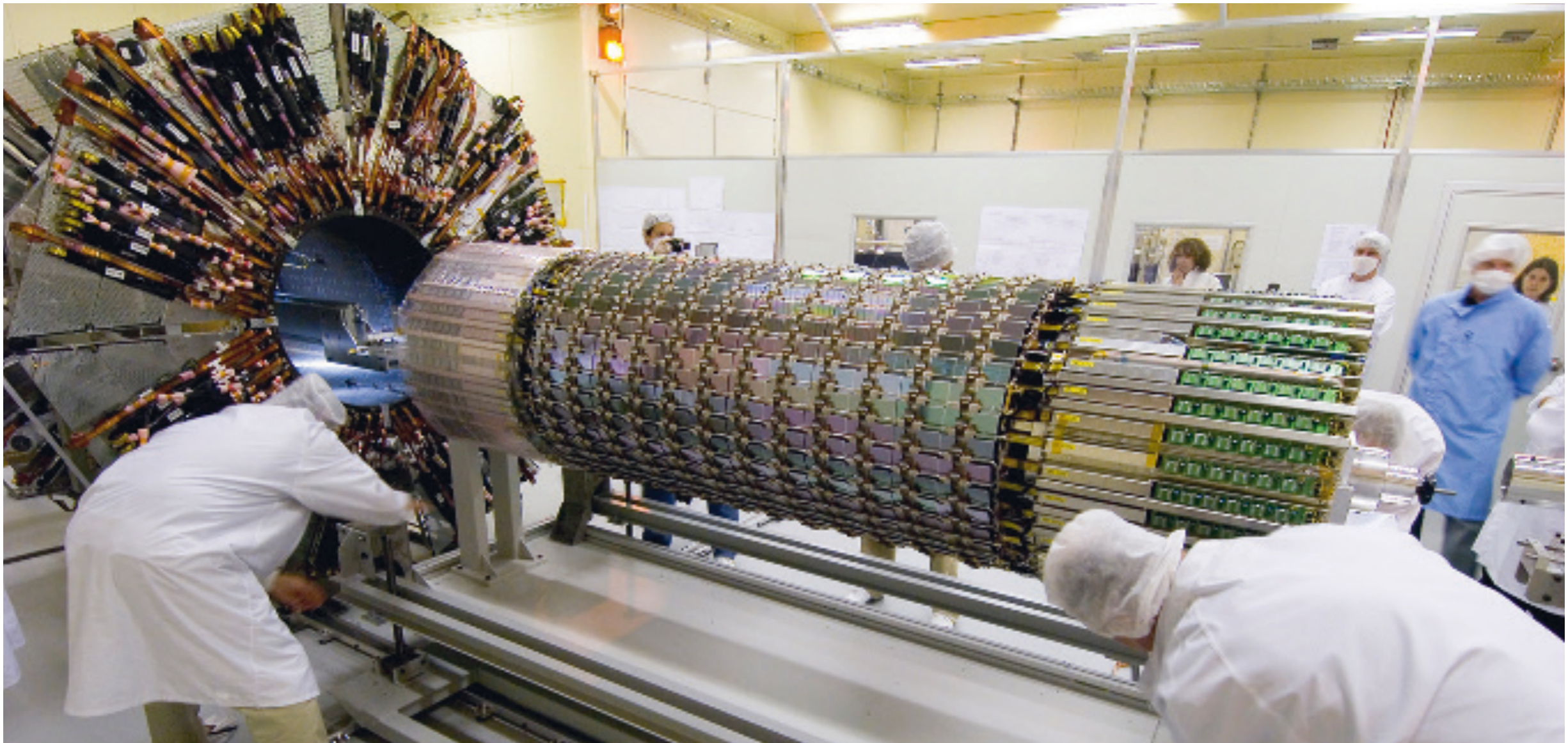
Die Anzahl so erzeugter freier Elektronen ist direkt proportional zu der vom Teilchen abgegebenen Energie.

Legt man nun eine Spannung an, kann man die freien **Elektronen einsammeln** und damit sogar Energie des ursprünglichen Teilchen messen.

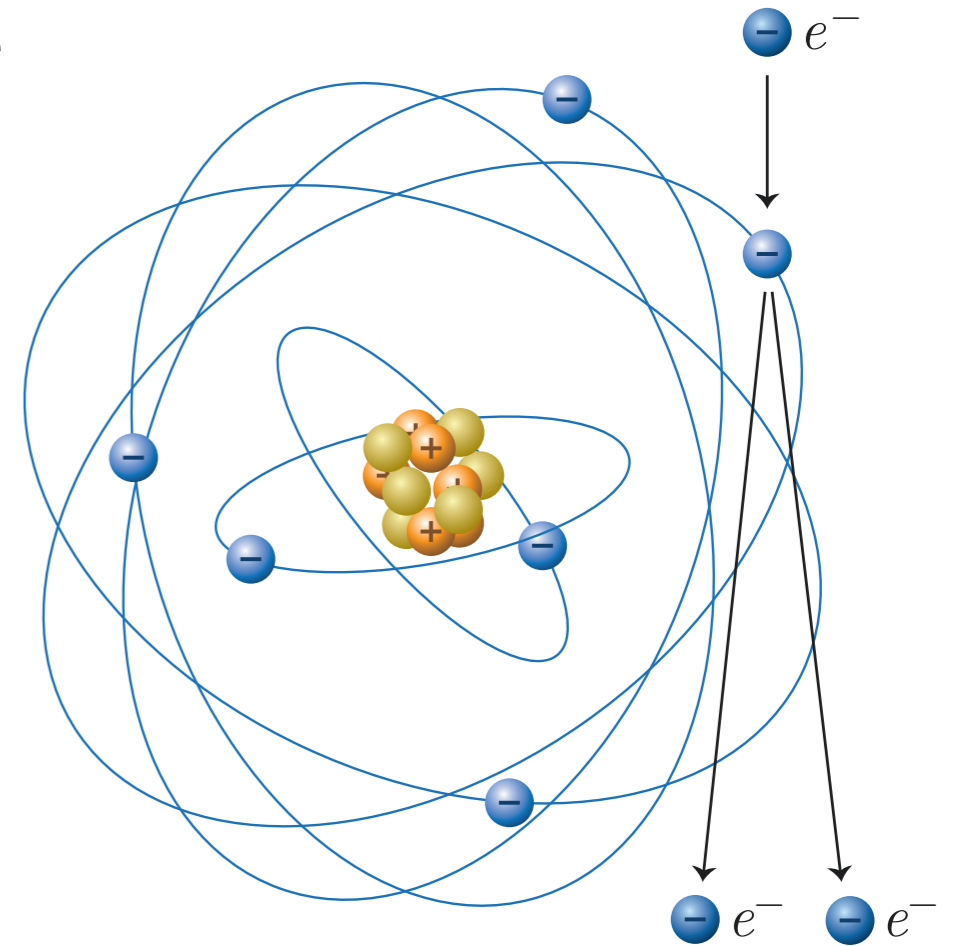


Halbleitertechnologie ist sehr hoch entwickelt und es können **extrem kleine Flächen** instrumentiert werden.

ATLAS Halbleiterdetektor am LHC :

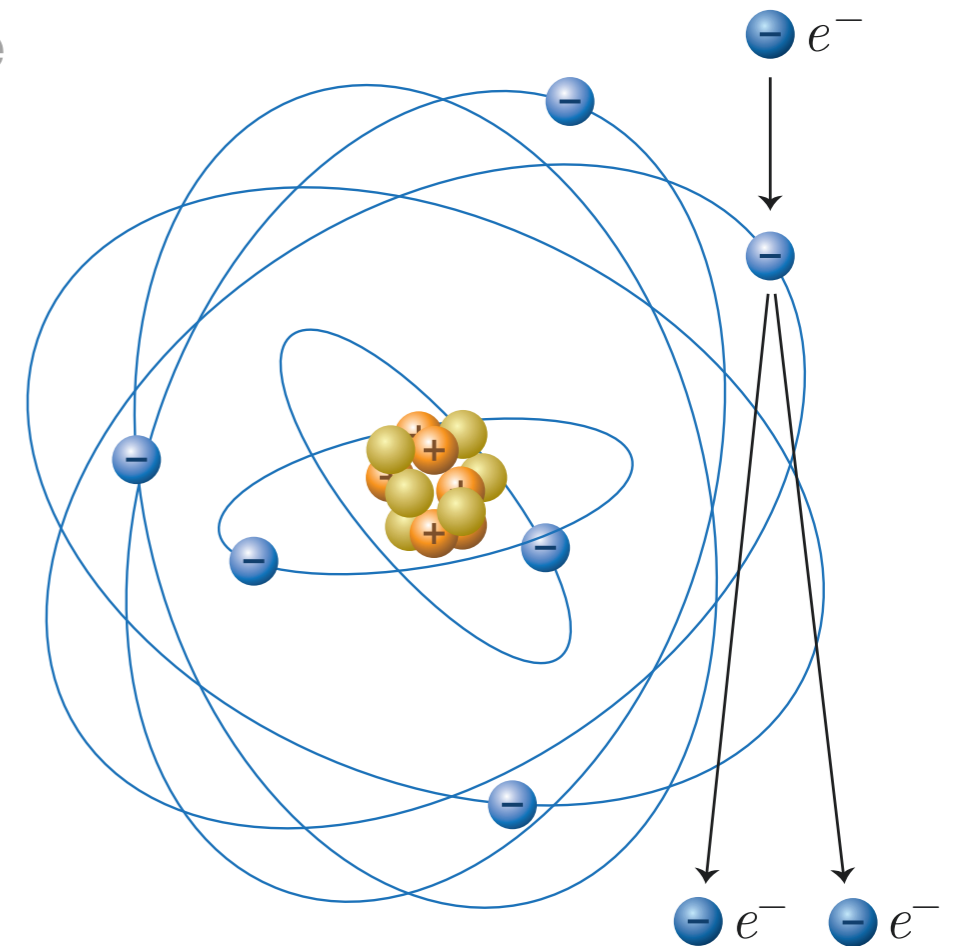
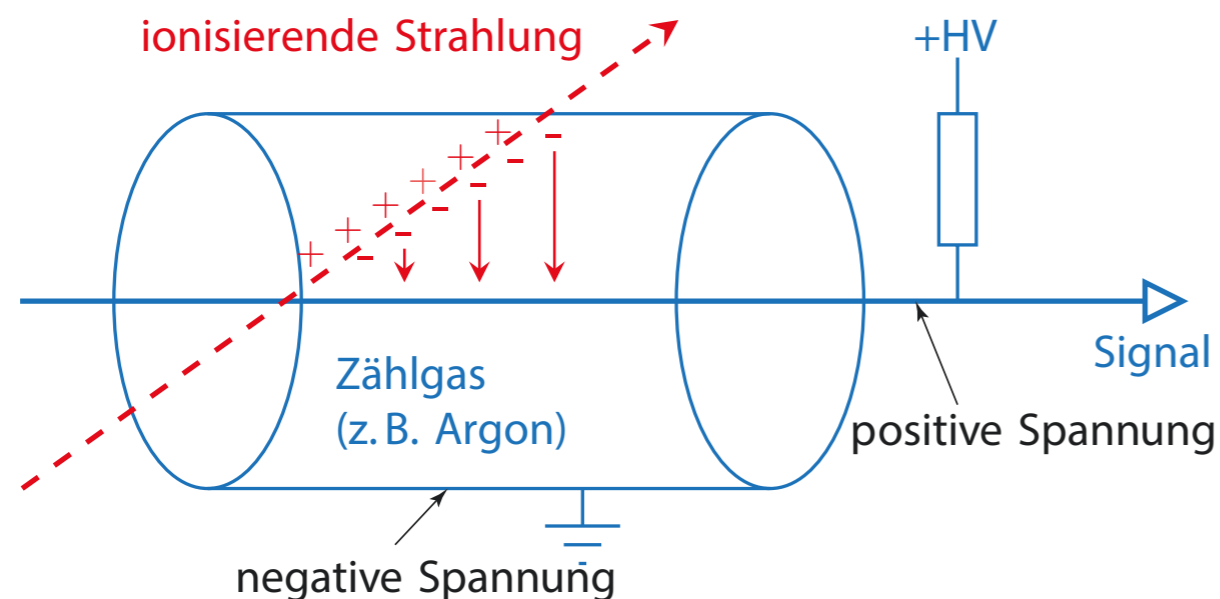


Analog können **gasgefüllte Detektoren** genutzt werden:
Diese nutzen aus, dass Geladene Teilchen Gasatome ionisieren und diese unter einem elektrischen Feld zu einem Messdraht driften.



Analog können **gasgefüllte Detektoren** genutzt werden: Diese nutzen aus, dass Geladene Teilchen Gasatome ionisieren und diese unter einem elektrischen Feld zu einem Messdraht driften.

Ein geladenes Teilchen in einem Zählrohr

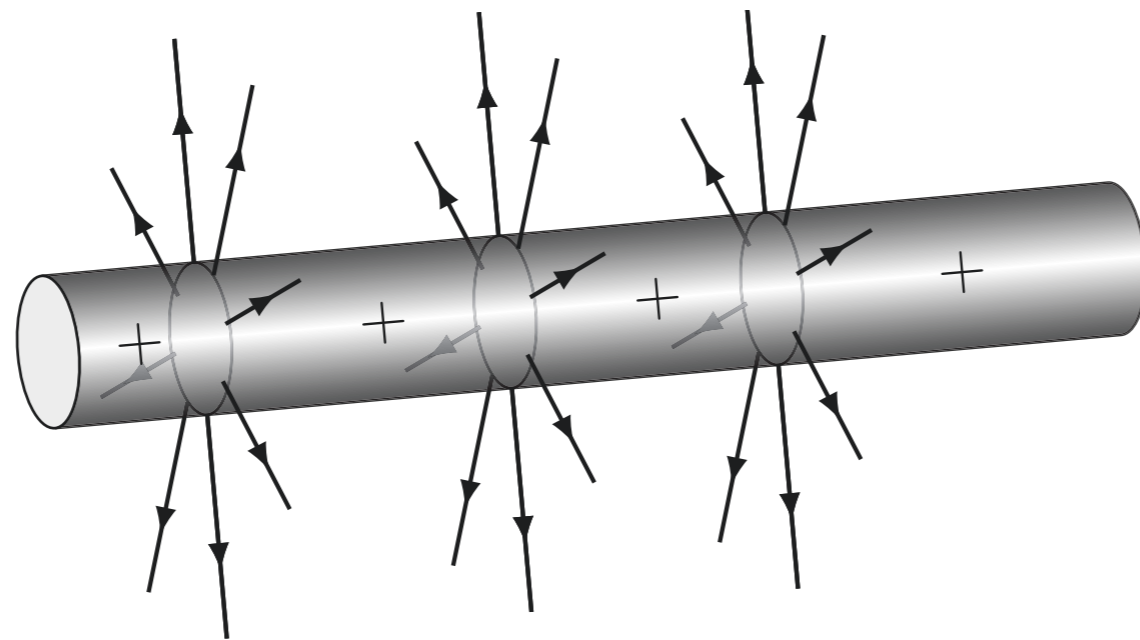


Eine der ersten solchen Detektoren ist das sog. **Zählrohr**, welches Hans Geiger 1908 entwickelt hat.

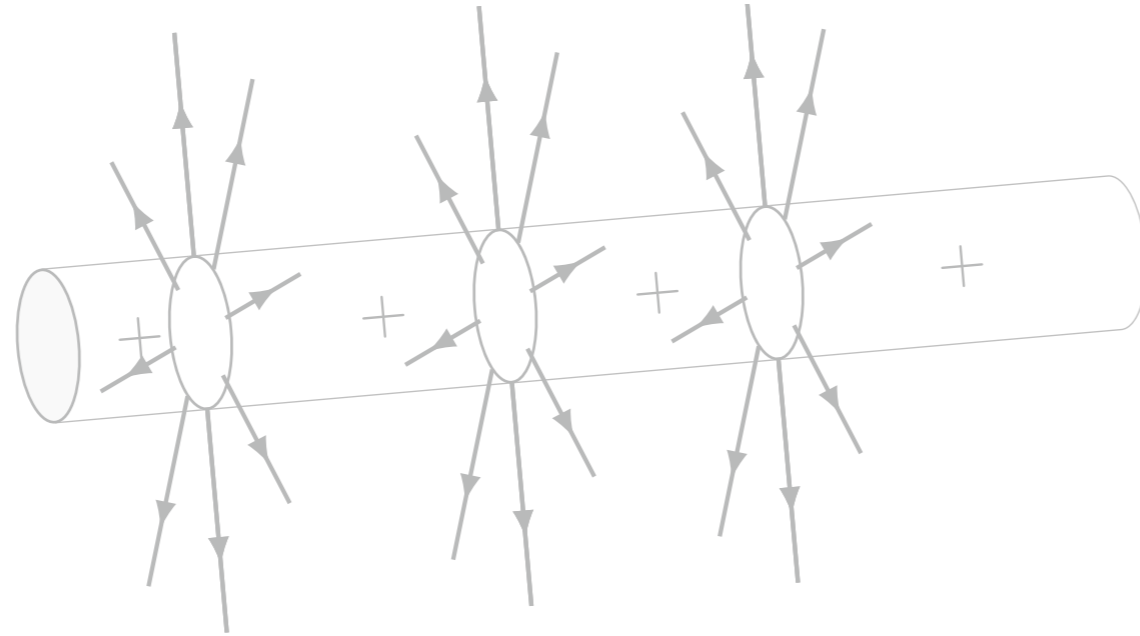
Ein solches Rohr ist mit **Edelgas** gefüllt und von einem dünnen Draht **durchspannt**.

Ein elektrische Feld sorgt dafür, dass **Primärelektronen** nach innen zum Draht driften.

Die Feldlinien werden auf dem Weg zum Draht immer **dichter**.



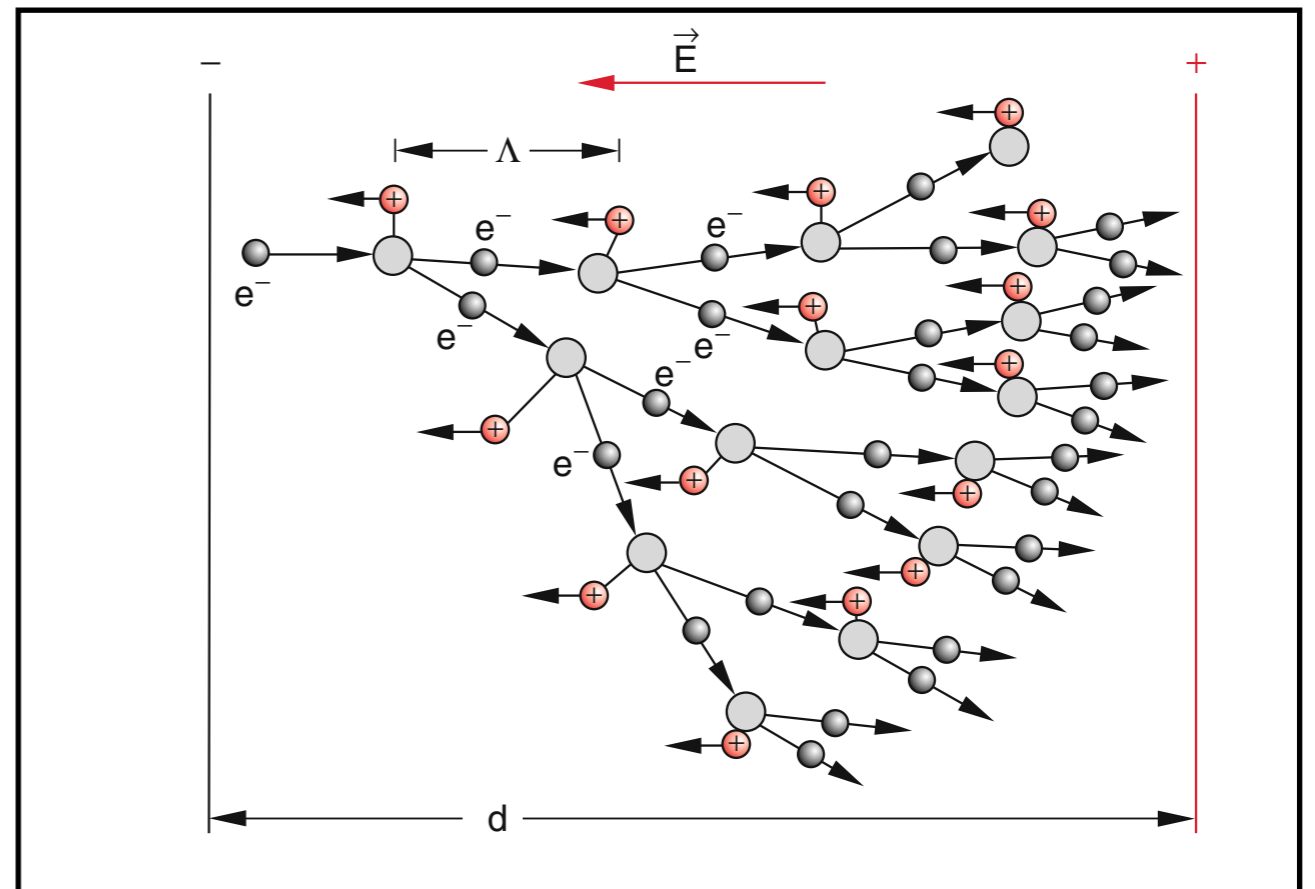
Die Feldlinien werden auf dem Weg zum Draht immer **dichter**.



Das hat zur Folge, dass Elektronen in der Nähe vom Draht **immer stärker** beschleunigt werden.

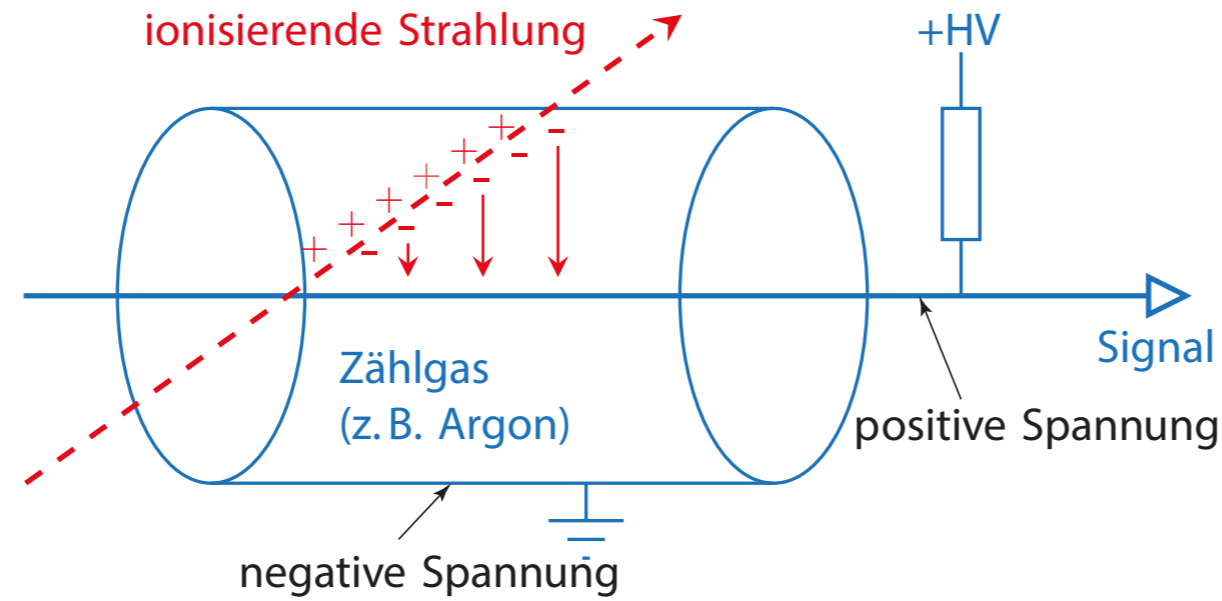
Dadurch werden weitere Teilchen ionisiert und eine **Ionisationslawine** entsteht.

Aus ein paar **100 Primärelektronen** können so **100 Milliarden Sekundärelektronen** entstehen.



Der Prozess kommt nach kurzer Zeit zum **erliegen**, da die Lawine einen messbaren elektrischen Strom zwischen der Wand und dem Draht erzeugt, was den Stromkreis schliesst.

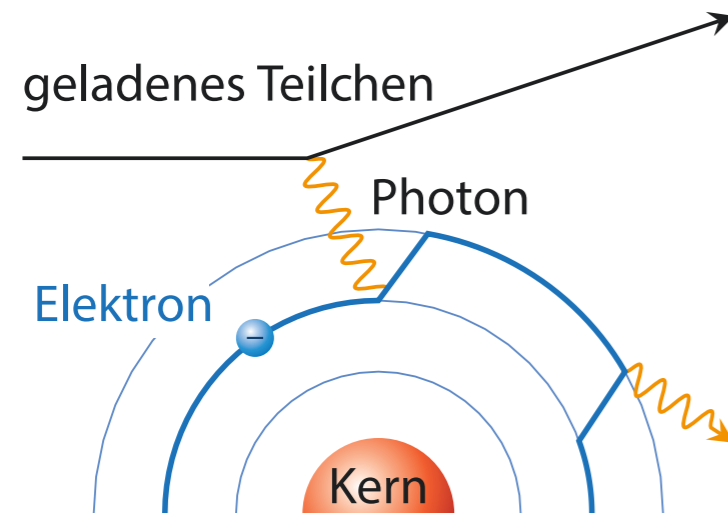
Ein geladenes Teilchen in einem Zählrohr



Warum der ganze Aufwand? **100 Elektronen** können kaum nachgewiesen werden, **100 Milliarden** erzeugen ein starkes Signal (!)

Man spricht von sog. **Verstärkung**

Szintillation



Test der PbWO₄-Kristalle für den CMS-Detektor am CERN

Szintillation bedeutet Funkeln oder Flackern. Die Anwendung von Szintillationsdetektoren ist breit: sie werden in der medizinischen Bildgebung aber auch in sog. Kalorimeter zur Messung der Energie in Teilchendetektoren genutzt.

Am häufigsten werden **Plastik-Szintillatoren** verwendet, womit sich großflächige Detektorsysteme bauen lassen. Es gibt aber auch **flüßige Szintillatoren** (meist organische Flüssigkeiten), wenn man große Volumina instrumentieren möchte.

Borexino-Detektor (mit 800 Tonnen Flüssigszintillatoren)

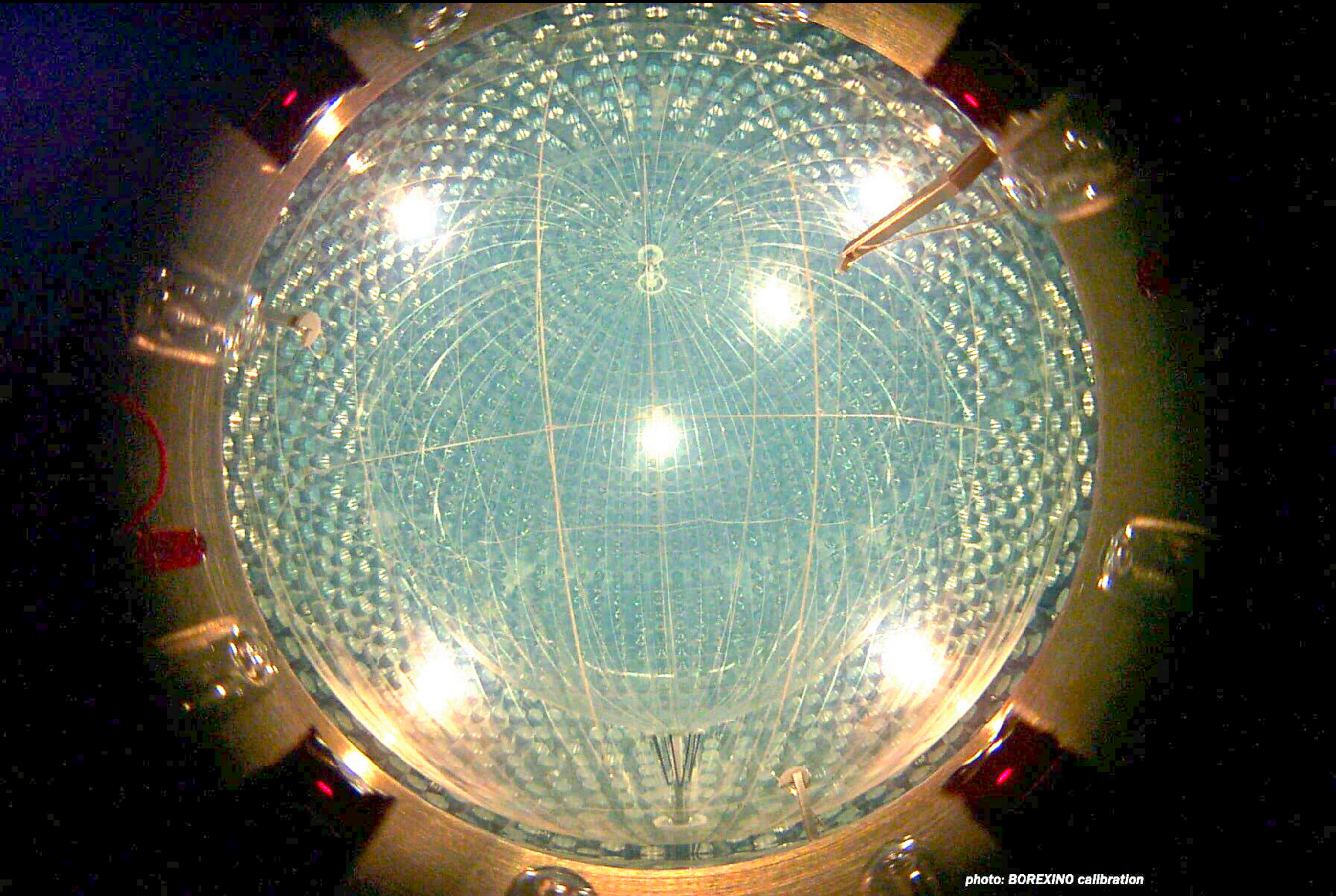


photo: BOREXINO callbration

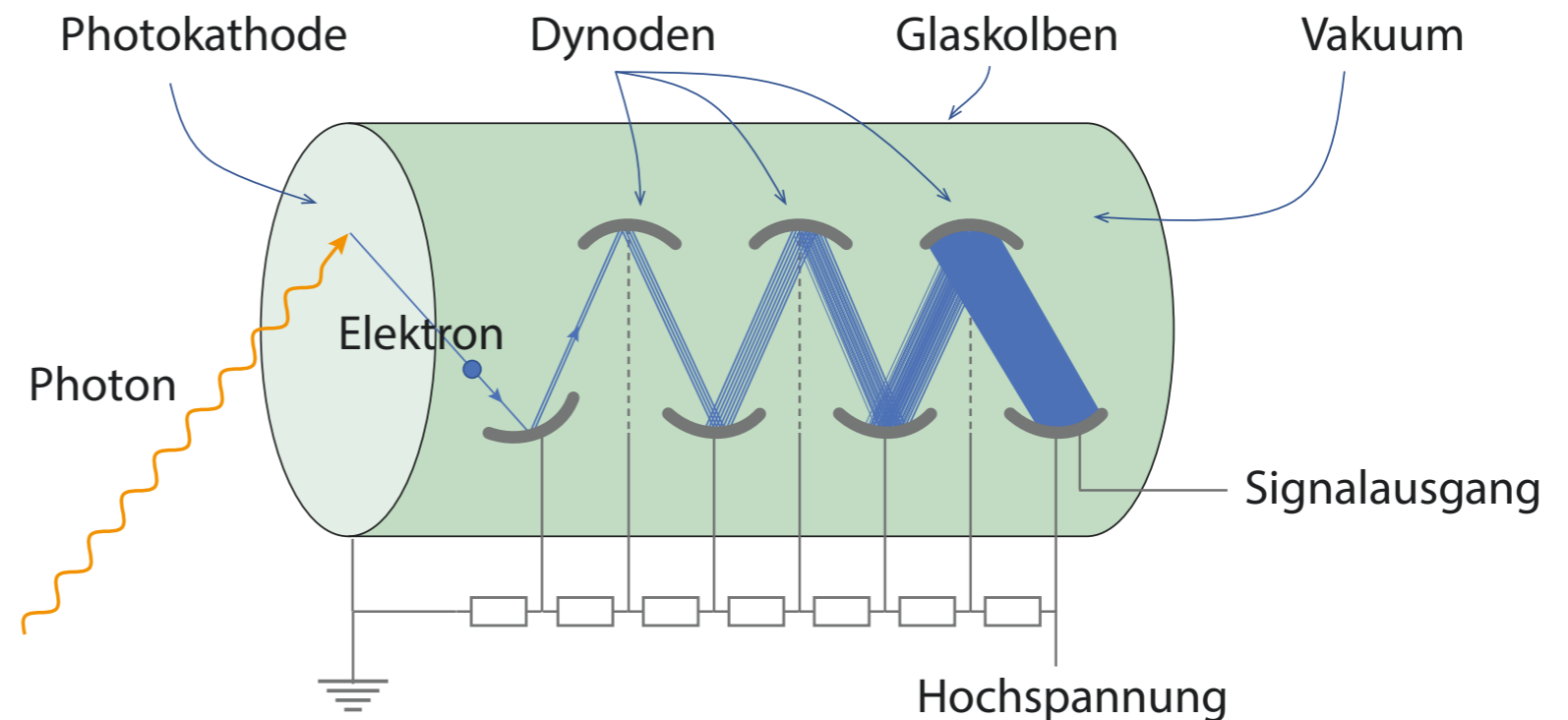
Den Entstehungsprozess der **Szintillationsphotonen** haben wir schon diskutiert, aber wie weist man diese nach?

Den Entstehungsprozess der **Szintillationsphotonen** haben wir schon diskutiert, aber wie weist man diese nach?

Dies geschieht mit sog. **Photomultipliern**. Sie wandeln Photonen in messbare elektrische Signale um.

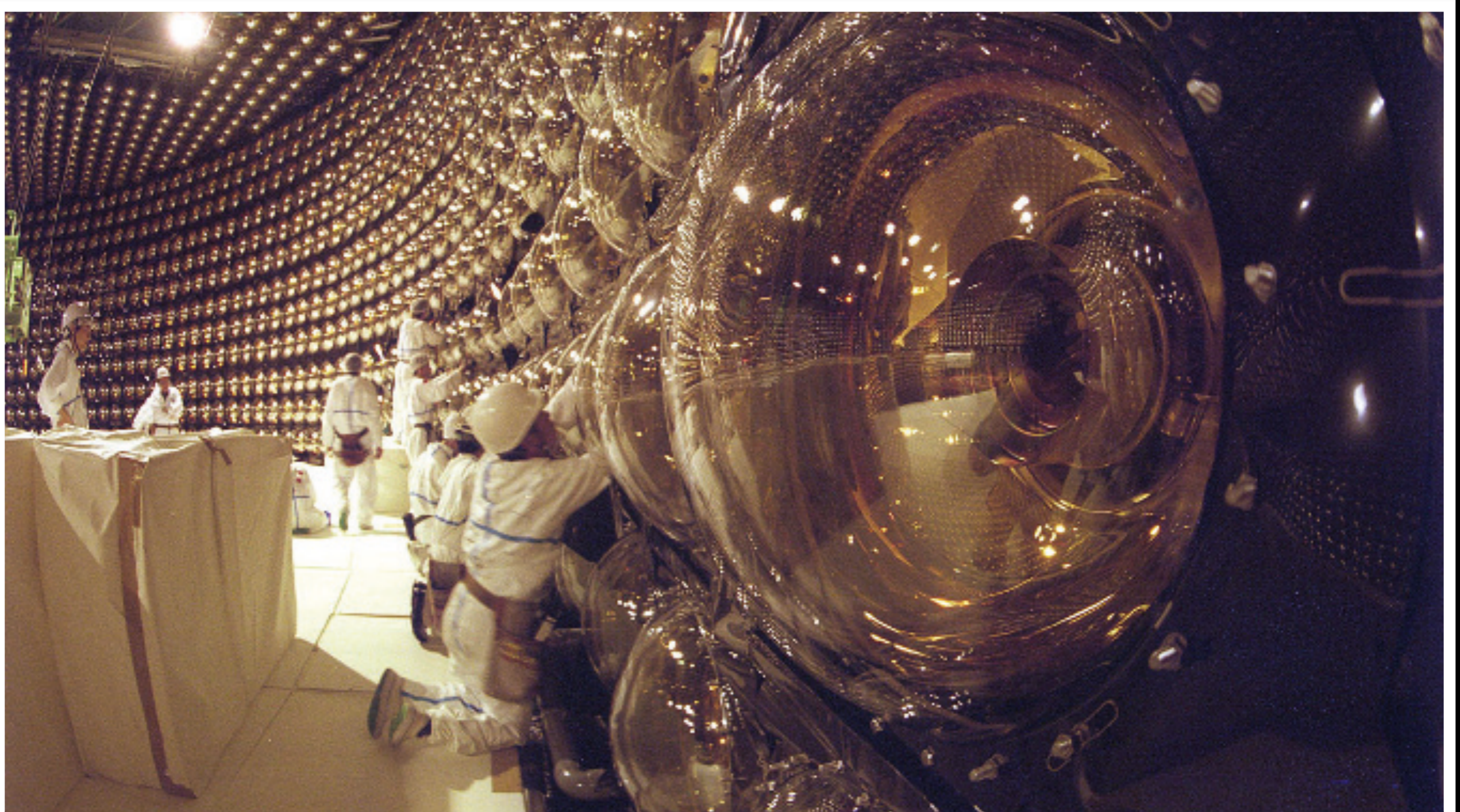
Dazu dient z.B. ein **evakuierter Glaskolben**, wo ein Photon durch den Photoeffekt ein Elektron herauslöst.

Dahinter befinden sich eine Kette von Elektroden (sog. **Dynoden**), wo eine wachsende elektrische Spannung angelegt wird.

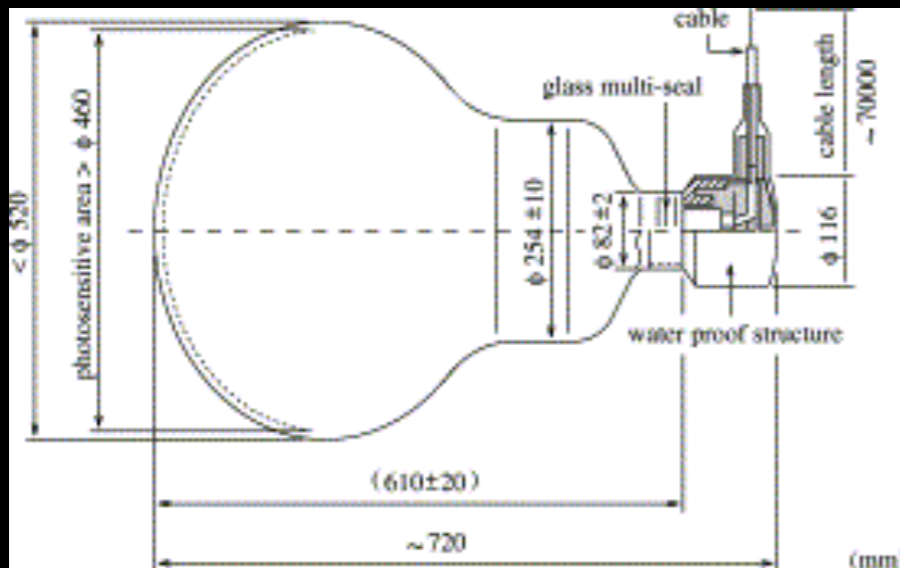
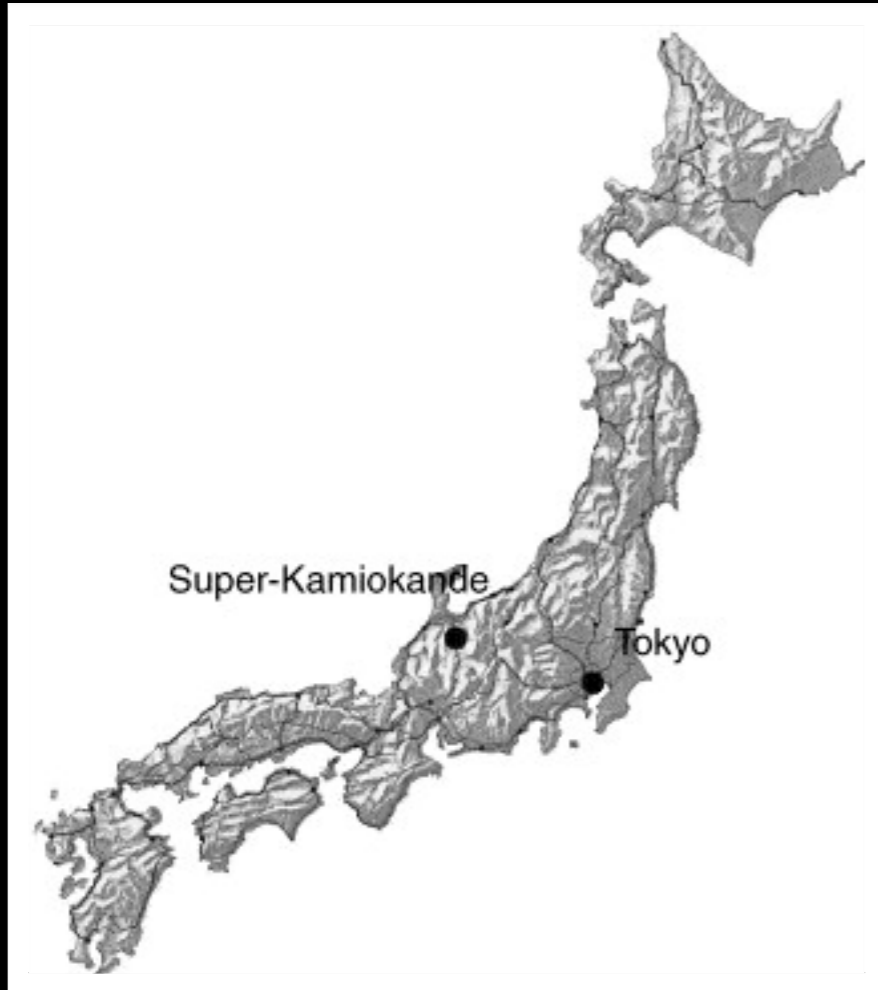


Bei der ersten Elektrode werden beim Auftreffen weitere Elektronen herausgeschlagen und am Ende entsteht ein messbares Signal aus Millionen von Elektronen

Die weltweit größten Photomultiplier werden beim Super-Kamiokande Neutrinoexperiment eingesetzt.



Durchmesser ca. 63.5 cm



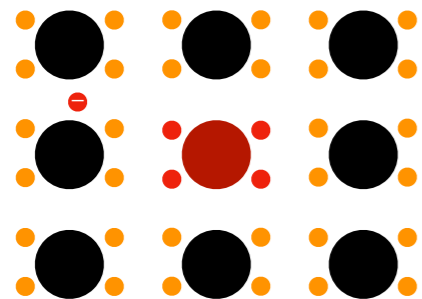
光電子増倍管
光電子増倍管は、受光面がとらえた光を電子に変え、内部の電極で増幅する。スーパーカミオカンデの光電子増倍管は、世界でもっとも大きな受光面積をもち、1個の光子を1000万個の電子に増幅することができる。

Kann auch kompakt mit Halbleitern umgesetzt werden
(**Silicon Photomultiplier** oder kurz **SiPM**)

Photonen können hierbei Elektronen in Halbleitern herauslösen und unter dem anbringen einer externen Spannung entsteht eine **kompakte Lawine**, welche nachgewiesen werden kann.

Der Aufbau ist relativ simple und verwandt mit einer **pn-Photodiode**:

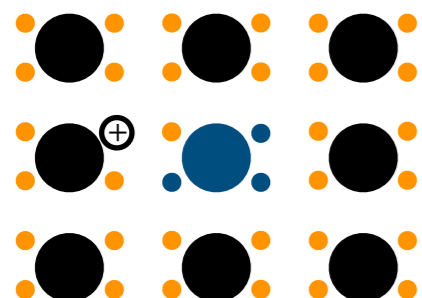
n Dotierung



Si: 4 Valenzelektronen

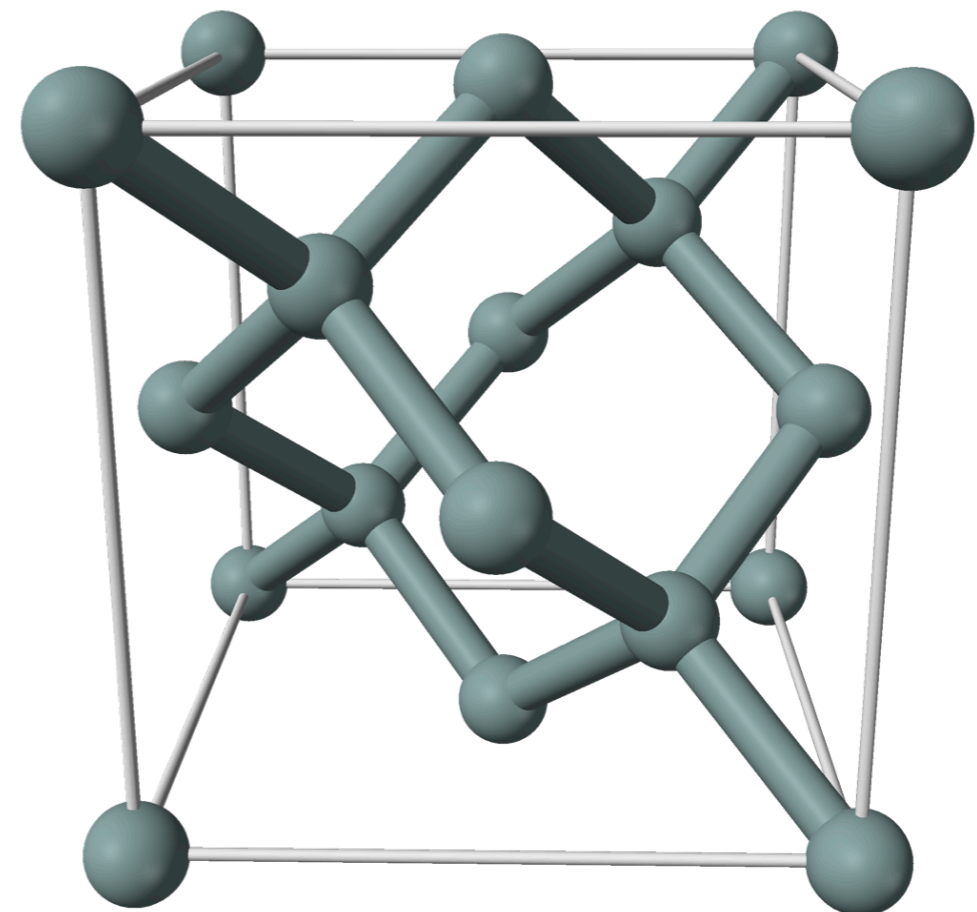
Phosphor: 5 Valenzelektronen

p Dotierung



Si: 4 Valenzelektronen

Bor: 3 Valenzelektronen

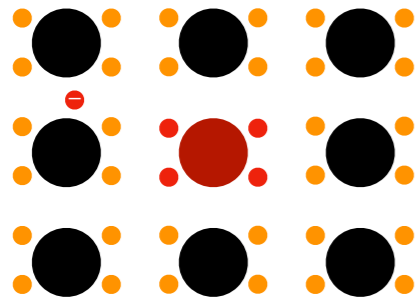


Kann auch kompakt mit Halbleitern umgesetzt werden
(**Silicon Photomultiplier** oder kurz **SiPM**)

Photonen können hierbei Elektronen in Halbleitern herauslösen und unter dem anbringen einer externen Spannung entsteht eine **kompakte Lawine**, welche nachgewiesen werden kann.

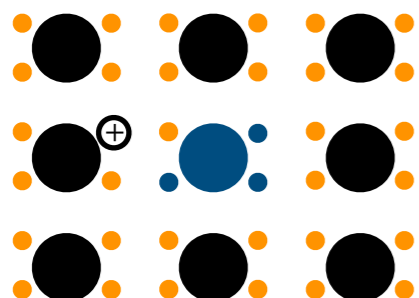
Der Aufbau ist relativ simple und verwandt mit einer **pn-Photodiode**:

n Dotierung

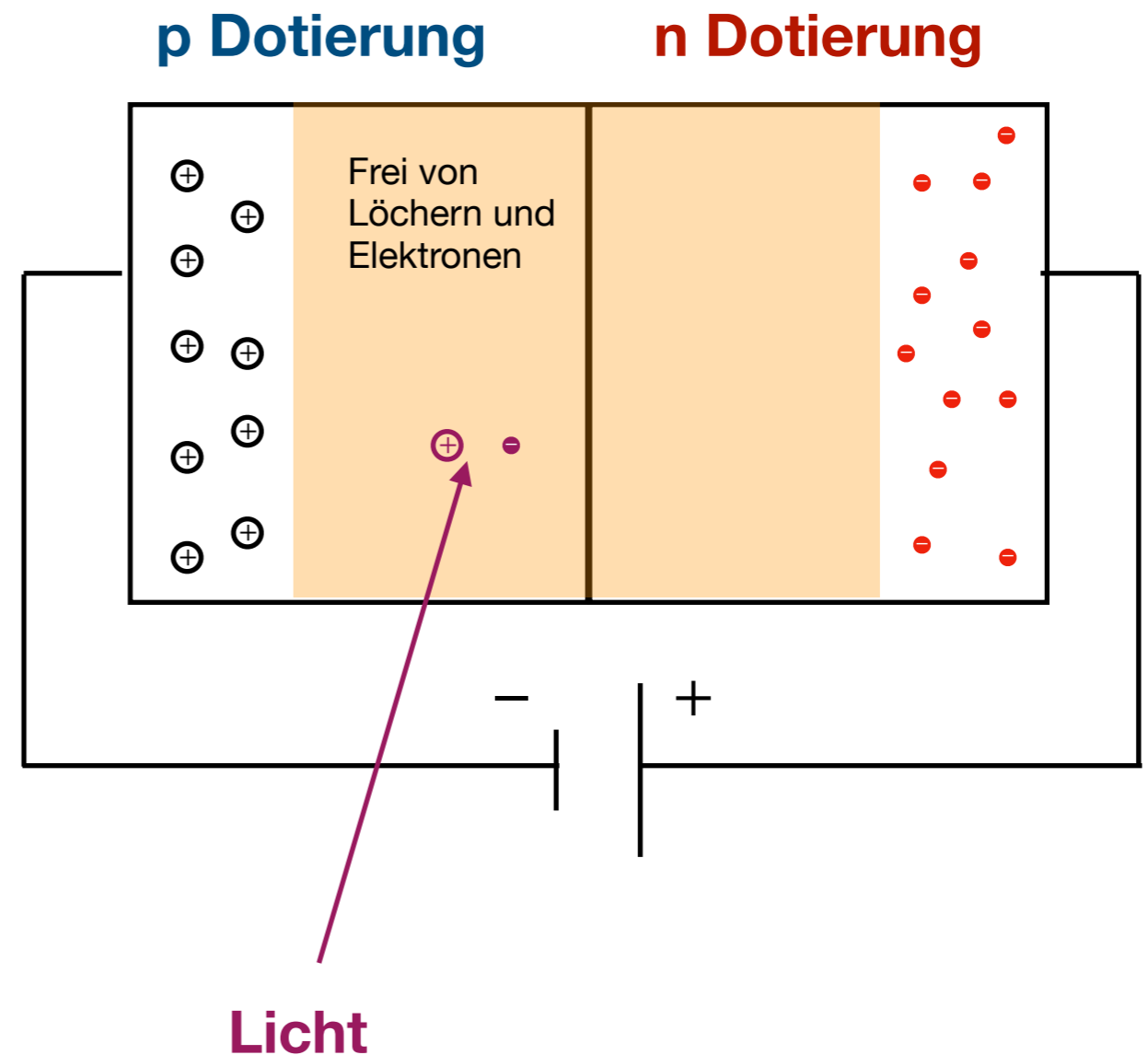


Si: 4 Valenzelektronen
Phosphor: 5 Valenzelektronen

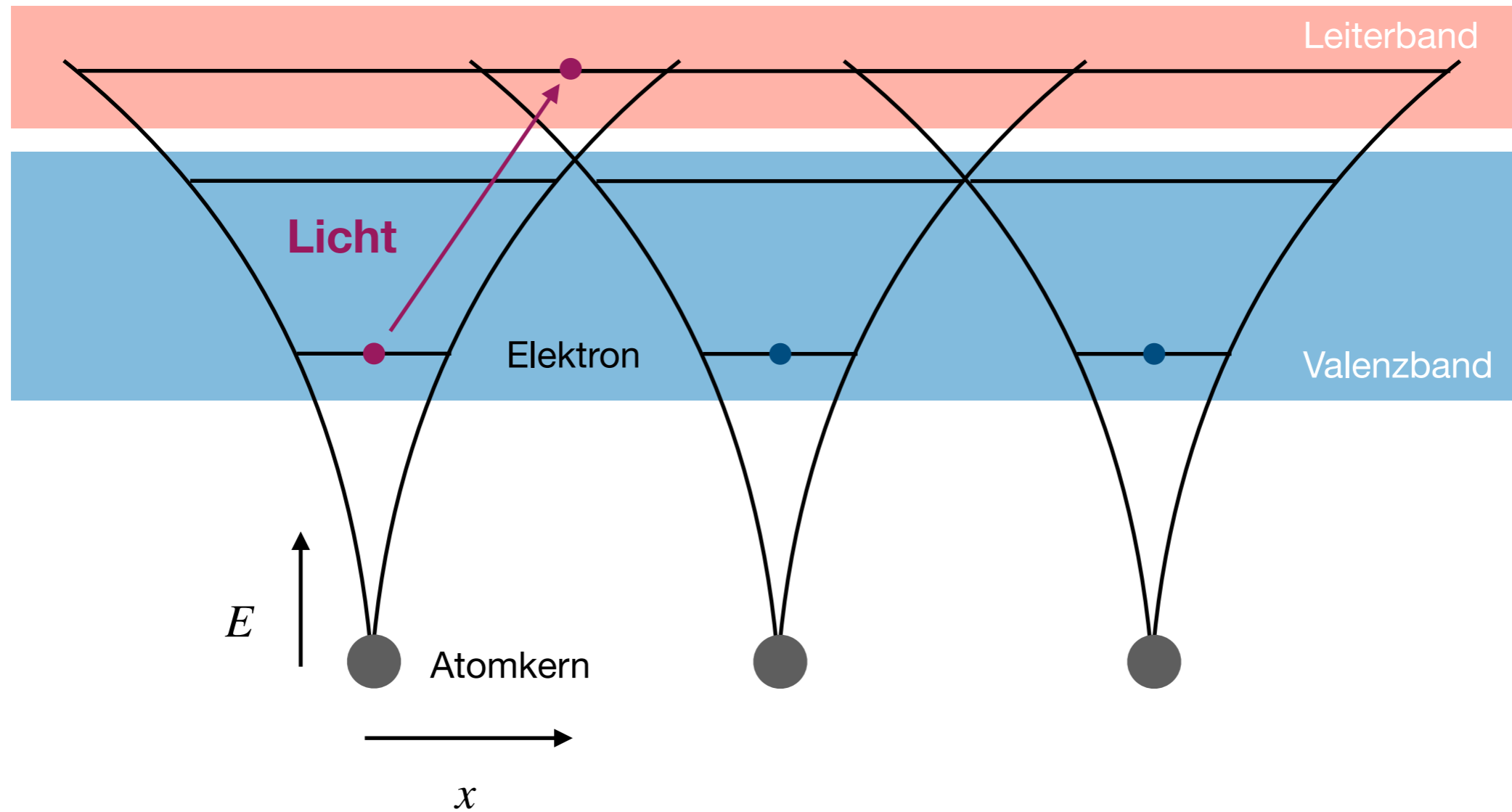
p Dotierung



Si: 4 Valenzelektronen
Bor: 3 Valenzelektronen



Licht sorgt dafür, dass ein Elektron ins Leiterband springt und ein positives Loch entsteht

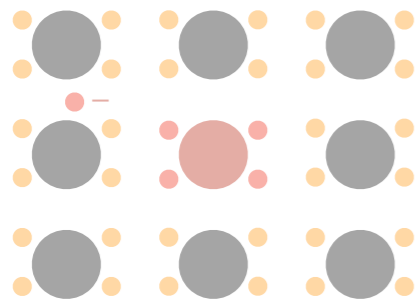


Kann auch kompakt mit Halbleitern umgesetzt werden
(**Silicon Photomultiplier** oder kurz **SiPM**)

Photonen können hierbei Elektronen in Halbleitern herauslösen und unter dem anbringen einer externen Spannung entsteht eine **kompakte Lawine**, welche nachgewiesen werden kann.

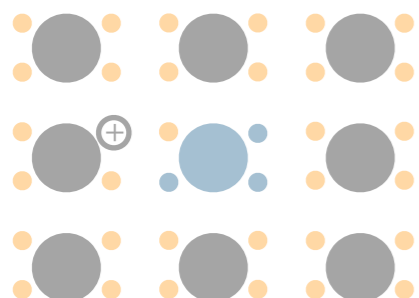
Der Aufbau ist relativ simple und verwandt mit einer **pn-Photodiode**:

n Dotierung

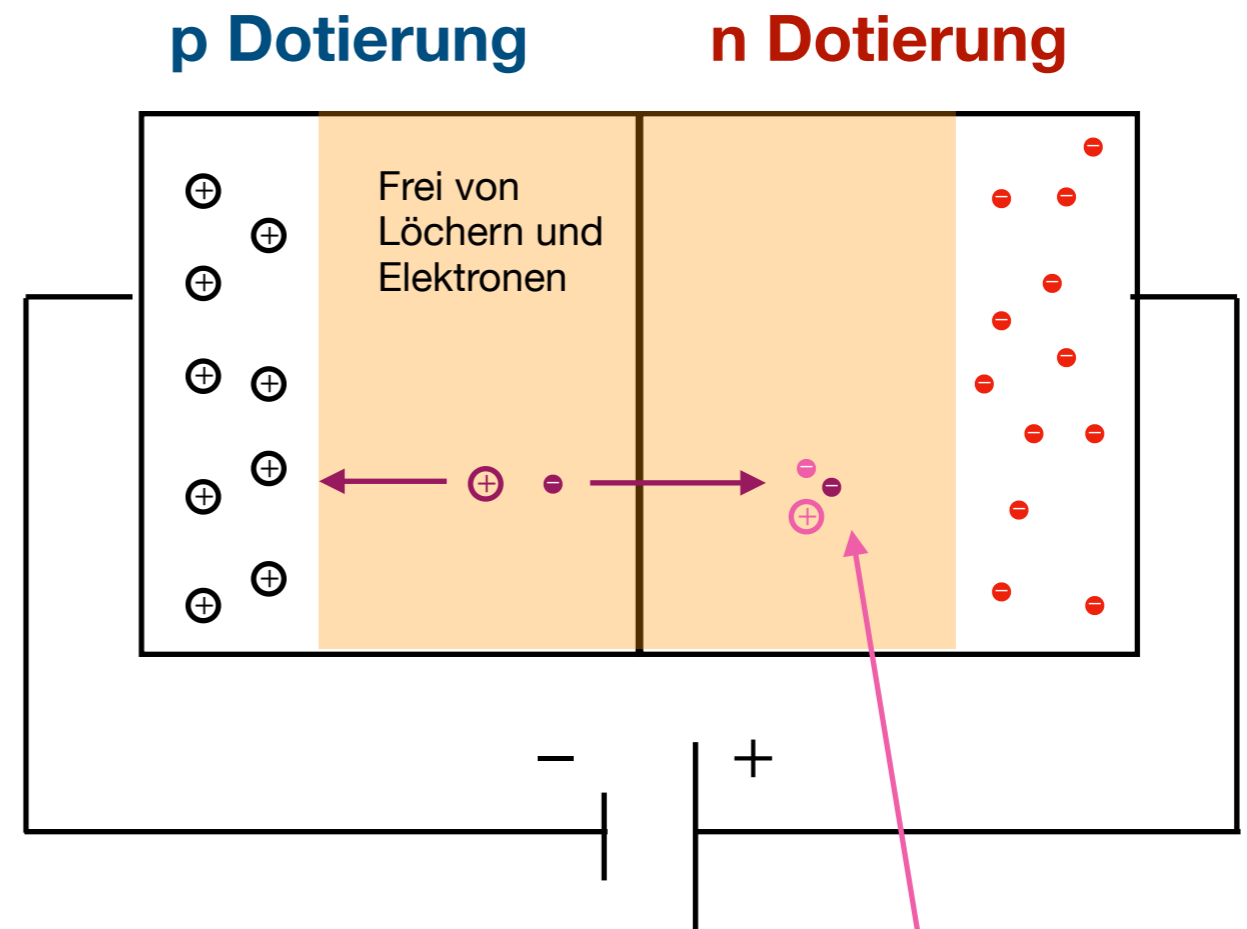


Si: 4 Valenzelektronen
Phosphor: 5 Valenzelektronen

p Dotierung



Si: 4 Valenzelektronen
Bor: 3 Valenzelektronen



Ein Strom fängt an zu fließen.

SiPMs koppeln diesen Prozess und produzieren eine **Ladungslawine**, indem sie das Elektron stark **beschleunigen** und weitere Atome **ionisieren**.

Oft ist eine der zentralen Fragen in der Teilchenphysik:

Woher kommen die Teilchen, wohin gehen sie und mit welchem Impuls?

Oft ist eine der zentralen Fragen in der Teilchenphysik:

Woher kommen die Teilchen, wohin gehen sie und mit welchem Impuls?

Damit ein Detektor diese Fragen beantworten kann, muss er folgende Kriterien erfüllen:

1) Sollte er leicht von Teilchen durchdrungen werden können, denn die Bahn soll so wenig wie möglich beeinträchtigt werden.

Oft ist eine der zentralen Fragen in der Teilchenphysik:

Woher kommen die Teilchen, wohin gehen sie und mit welchem Impuls?

Damit ein Detektor diese Fragen beantworten kann, muss er folgende Kriterien erfüllen:

1) Sollte er leicht von Teilchen durchdrungen werden können, denn die Bahn soll so wenig wie möglich beeinträchtigt werden.

2) Er soll sehr genau die Position des Teilchendurchgangs messen können.

Typische Unsicherheiten auf die Ortsmessung sind zwischen **0.1 mm - 0.05 mm**

Oft ist eine der zentralen Fragen in der Teilchenphysik:

Woher kommen die Teilchen, wohin gehen sie und mit welchem Impuls?

Damit ein Detektor diese Fragen beantworten kann, muss er folgende Kriterien erfüllen:

1) Sollte er leicht von Teilchen durchdrungen werden können, denn die Bahn soll so wenig wie möglich beeinträchtigt werden.

2) Er soll sehr genau die Position des Teilchendurchgangs messen können.

Typische Unsicherheiten auf die Ortsmessung sind zwischen **0.1 mm - 0.05 mm**

3) Der Detektor ist oft in ein magnetisches Feld eingebettet. Dies dient der Impulsmessung.

Zusammenhang zwischen Radius, magnetischem Feld und Geschwindigkeit eines Teilchens:

$$mv = qBr$$

Oft ist eine der zentralen Fragen in der Teilchenphysik:

Woher kommen die Teilchen, wohin gehen sie und mit welchem Impuls?

Damit ein Detektor diese Fragen beantworten kann, muss er folgende Kriterien erfüllen:

1) Sollte er leicht von Teilchen durchdrungen werden können, denn die Bahn soll so wenig wie möglich beeinträchtigt werden.

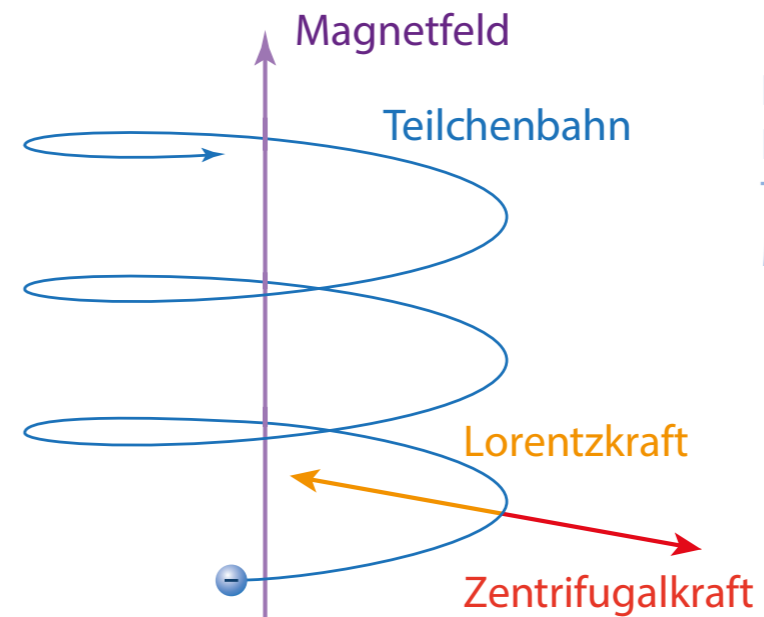
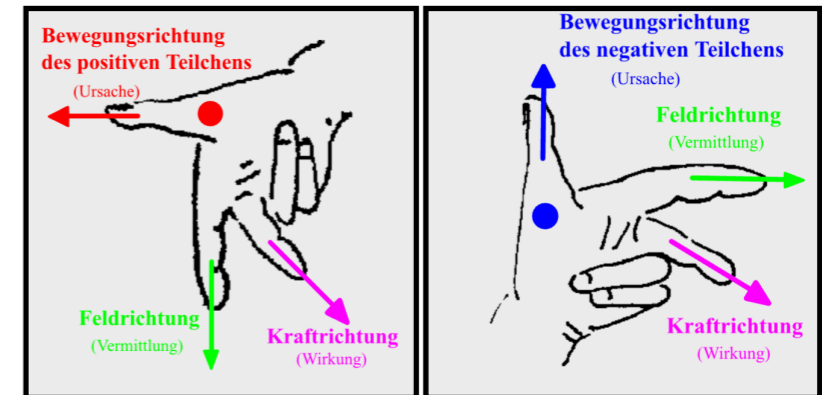
2) Er soll sehr genau die Position des Teilchendurchgangs messen können.

Typische Unsicherheiten auf die Ortsmessung sind zwischen **0.1 mm - 0.05 mm**

3) Der Detektor ist oft in ein magnetisches Feld eingebettet. Dies dient der Impulsmessung.

Zusammenhang zwischen Radius, magnetischem Feld und Geschwindigkeit eines Teilchens:

$$mv = qBr$$



Die spiralförmige Bahn eines geladenen Teilchens in einem Magnetfeld

Die gekrümmten Spuren vieler geladener Teilchen im ATLAS-Detektor



Oft ist eine der zentralen Fragen in der Teilchenphysik:

Woher kommen die Teilchen, wohin gehen sie und mit welchem Impuls?

Damit ein Detektor diese Fragen beantworten kann, muss er folgende Kriterien erfüllen:

1) Sollte er leicht von Teilchen durchdrungen werden können, denn die Bahn soll so wenig wie möglich beeinträchtigt werden.

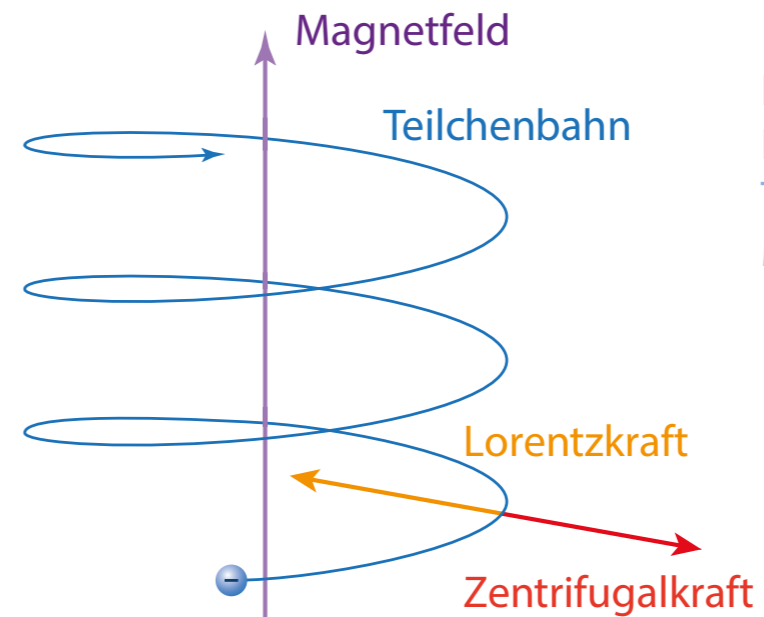
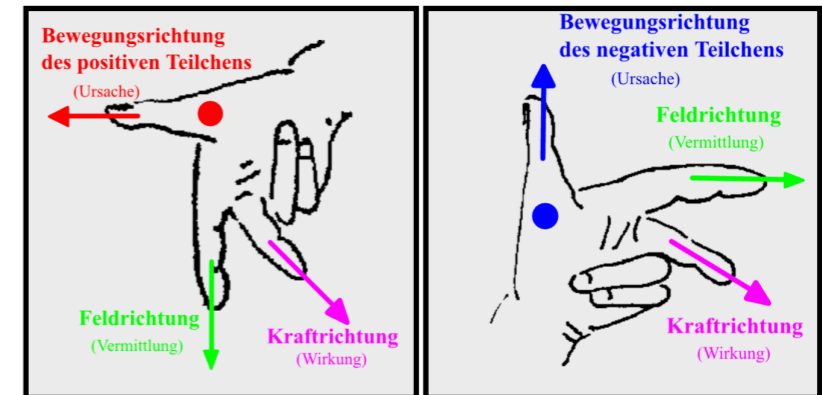
2) Er soll sehr genau die Position des Teilchendurchgangs messen können.

Typische Unsicherheiten auf die Ortsmessung sind zwischen **0.1 mm - 0.05 mm**

3) Der Detektor ist oft in ein magnetisches Feld eingebettet. Dies dient der Impulsmessung.

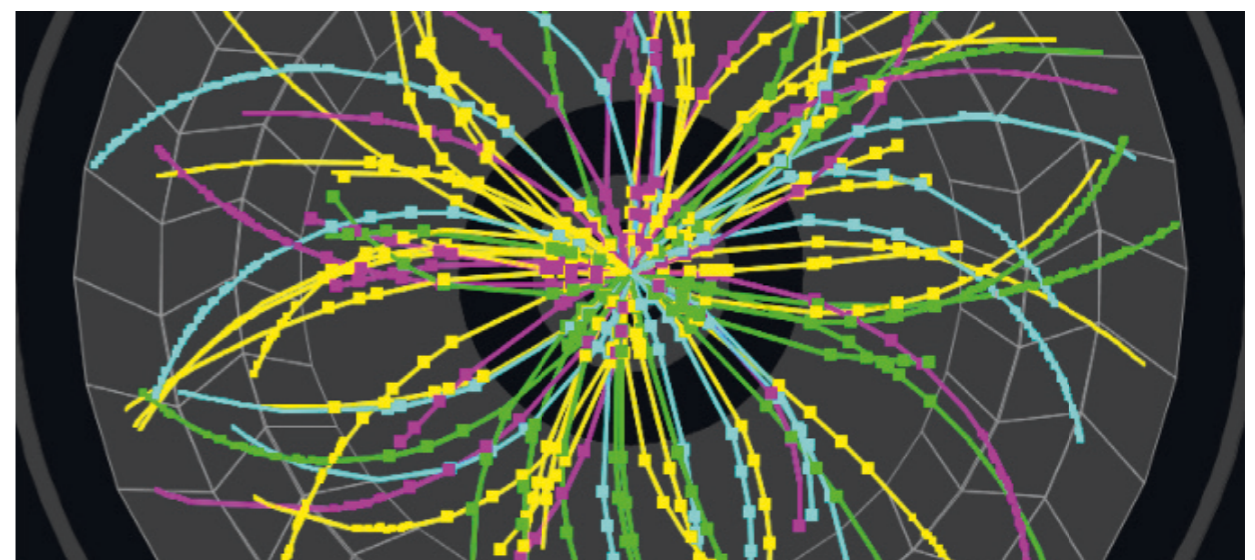
Zusammenhang zwischen Radius, magnetischem Feld und Geschwindigkeit eines Teilchens:

$$mv = qBr$$



Die spiralförmige Bahn eines geladenen Teilchens in einem Magnetfeld

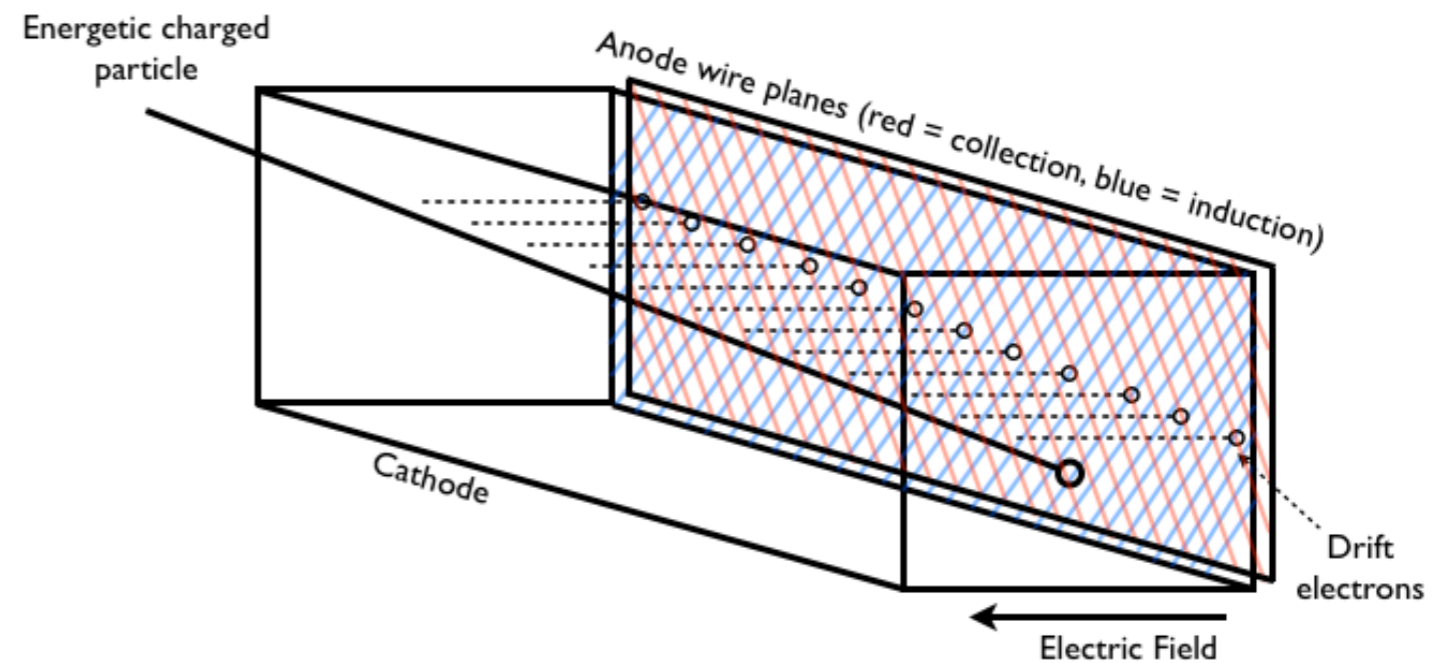
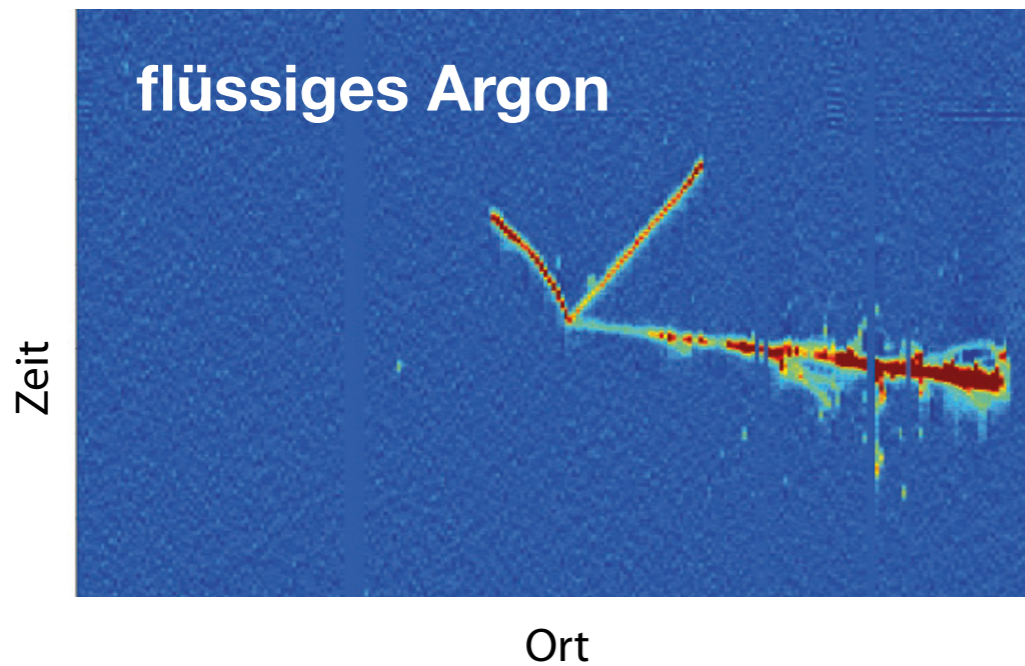
Die gekrümmten Spuren vieler geladener Teilchen im ATLAS-Detektor



Alle Detektoren für Orts- und Impulsmessungen **nutzen** die **Ionisation** um ein Signal zu erzeugen.

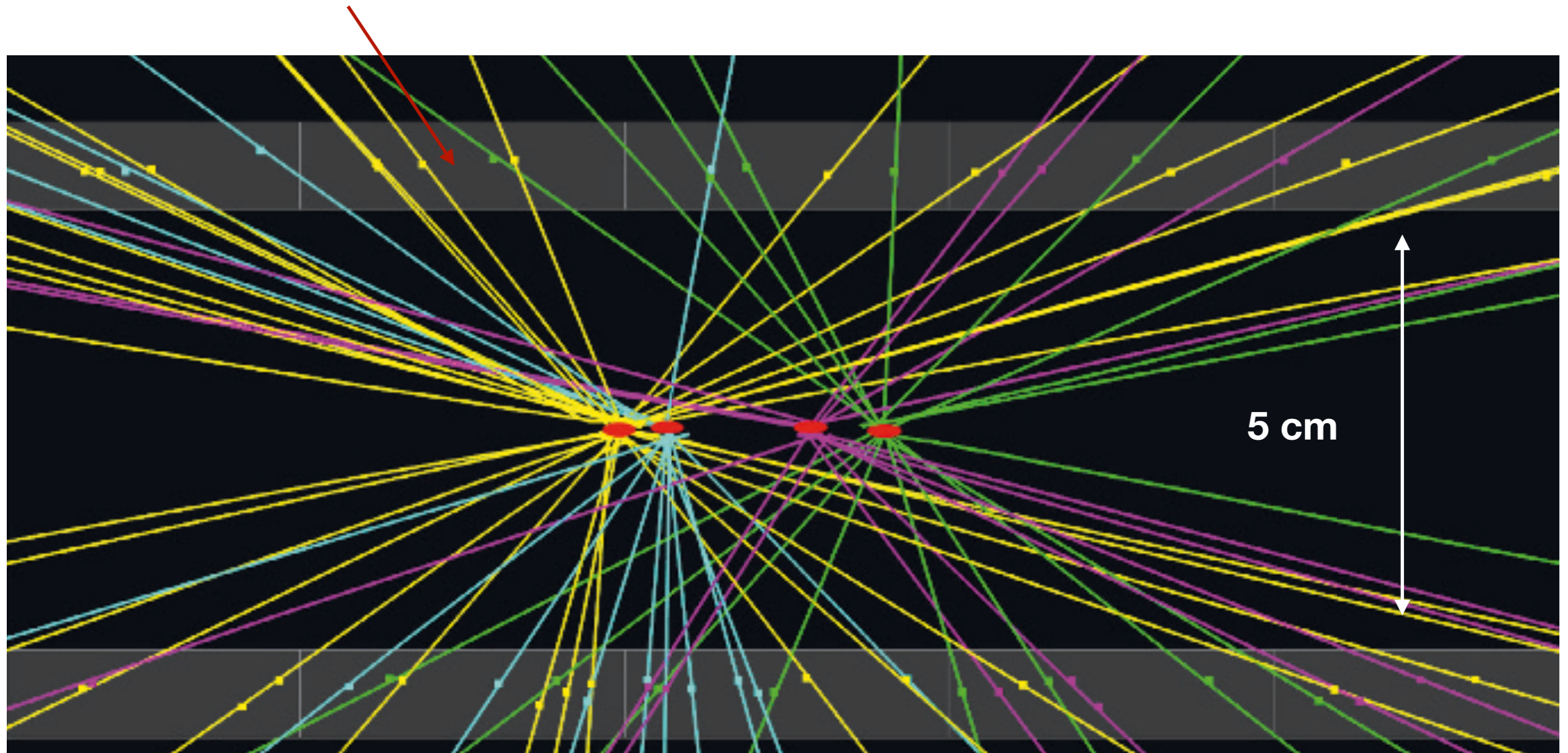
Das bedeutet, dass typischerweise nur **elektrisch** geladene Teilchen **kontinuierlich** verfolgt werden können, da sich **neutrale** Teilchen erst in **andere Teilchen umwandeln** müssen, bevor sie Ionisation erzeugen!

Als **Detektoren**, die 1-3 erfüllen, kommen quasi kontinuierlich messende Detektoren in Frage, z.B. **Zeitprojektionskammern**:



Ein Beispiel für einen Detektor, der **nicht** jede Spur, die eines Teilchen durch den Detektor zurücklegt, an quasi jeder Stelle misst, ist der **ATLAS-Detektor** :

Siliziumdetektoren (0.1 mm dick)



Wieviele Kalorien isst der Detektor? :-)

Detektoren, die Energie von Teilchen messen, heißen **Kalorimeter**.

In einem Kalorimeter wird die **Bewegungsenergie** eines Teilches ganz oder teilweise in eine andere Energieform **ungewandelt**.

Wieviele Kalorien isst der Detektor? :-)

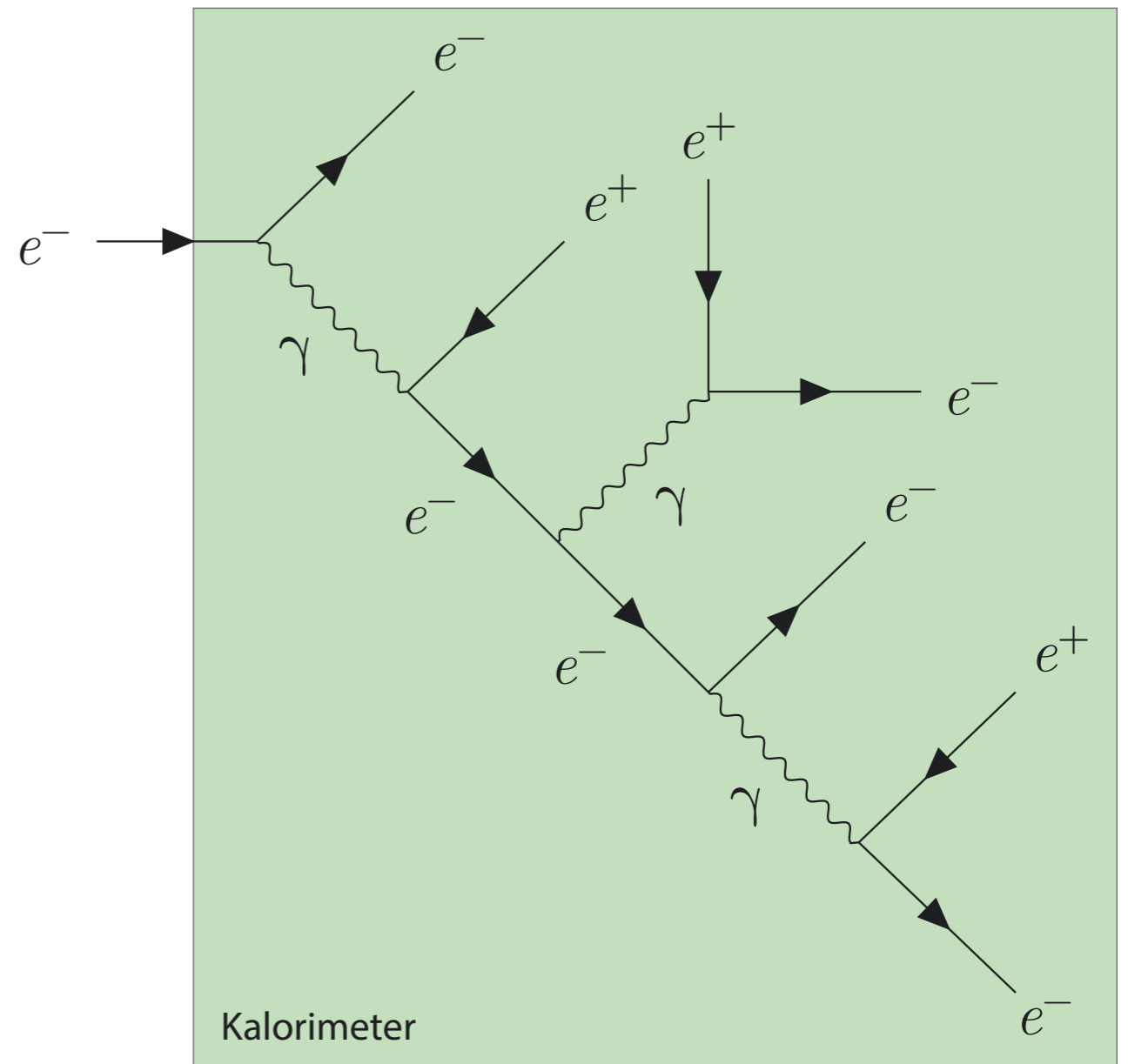
Detektoren, die Energie von Teilchen messen, heißen **Kalorimeter**.

In einem Kalorimeter wird die **Bewegungsenergie** eines Teilches ganz oder teilweise in eine andere Energieform **ungewandelt**.

Das ursprüngliche Teilchen wird dadurch im Kalorimeter **eingefangen** oder **vernichtet**.

Ein Kalorimeter wird typischerweise aus einem Material mit hoher Dichte konstruiert, damit die Teilchen ihre Energie auf engem Raum an den Detektor übertragen.

Beispiel: EM-Kalorimeter mit Kaskade von Wechselwirkungen mit den elektrischen Feldern der Kerne.



In den meisten modernen Kalorimetern wird statt der Temperaturerhöhung ein direktes elektronisches Signal ausgewertet.

Dazu werden hauptsächlich **zwei Methoden** verwendet :

1. Entweder werden Teilchen in einem dichten **Szintillator** gestoppt und die Energie über die Menge an Licht, die durch den Szintillator erzeugt wird, mit einem Photomultiplier gemessen.

In den meisten modernen Kalorimetern wird statt der Temperaturerhöhung ein direktes elektronisches Signal ausgewertet.

Dazu werden hauptsächlich **zwei Methoden** verwendet :

1. Entweder werden Teilchen in einem dichten **Szintillator** gestoppt und die Energie über die Menge an Licht, die durch den Szintillator erzeugt wird, mit einem Photomultiplier gemessen.
2. Oder man erzeugt **elektrische** Signale mit **Halbleiterdetektoren** oder flüssigen Edelgasdetektoren.

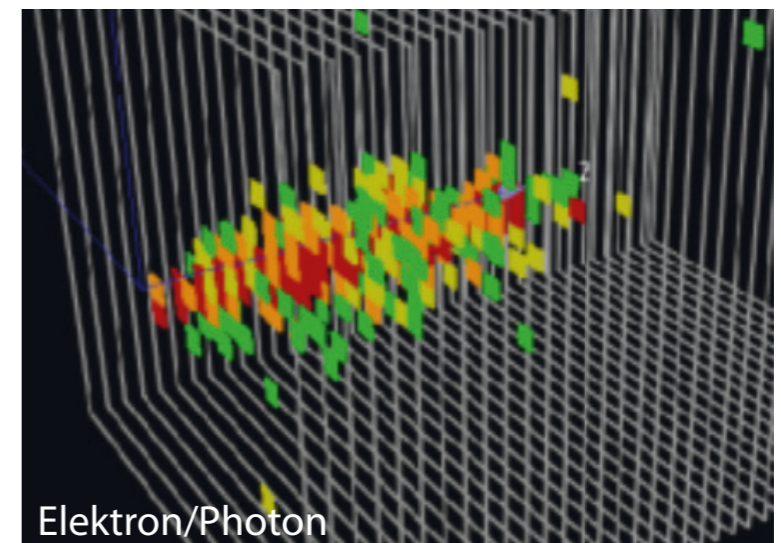
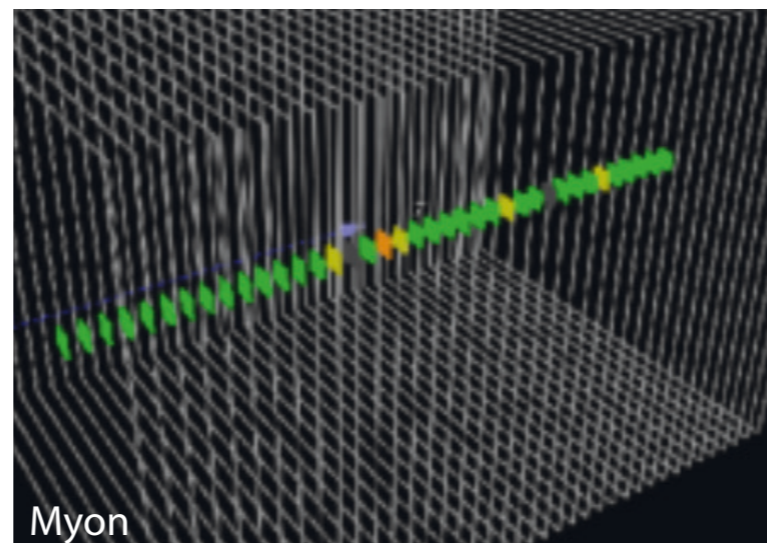
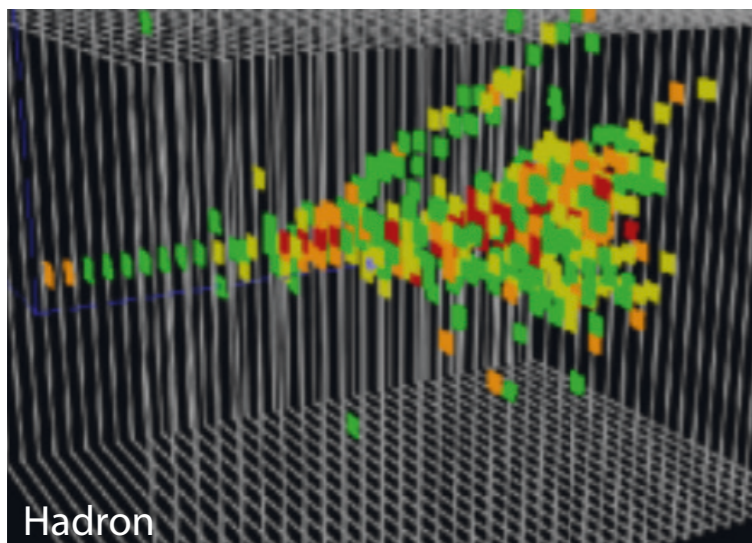
In den meisten modernen Kalorimetern wird statt der Temperaturerhöhung ein direktes elektronisches Signal ausgewertet.

Dazu werden hauptsächlich **zwei Methoden** verwendet :

1. Entweder werden Teilchen in einem dichten **Szintillator** gestoppt und die Energie über die Menge an Licht, die durch den Szintillator erzeugt wird, mit einem Photomultiplier gemessen.
2. Oder man erzeugt **elektrische** Signale mit **Halbleiterdetektoren** oder flüssigen Edelgasdetektoren.

Man kann mit Kalorimetern auch zur **Identifikation** der Teilchenart nutzen.

Hadronen interagieren auch mit der starken WW und produzieren andere Schauer als nur EM interagierende Teilchen. Myonen interagieren durch ihre hohe Masse nur leicht :



Teilchenidentifikation durch unterschiedlich geformte Schauer im Kalorimeter

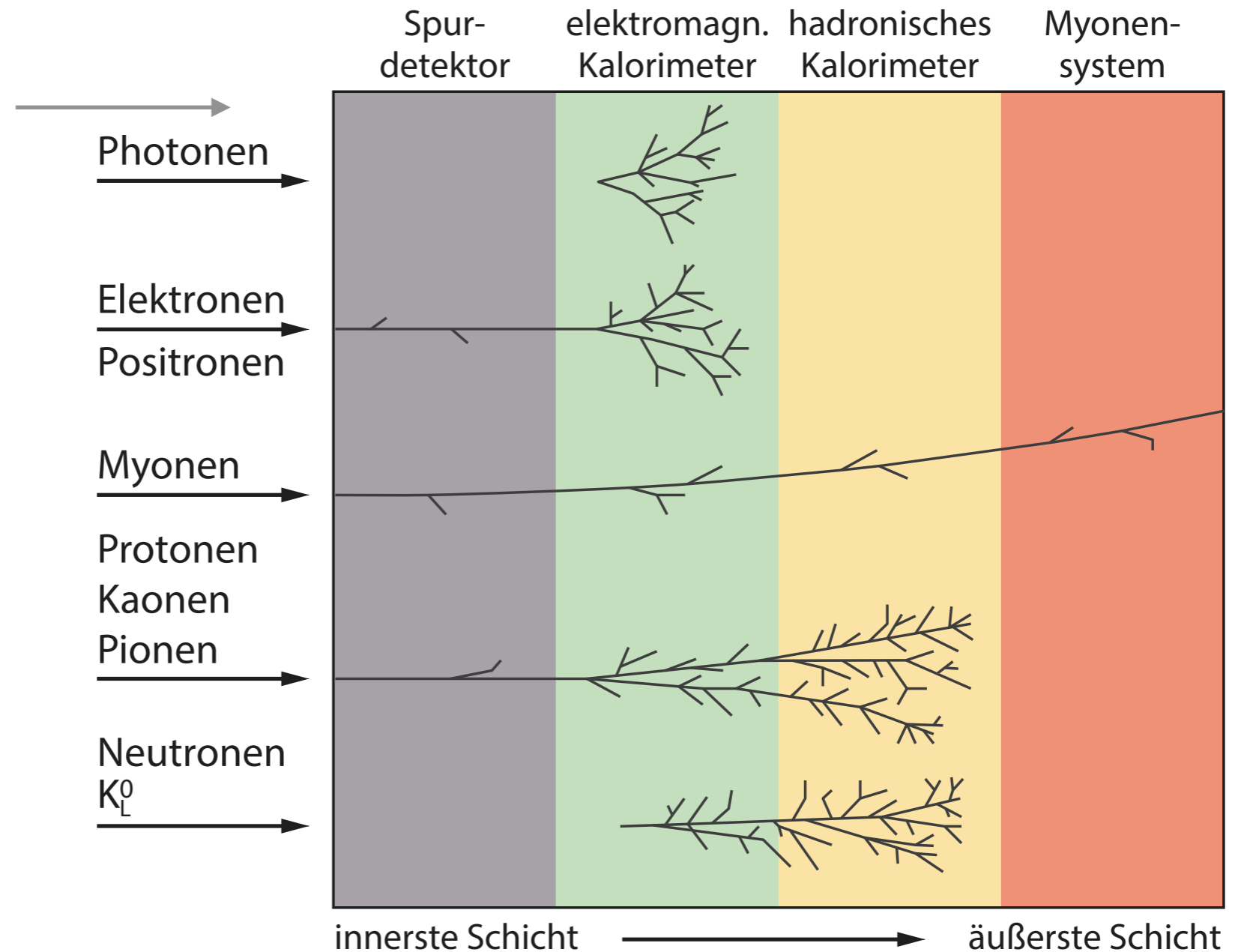
Signaturen von Teilchen in Detektoren

Die unterschiedlichen Detektoren zur Identifikation von unterschiedlichen Teilchen werden in Experimenten oft kombiniert um eine **Ganzheitliche Identifikation** der Teilchen zu **erlauben**.

Da unterschiedlich dichte Materialien unterschiedliche Signaturen erzeugen, sind viele Teilchendetektoren aus verschiedenen Subdetektoren zusammengesetzt.

Photon : Elektron / Positron : Myonen
: Hadronen : neutrale Hadronen

Einzig Neutrinos sind von unseren Detektoren äußerst unbeeindruckt.



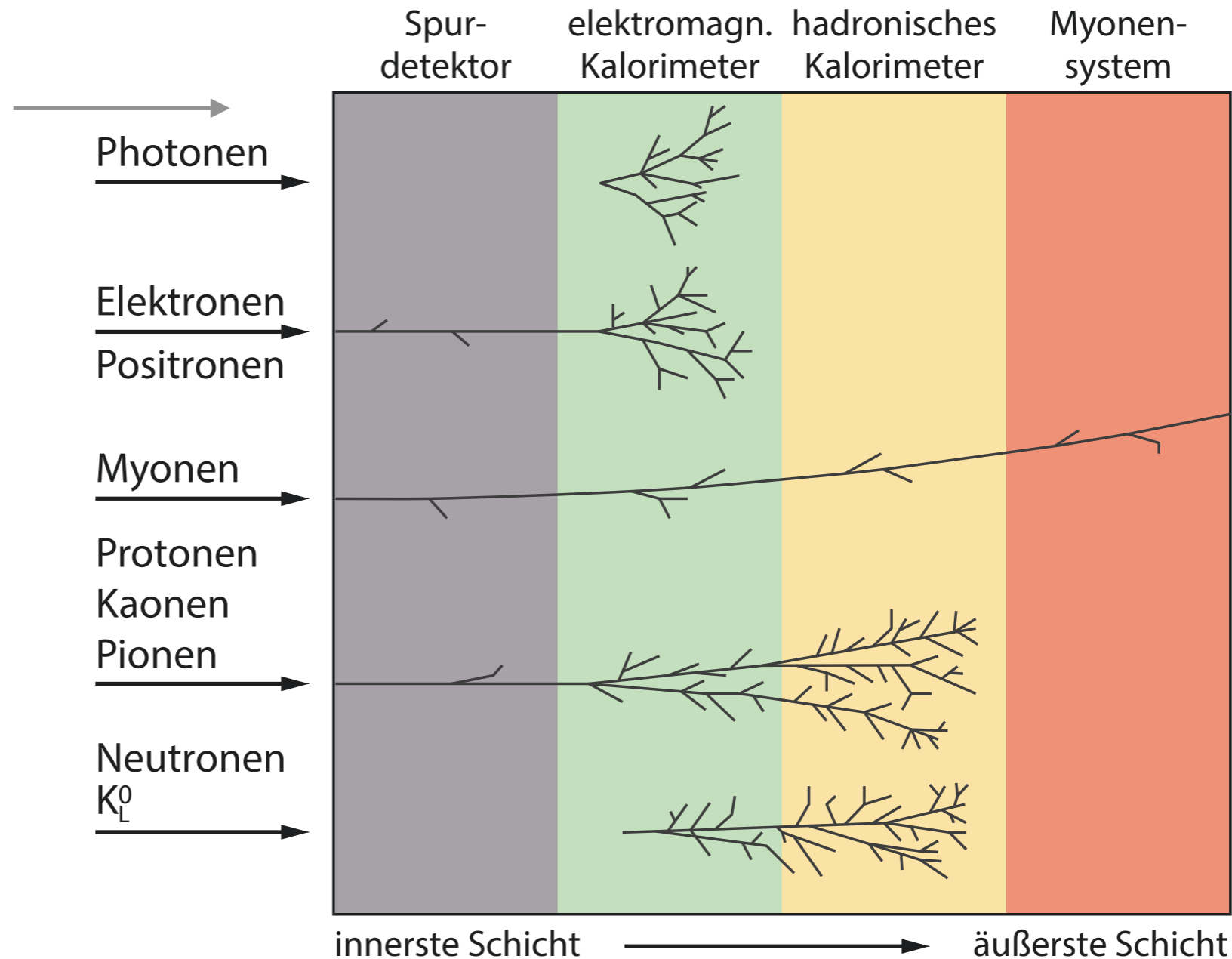
Signaturen von Teilchen in Detektoren

Die unterschiedlichen Detektoren zur Identifikation von unterschiedlichen Teilchen werden in Experimenten oft kombiniert um eine **Ganzheitliche Identifikation** der Teilchen zu **erlauben**.

Da unterschiedlich dichte Materialien unterschiedliche Signaturen erzeugen, sind viele Teilchendetektoren aus verschiedenen Subdetektoren zusammengesetzt.

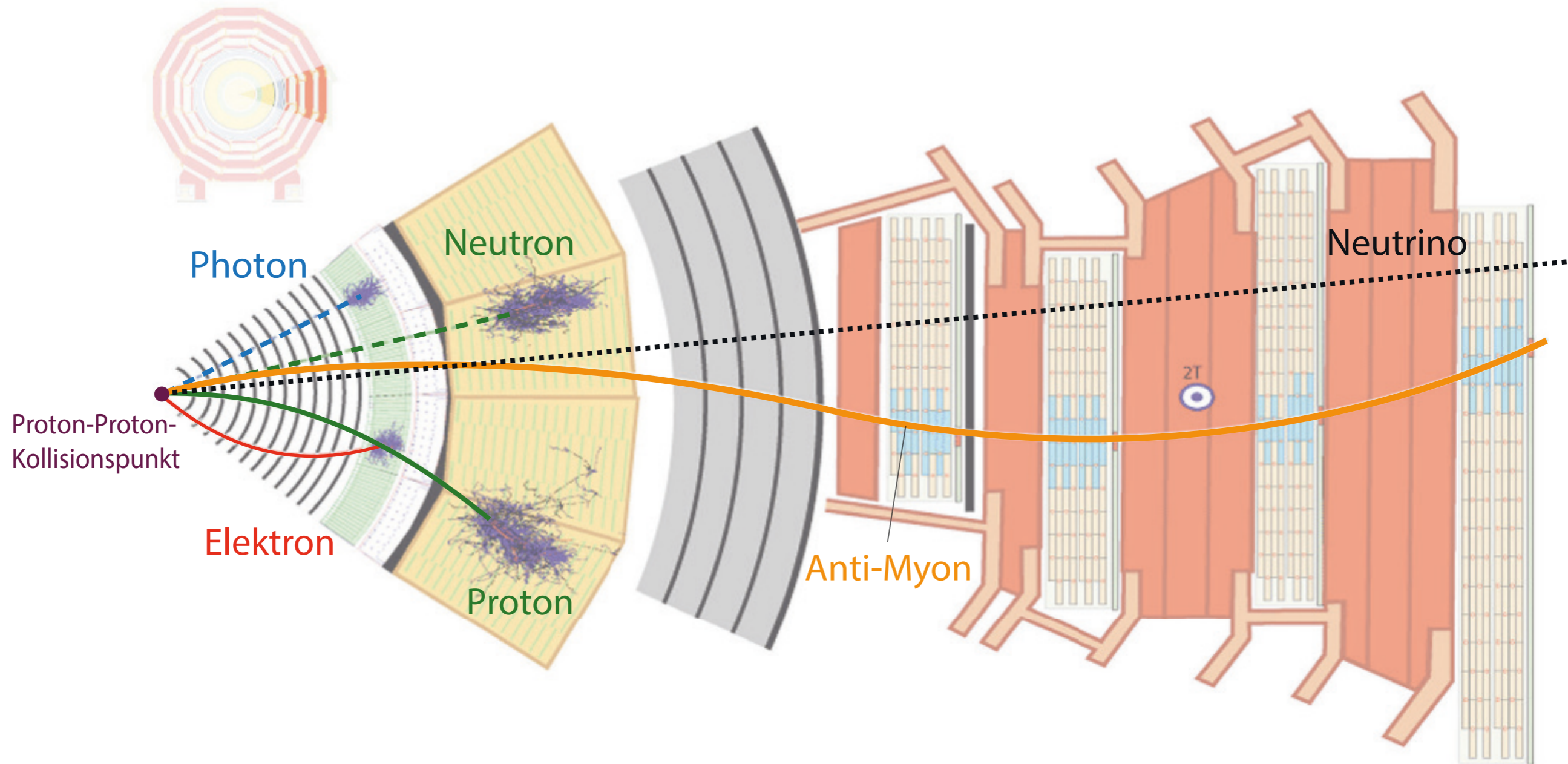
Photon : Elektron / Positron : Myonen
: Hadronen : neutrale Hadronen

Einzig Neutrinos sind von unseren Detektoren äußerst unbeeindruckt.



Nun beginnt eine Art **Puzzle**: Aus welcher **Wechselwirkung** im Vakuum des **Strahlrohrs** mag diese **Kombination** von **Teilchen** entstanden sein?

Einen **Schnitt** durch einen echten Teilchendetektor (CMS am LHC)

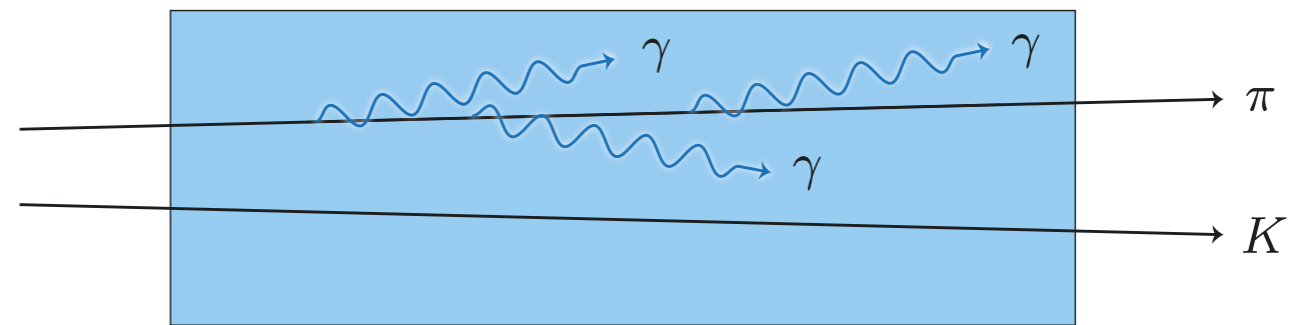


Pawel Čerenkov, Ilja Franck und Igor Tamm erhielten 1958 den **Nobelpreis** für die Entdeckung des **Čerenkov-Effekts**.

Bewegt sich ein **geladenes** Teilchen mit einer **Geschwindigkeit** v durch ein Medium, die **größer** ist als die **Lichtgeschwindigkeit** in diesem **Medium**, dann sendet es **charakteristische** EM Strahlung aus.

Es bildet sich eine Wellenfront :

Funktionsweise eines Schwellen-Čerenkovzählers: Der Brechungsindex des Gases im blauen Volumen ist so gewählt, dass die schnelleren Pionen Čerenkovlicht aussenden, während dies für die langsameren Kaonen nicht der Fall ist.



Die EM Strahlung tritt unter einem Winkel ϑ gegenüber der Spur des Teilchens aus

$$\cos(\vartheta) = \frac{c_{\text{Medium}}}{v} = \frac{c}{nv},$$

Brechungsindex

Kennt man nun den **Impuls** ($p = mv$), dann kann man mit der Messung von ϑ die Masse des Teilchens und damit die Teilchenart bestimmen.

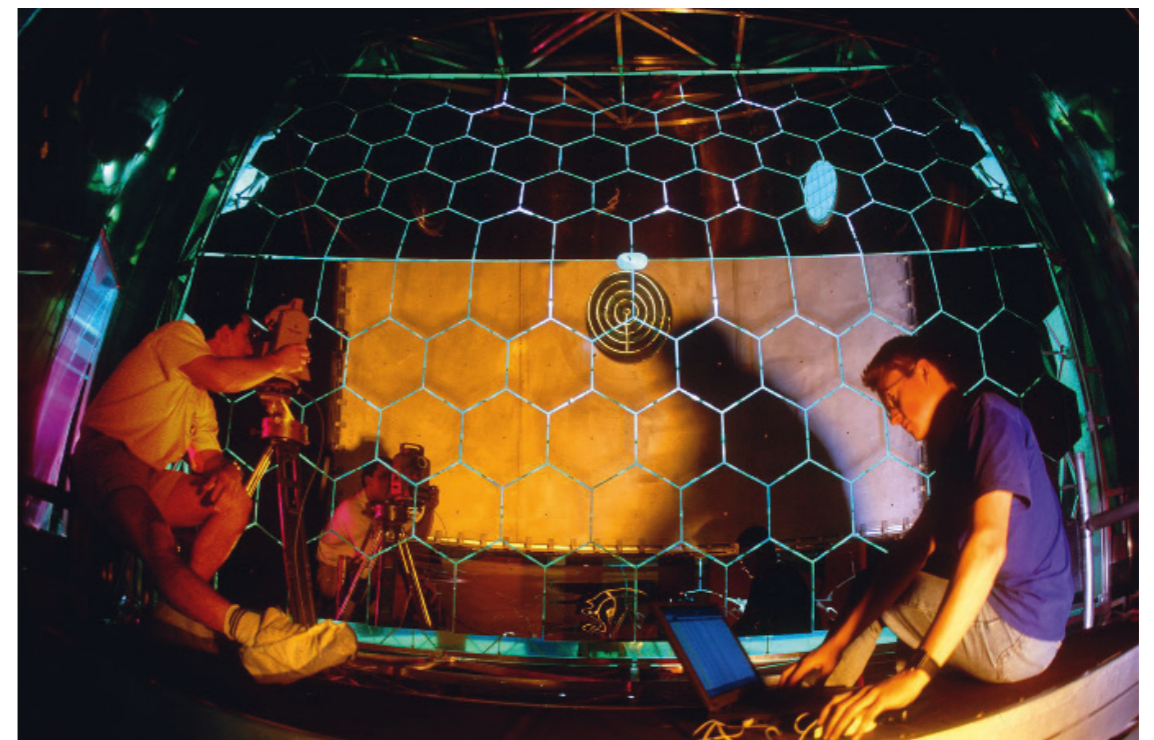
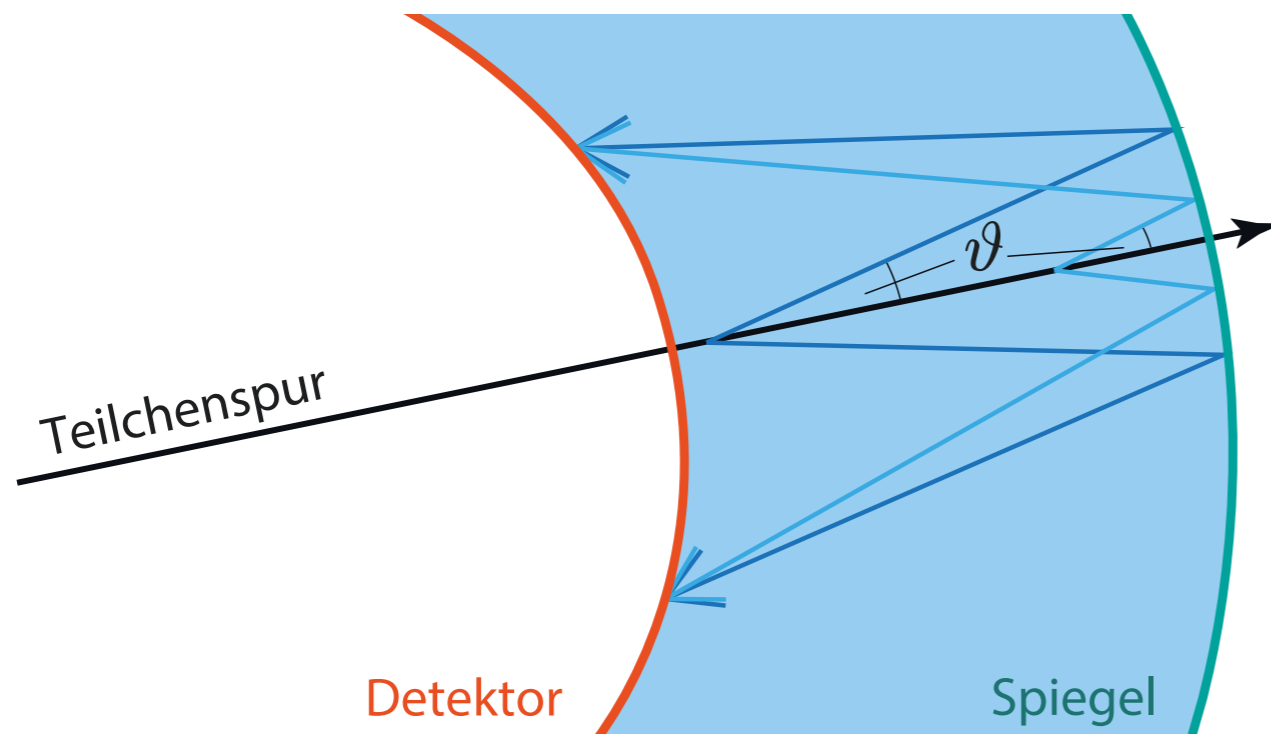
Die EM Strahlung tritt unter einem Winkel ϑ gegenüber der Spur des Teilchens aus

$$\cos(\vartheta) = \frac{c_{\text{Medium}}}{v} = \frac{c}{nv},$$

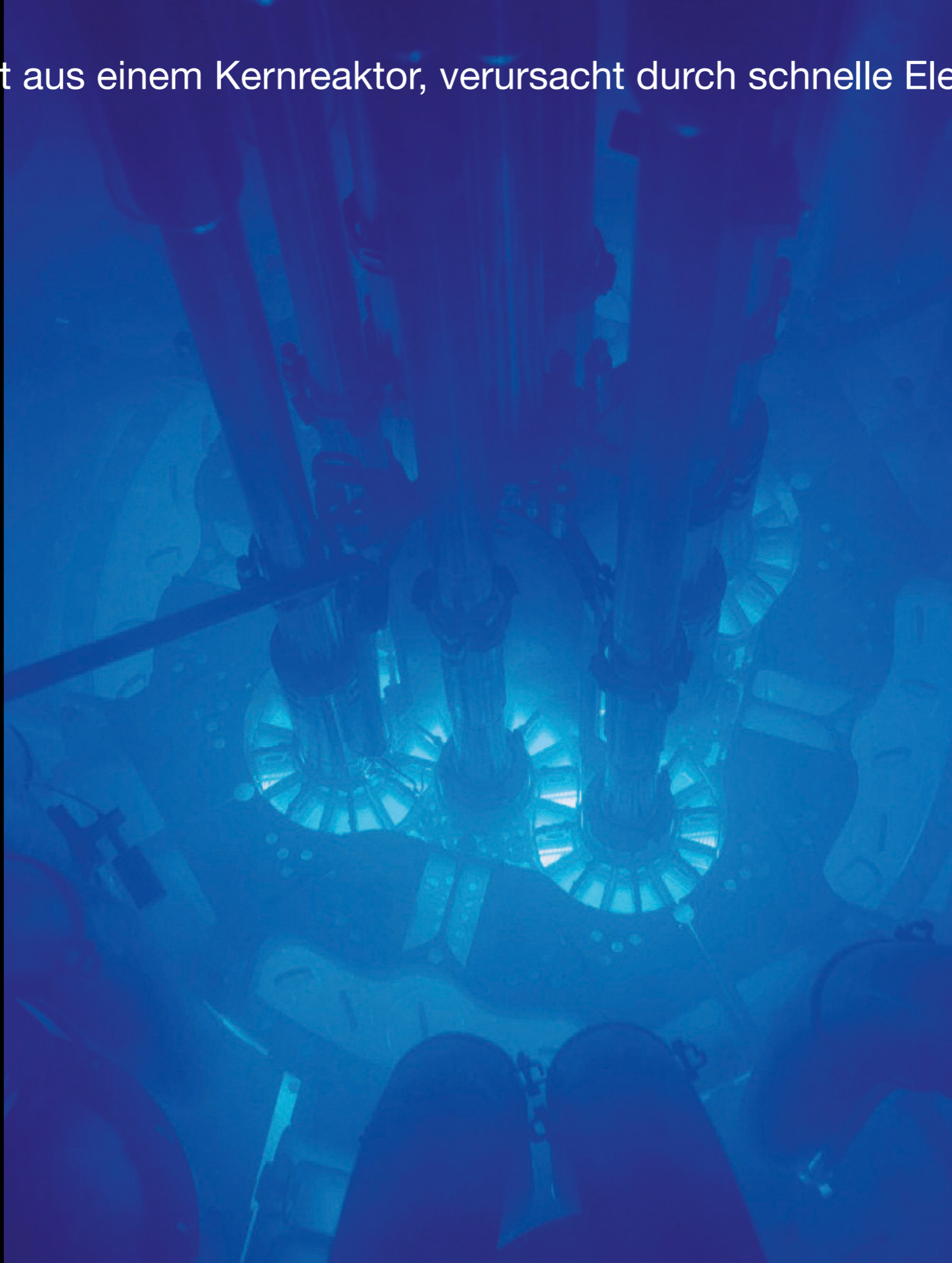
Brechungsindex

Kennt man nun den **Impuls** ($p = mv$), dann kann man mit der Messung von ϑ die Masse des Teilchens und damit die Teilchenart bestimmen.

Oft baut man sog. Ring Imaging Čerenkov (RICH) Detectors, welche mit Spiegeln die Ringe von Čerenkov-Licht aufzeichnen können:



Čerenkov-Licht aus einem Kernreaktor, verursacht durch schnelle Elektronen im Wasser.

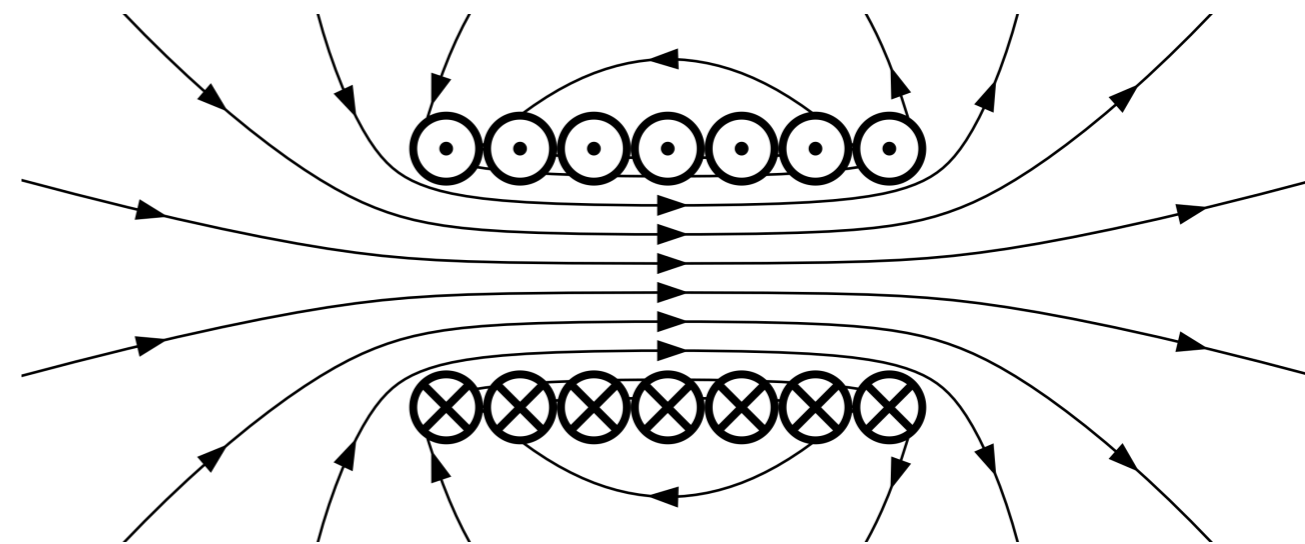
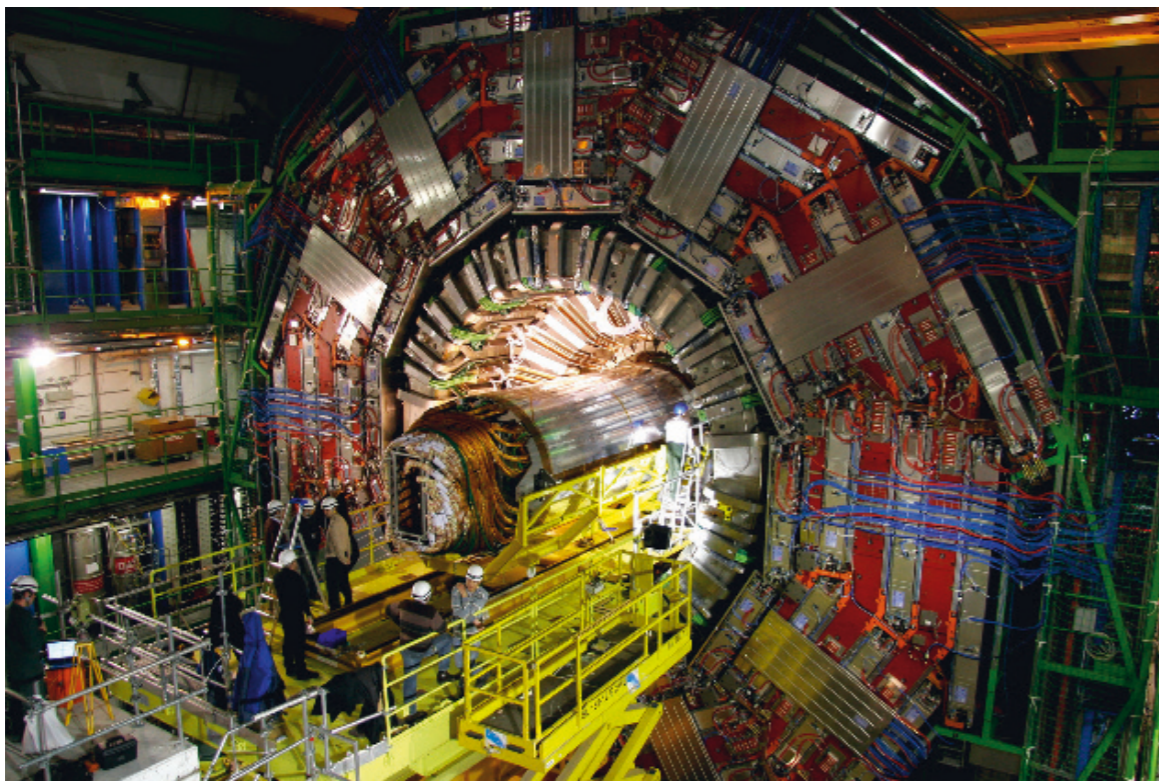


Teilchenphysikdetektoren gibt es in vielen Varianten. Die **meisten** Detektoren kann man in zwei Kategorien einteilen: *Collider* oder *Fixed-Target*-Experimente

Der CMS-Detektor ist einer der beiden großen Mehrzweck-Detektoren für Collider-Experimente am CERN. Der Name steht für **Compact Muon Solenoid**

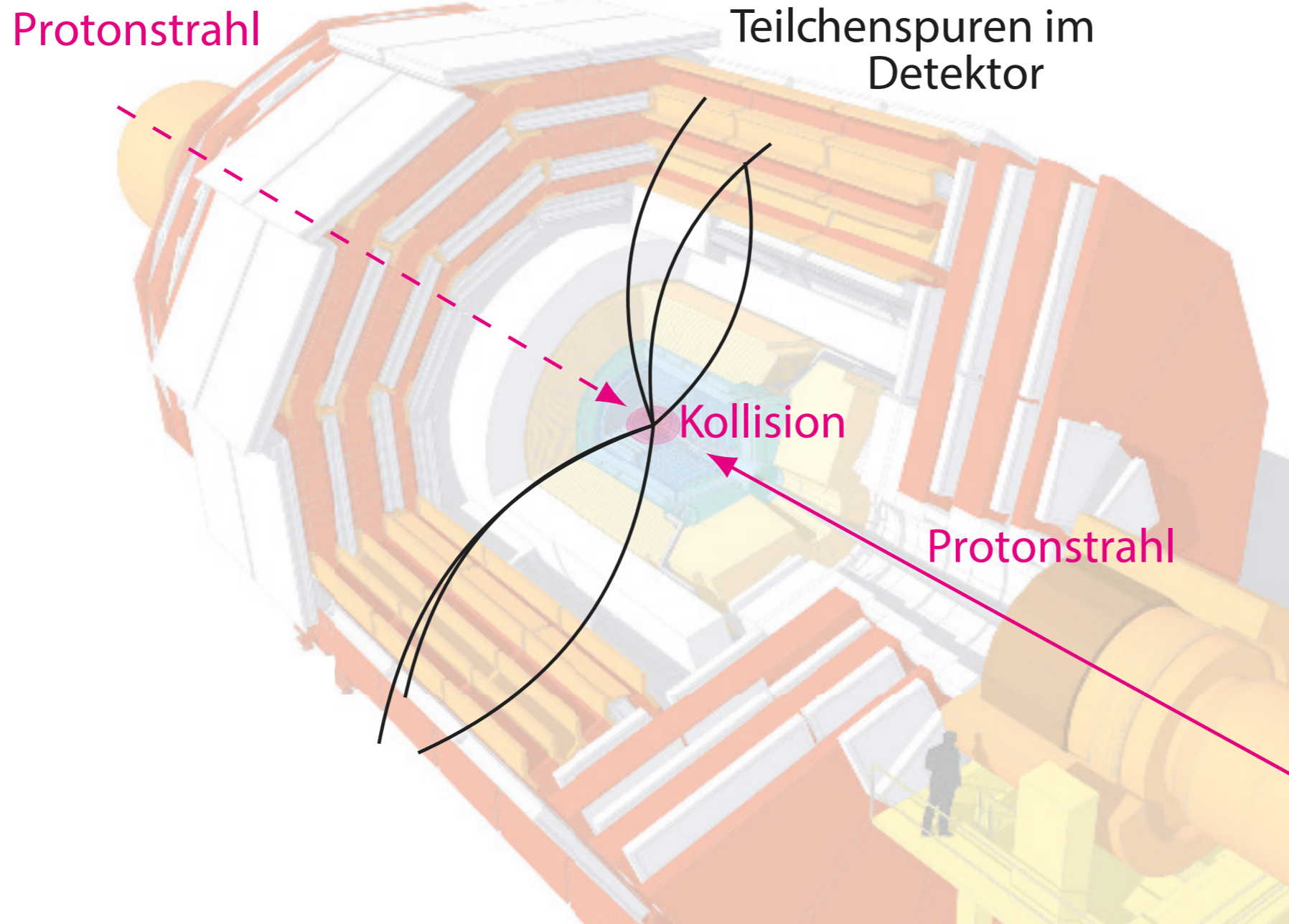
Ein Solenoid-Elektromagneten kann man sich wie eine Garnrolle vorstellen, bei der Strom durch das aufgewickelte Garn fließt. Dabei entsteht ein **gleichförmiges Magnetfeld**.

Der CMS-Detektor: ein Collider-Detektor



Kompakt ist hier eher relativ gemeint: der Detektor wiegt **14'000 Tonnen** und hat einen **Durchmesser von 20 Meter**.

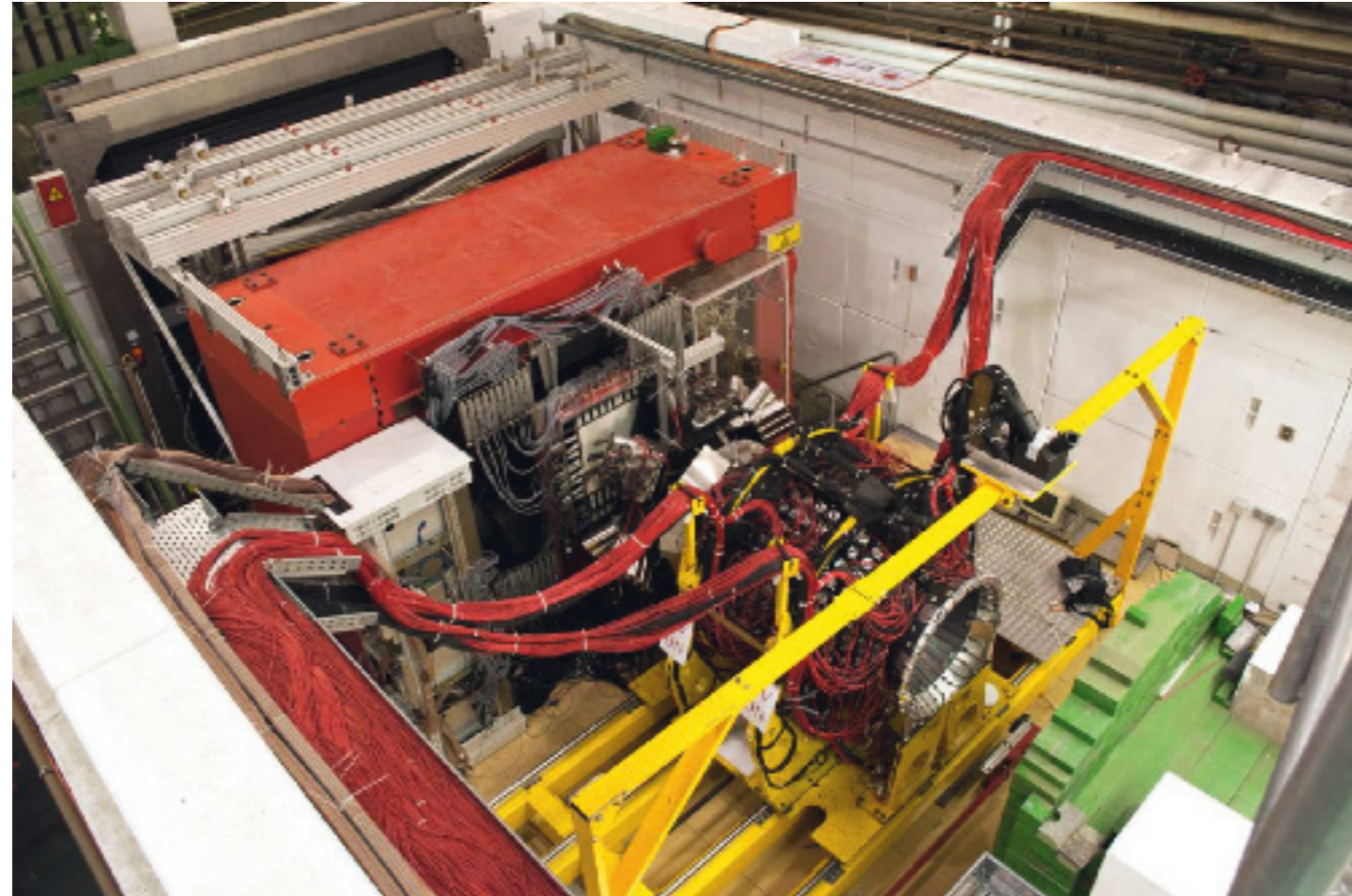
Teilchenkollision im CMS-Detektor



Aufbau gleicht einer Zwiebel: **verschiedene Subdetektoren** sind dazu ausgelegt **unterschiedliche Teilchen** zu rekonstruieren.

Nicht alle Experimente sind so groß wie CMS. In Bonn steht das **BGO-OD-Experiment**, wo Elektronen mit einer Energie von 3.2 GeV auf ein **Fixed Target** geschossen werden.

Der BGO-OD-Detektor: ein Fixed-Target-Experiment.



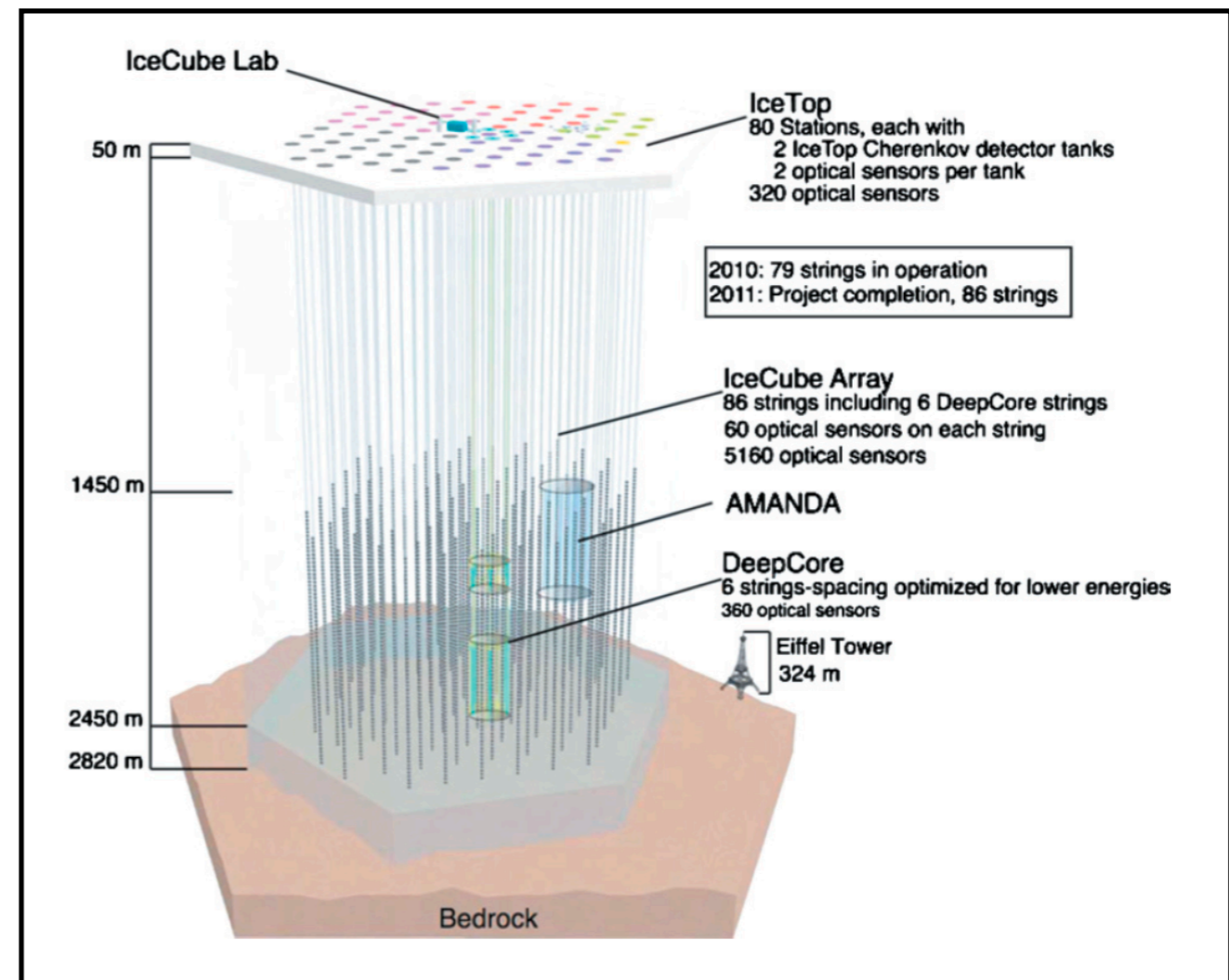
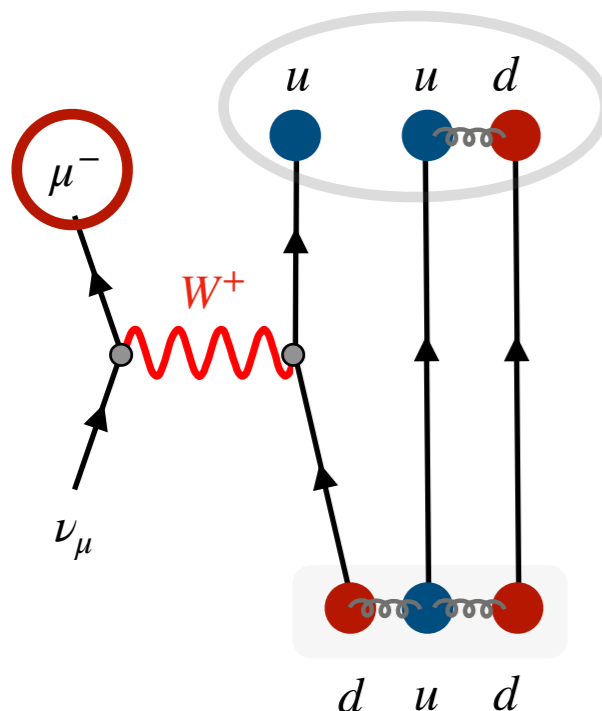
Hierbei werden **hochenergetische Photonen** produziert, welche mit einem zweiten Target in polarisierte Materie zur Wechselwirkung gebracht werden.

Neutrinos sind alles andere als reaktionsfreudig, weshalb deren Untersuchung eine **große Menge an Neutrinos** und **große Detektoren** notwendig macht.

Der erste direkte Nachweis von Neutrinos fand **1956** mit ca. **400 Liter Wasser** statt. Das Detektionsvolumen war relativ gering, was aber mit einem **enormen Fluss** an Neutrinos kompensiert wurde aus einem Kernreaktor.

Die heute größten Neutrinodetektoren umfassen viele **tausende Kubikmeter an Detektionsvolumen**.

Die **Nachweismethode** ist aber bei allen gleich: man nutzt eine Reaktion der schwachen WW :



Angetrieben von den ersten überraschenden Ergebnissen von **solaren Neutrinos**, begann 1980er das Interesse die Oszillation von **Sonnenneutrinos** oder aus **kosmischer Strahlung** genauer zu untersuchen.

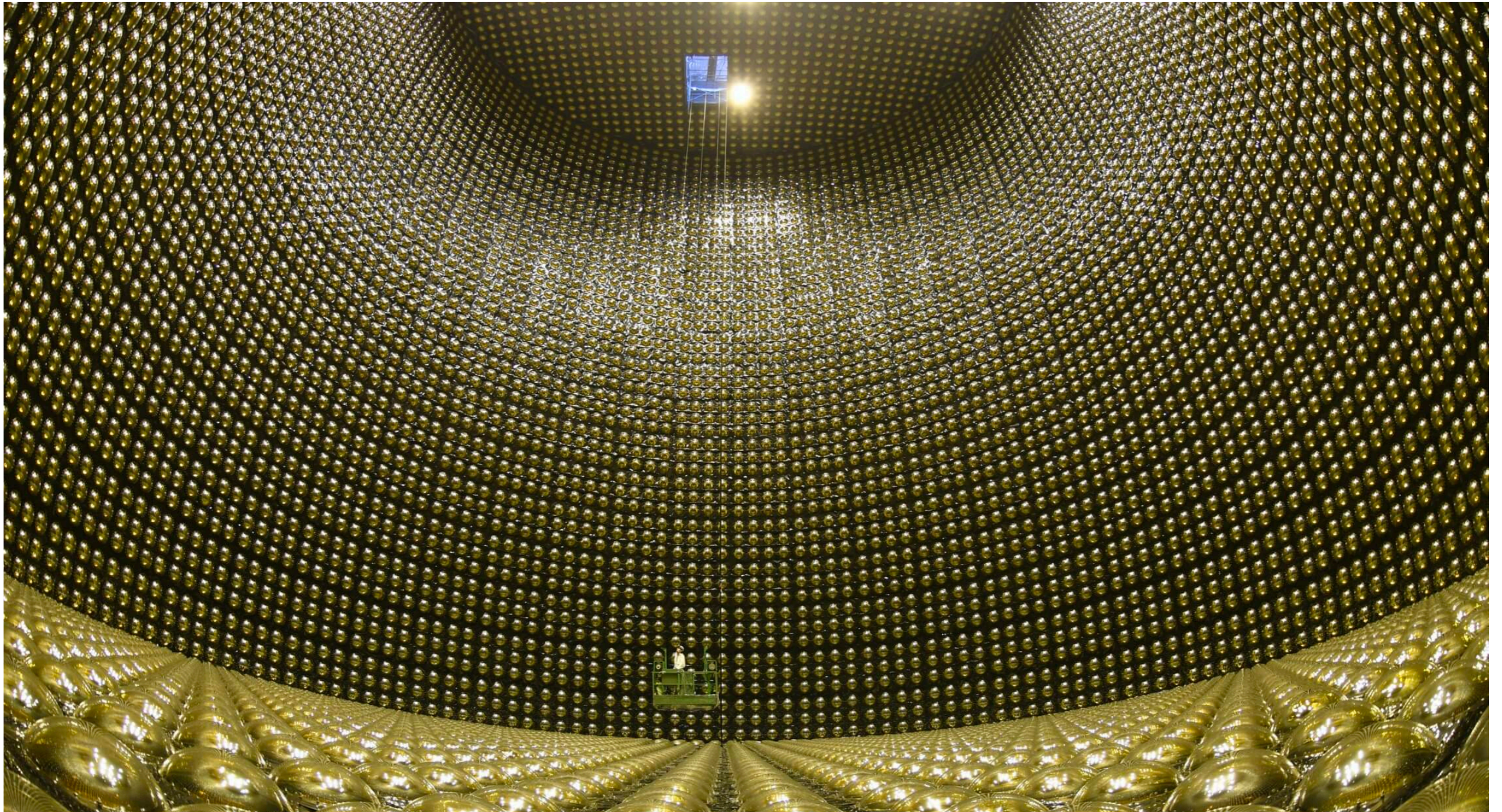
Spektakuläres ereignete sich 1987 im **Kamiokande-Detektor** :



3'000 Tonnen **Wasser** mit **1000 PMTs**

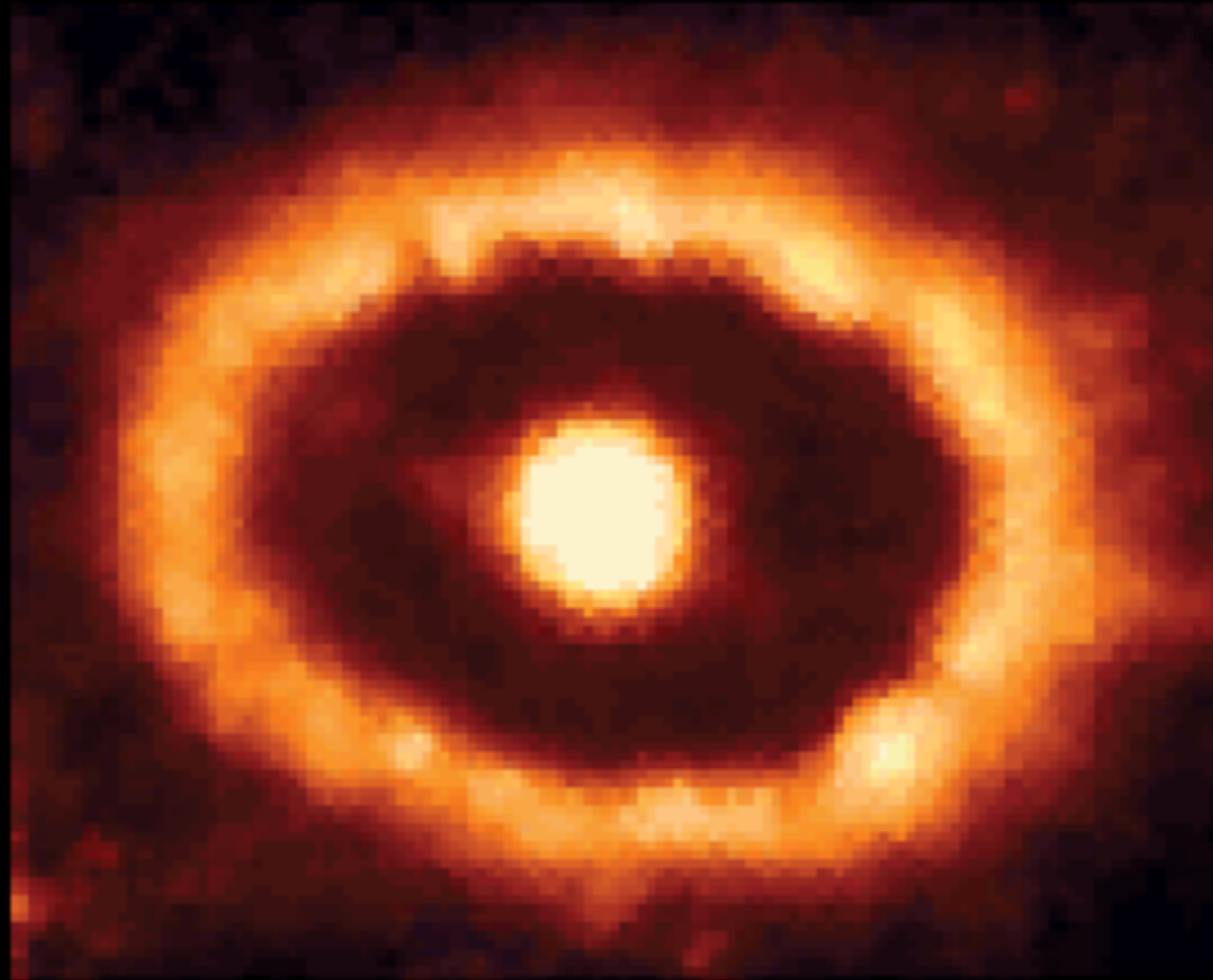
Im Schnitt wurde dort ca. ein Ereignis alle paar Stunden, aber am 24. Februar 1987 wurden an einem Tag innerhalb von nur **13 Sekunden 11 Neutrinosignale** observiert.

Andere Detektoren sahen das gleiche (zwei Detektoren in Frankreich und Russland sahen 5 weitere Neutrinosignale). **Was war passiert?**



Supernova 1987A:

Neutrinos erreichten die Erde 3 Stunden vor dem sichtbaren Licht. Die Explosion erreicht erst nach 3 Stunden die Oberfläche des Sterns. Die Neutrinos entkamen schneller, da sie nur sehr schwach mit der Materie des Sterns interagieren.

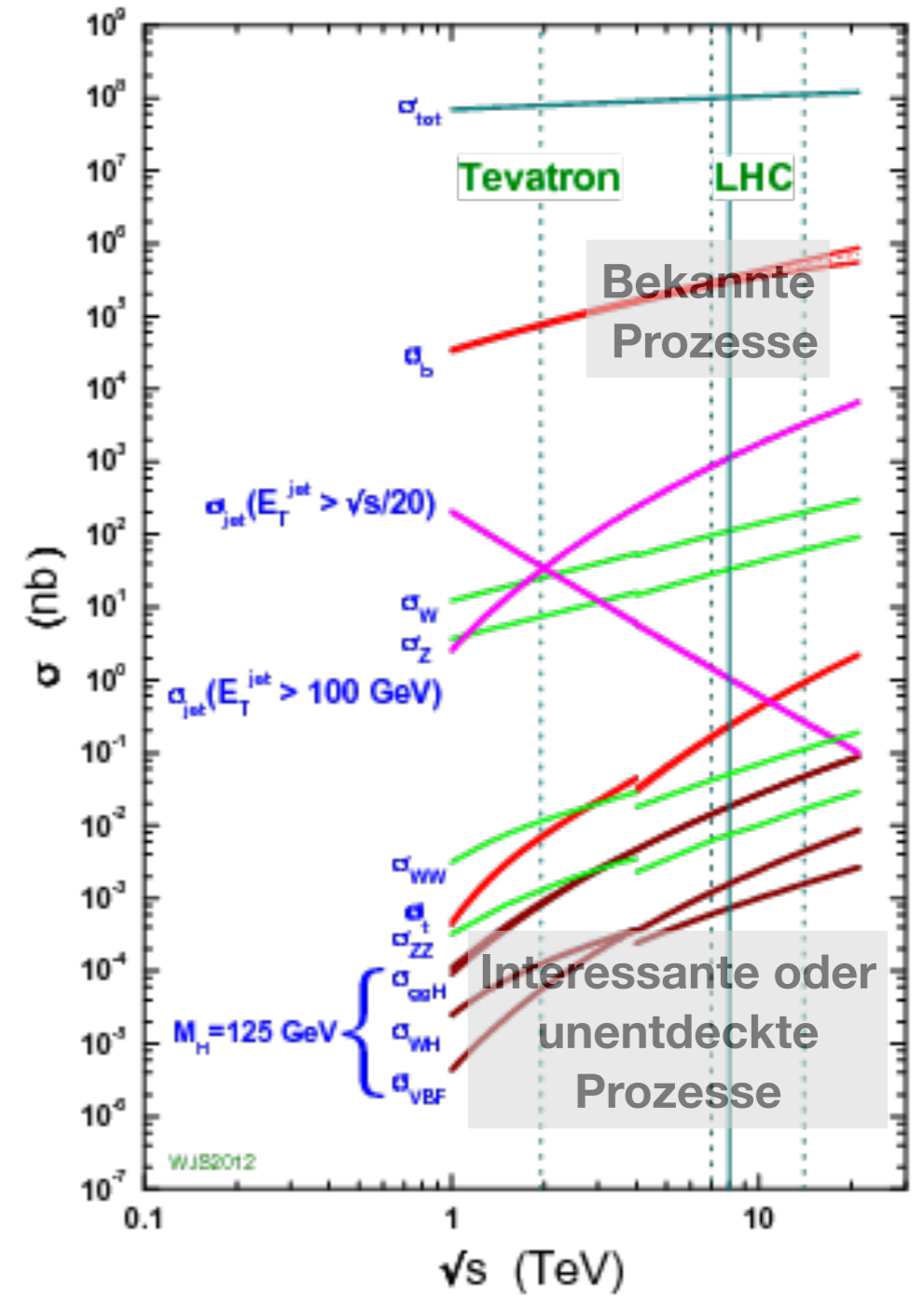


09/1994

99% der Energie die bei einer Supernova frei wird, wird von den Neutrinos weggetragen!



~ Ereigniswahrscheinlichkeit



Schwerpunktsenergie der Proton-Proton-Kollision

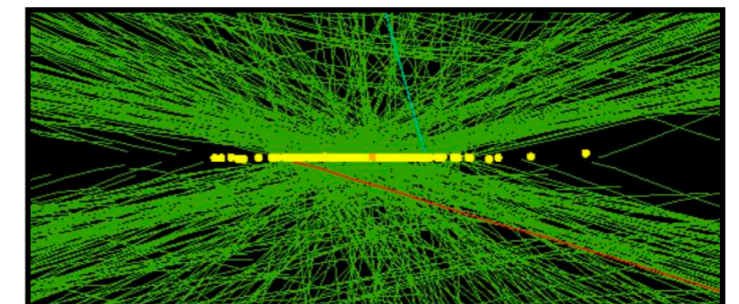
Kollisionen alle $25 \text{ ns} \rightarrow \frac{1}{25 \times 10^{-9} \text{ s}} = 40 \text{ MHz}$ Ereignisrate

Symbolisch : reduziert die Signale auf wenige Details mit viel Schärfe

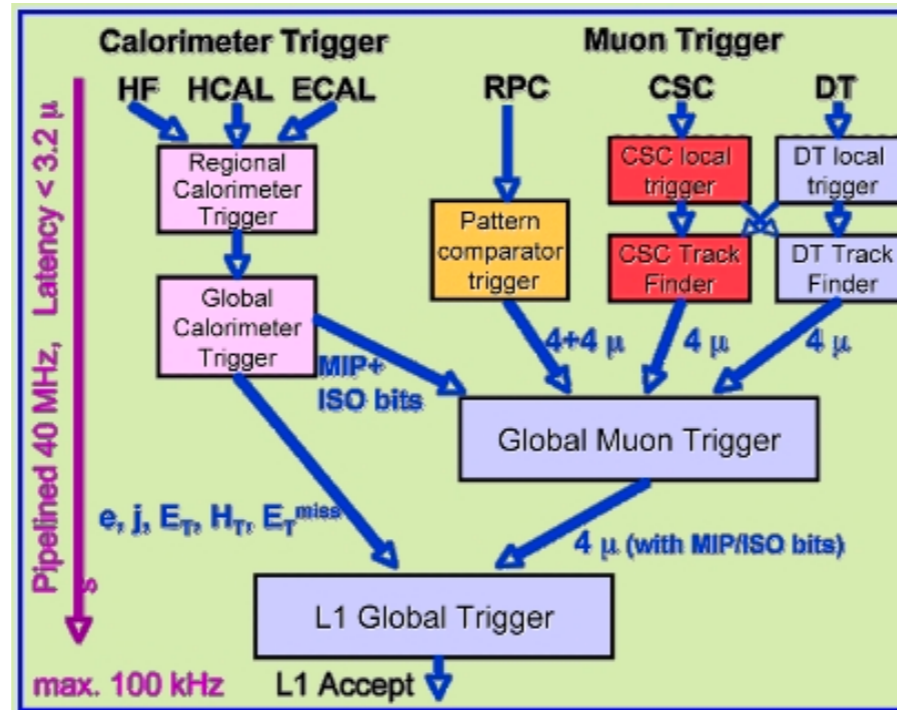


Ereignisse (1,7 Milliarden Kollisionen pro Sekunde)

bei ca. 50 Proton-Proton Kollisionen pro Ereignis



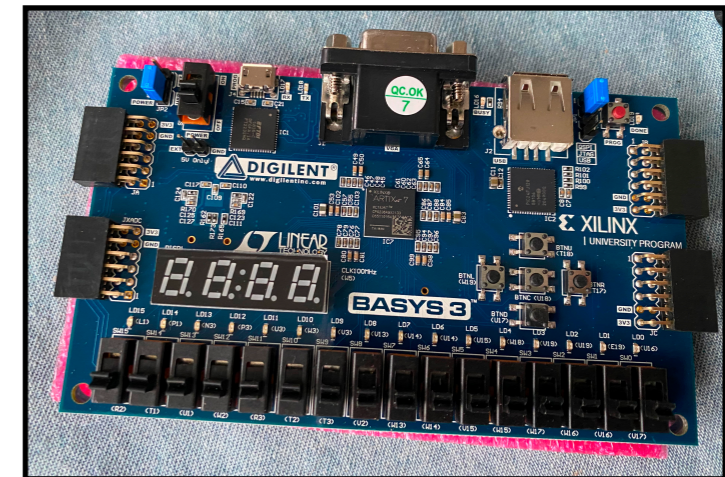
Kollisionen alle $25 \text{ ns} \rightarrow \frac{1}{25 \times 10^{-9} \text{ s}} = 40 \text{ MHz}$ Ereignisrate



L1 Trigger
(Basiert auf schneller Hardware)



100 kHz



z.B. FPGA oder Graphikkarten
(Field Programmable Gate Array)



1 – 1.5 kHz

High-level-Trigger
(Cluster)



Größe eines Ereignisses: ca. 1 MByte
→ 1.5 GB / Sekunde werden gespeichert

Detektoren ermöglichen uns kleinste Dinge zu sehen!

Sie kommen in vielen Formen und erfüllen **viele unterschiedliche Funktionen**.

Jeder große Detektor ist ein **Unikat!** Wir bauen ihn meist nur einmal und er kann nur für einen Zweck verwendet werden.

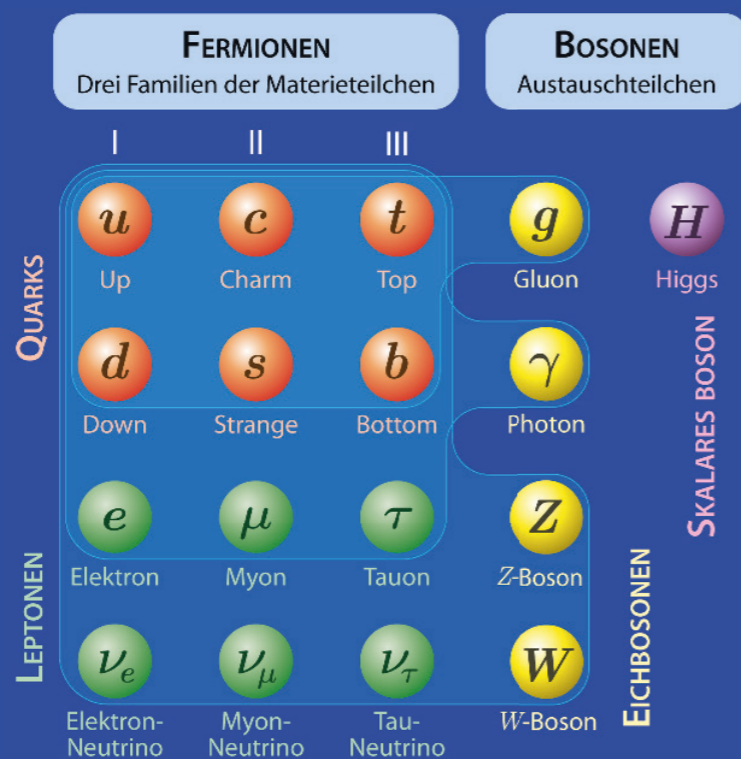
Der **Bau von Detektoren** ist ein wahnsinnig interessantes Forschungsgebiet an der Schnittstelle von Physik, Elektrotechnik und der Informatik.

Die Eigenschaften der Elementarteilchen

Übersicht und Tabellen

Typ	1. Familie		2. Familie		3. Familie		elektr. Ladung	starke Ladung	schwache Ladung
	Name	Masse [$1/c^2$]	Name	Masse [$1/c^2$]	Name	Masse [$1/c^2$]			
Quark	Up (u)	$2,16^{+0,49}_{-0,26}$ MeV	Charm (c)	$1,27^{+0,02}_{-0,02}$ GeV	Top (t)	$172,5^{+0,7}_{-0,7}$ GeV	$+(2/3) e$	r, g, b	✓
	Down (d)	$4,67^{+0,48}_{-0,17}$ MeV	Strange (s)	$93,4^{+8,6}_{-3,4}$ MeV	Bottom (b)	$4,18^{+0,03}_{-0,02}$ GeV	$-(1/3) e$	r, g, b	✓
Lepton	Elektron-Neutrino (ν_e)	$< 0,8$ eV	Myon-Neutrino (ν_μ)	$< 0,19$ MeV	Tau-Neutrino (ν_τ)	$< 18,2$ MeV	0	—	✓
	Elektron (e^-)	0,511 MeV	Myon (μ^-)	106 MeV	Tauon (τ^-)	1,777 GeV	$-e$	—	✓
Anti-quark	Anti-Up (\bar{u})	$2,16^{+0,49}_{-0,26}$ MeV	Anti-Charm (\bar{c})	$1,27^{+0,02}_{-0,02}$ GeV	Anti-Top (\bar{t})	$172,5^{+0,7}_{-0,7}$ GeV	$-(2/3) e$	$\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$	✓
	Anti-Down (\bar{d})	$4,67^{+0,48}_{-0,17}$ MeV	Anti-Strange (\bar{s})	$93,4^{+8,6}_{-3,4}$ MeV	Anti-Bottom (\bar{b})	$4,18^{+0,03}_{-0,02}$ GeV	$+(1/3) e$	$\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$	✓
Anti-lepton	Elektron-Anti-Neutrino ($\bar{\nu}_e$)	$< 0,8$ eV	Myon-Anti-Neutrino ($\bar{\nu}_\mu$)	$< 0,19$ MeV	Tau-Anti-Neutrino ($\bar{\nu}_\tau$)	$< 18,2$ MeV	0	—	✓
	Positron (e^+)	0,511 MeV	Antimyon (μ^+)	106 MeV	Antitauon (τ^+)	1,777 GeV	$+e$	—	✓

Eigenschaften der Elementarteilchen der drei Familien von Fermionen (Spin $1/2$) unter den Elementarteilchen. Zusätzlich haben die sechs Leptonen alle Leptonenzahl +1 und die Antileptonen -1 . Die sechs Quarks haben Baryonenzahl $+(1/3)$ und die Antiquarks $-(1/3)$. Wegen des Confinements hängen die Quarkmassen von der Berechnungsskala ab.



Name	Masse [$1/c^2$]	Spin	elektr. Ladung	starke Ladung	schwache Ladung
Photon (γ)	0	1	0	—	—
Z	91,2 GeV	1	0	—	✓
W^+	80,4 GeV	1	$+e$	—	✓
W^-	80,4 GeV	1	$-e$	—	✓
Gluon (g)	0	1	0	$r\bar{g}, r\bar{b}, g\bar{r}, g\bar{b}, b\bar{r}, b\bar{g}, r\bar{r} - g\bar{g}, r\bar{r} + g\bar{g} - 2b\bar{b}$	—
Graviton	0	2	—	—	—
Higgs	125,1 GeV	0	0	—	—

Vergleich der Eigenschaften der Bosonen (ganzzahliger Spin, Feldteilchen und Higgs-Boson)