

*Lehrerfortbildung „Weltmaschine“
Magnus-Haus, Berlin, 14. November 2008*

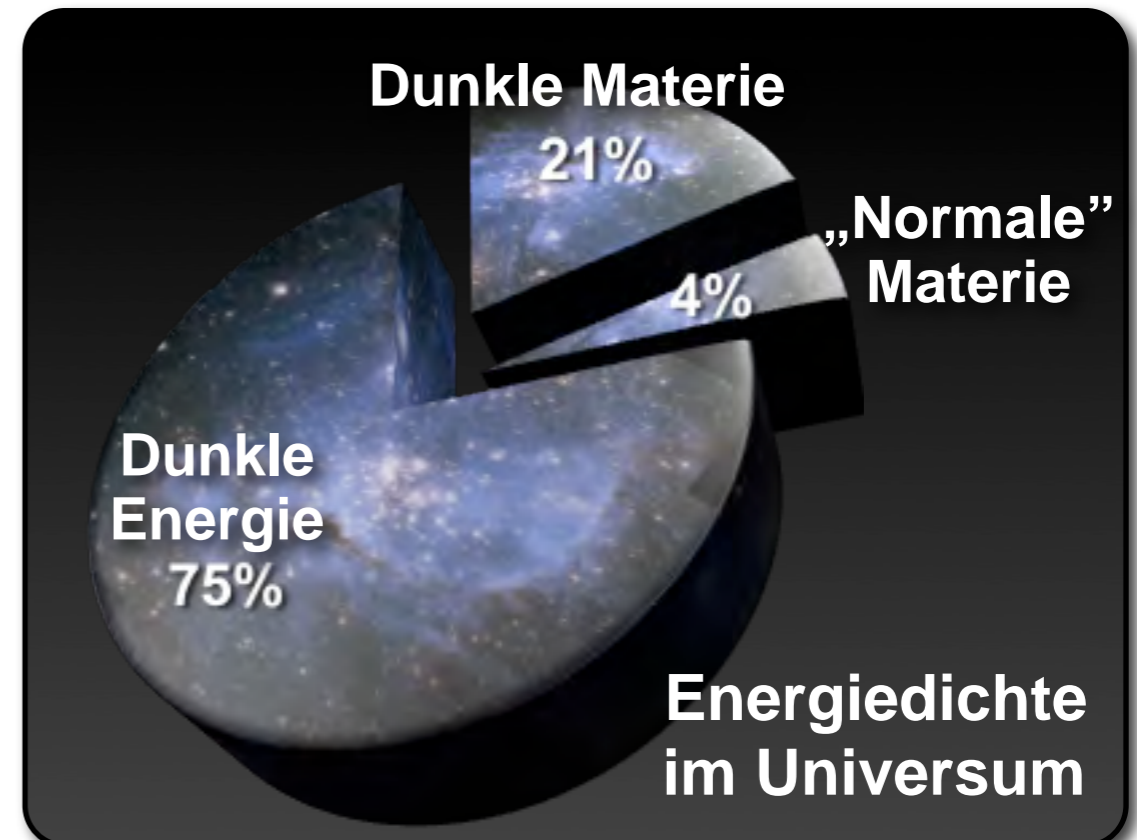
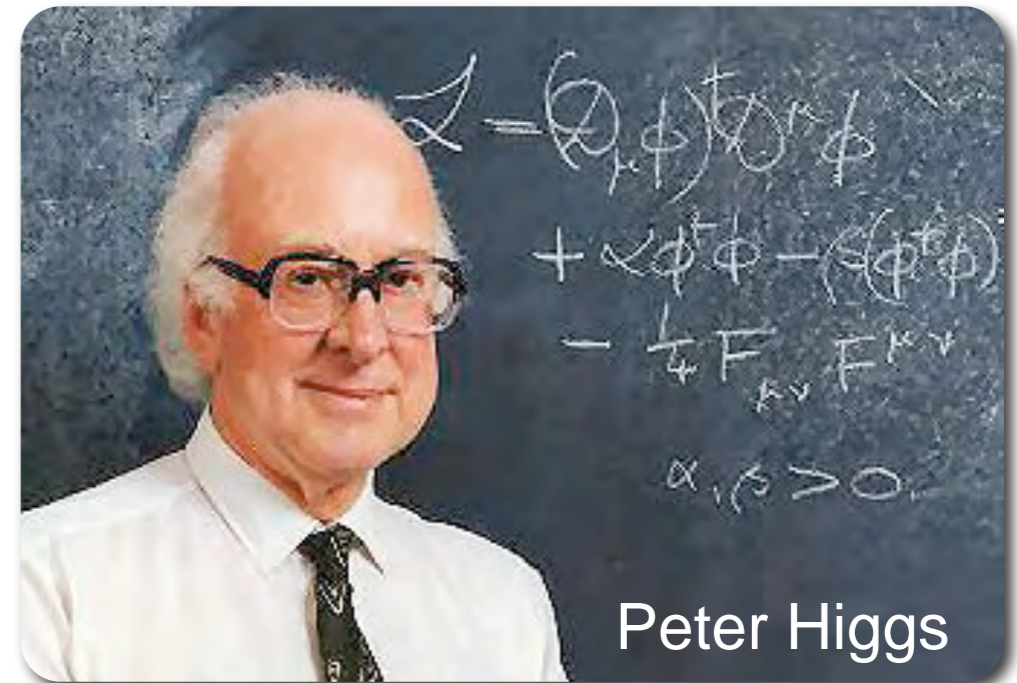
Large Hadron Collider: Die Experimente



*Ulrich Husemann
Deutsches Elektronen-Synchrotron*



- Wichtige Fragestellungen am LHC (vgl. Vortrag von Michael Kobel):
 - Woher kommt die Masse?
→ Higgs-Teilchen?
 - Was ist dunkle Materie?
→ Supersymmetrie?
 - Warum ist die Gravitation so schwach? → Extra-Dimensionen?
- In jedem Fall: Erzeugung und **Nachweis neuer Elementarteilchen**
- LHC: neue Generation von **Nachweisgeräten** („Detektoren“)
 - Riesige Ausmaße aber höchste Präzision
 - Höchste Kollisionsraten

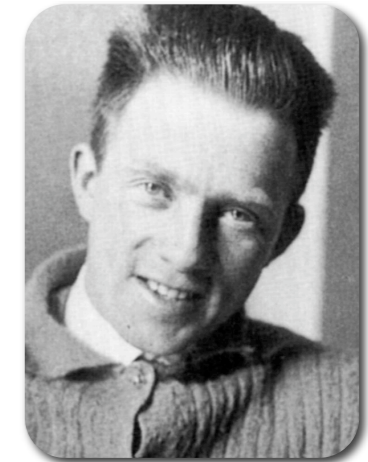


Warum immer höhere Energien?

- Grundpfeiler der Teilchenphysik:
 - Spezielle **Relativitätstheorie** (A. Einstein)
 - **Quantenmechanik** (E. Schrödinger, W. Heisenberg, ...)
- Relativitätstheorie: $E = mc^2$
 - Masse ist eine Form von Energie
 - Kollisionen von Elementarteilchen mit hoher Energie → Produktion **neuer schwerer Teilchen**
- Quantenmechanik: $\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$
 - Heisenberg'sche Unschärferelation: Ort (Δx) und Impuls (Δp) nicht gleichzeitig beliebig genau bekannt
 - Größerer Impulsübertrag → Auflösung **kleinerer Strukturen**




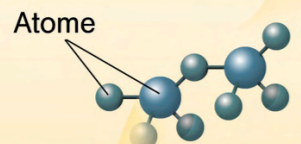
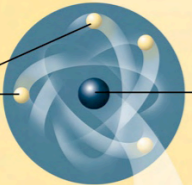
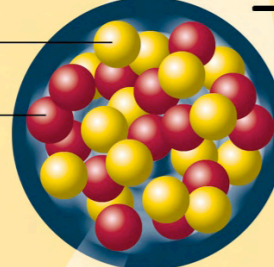
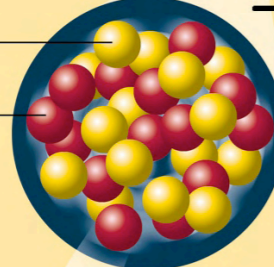
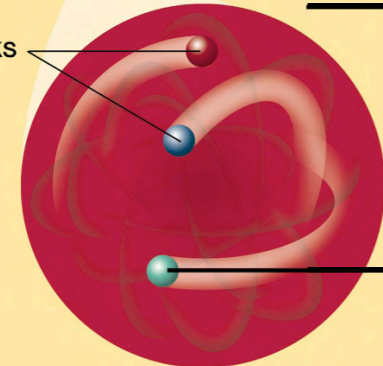
A. Einstein

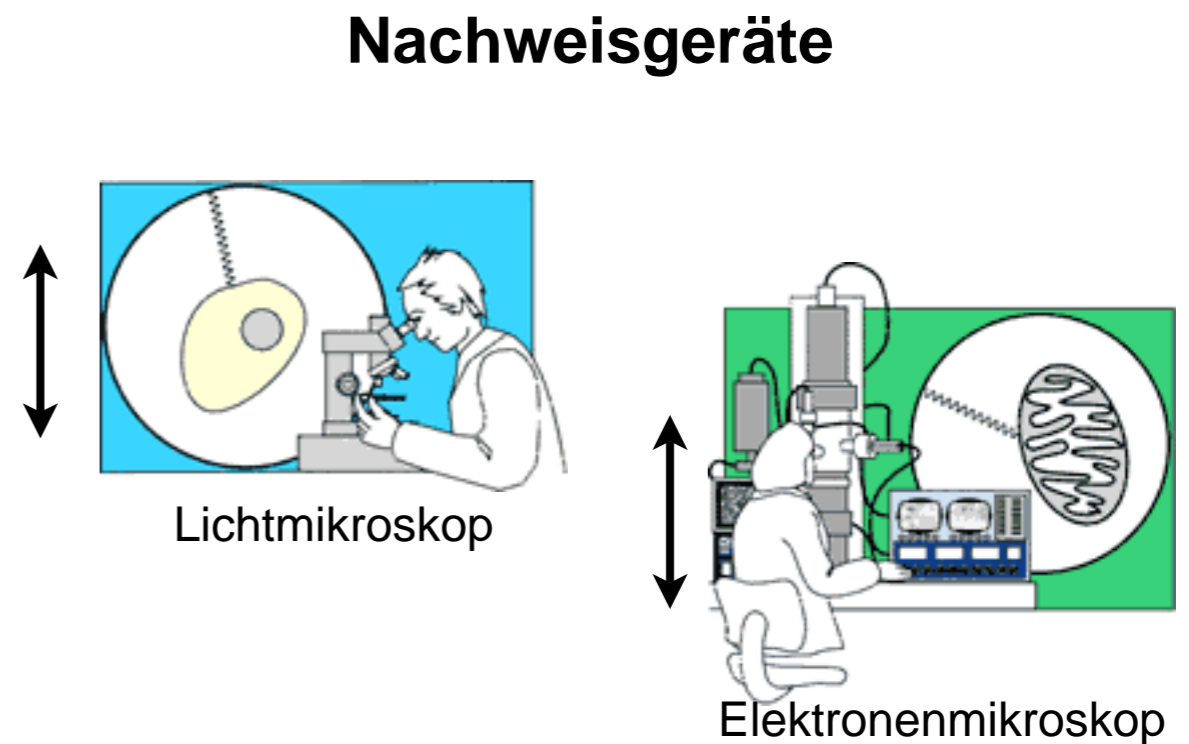


W. Heisenberg

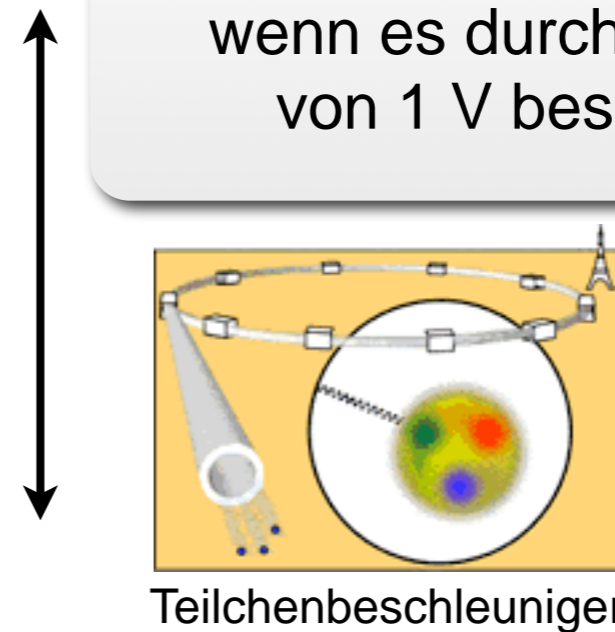


Größenordnungen

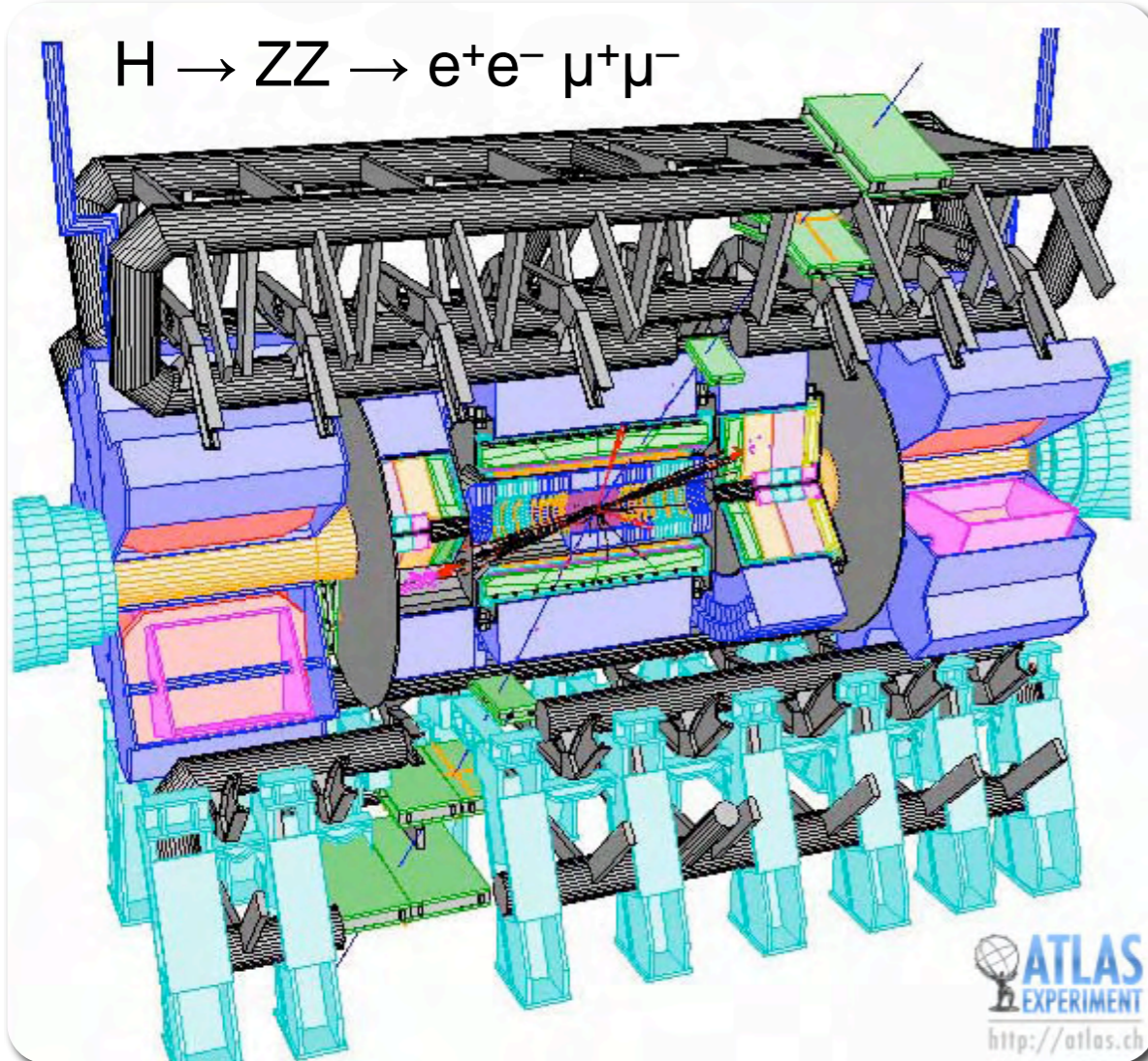
	Länge	Energie
 Materie	1 m	200 neV
 Molekül	10^{-9} m	200 eV
 Atom	10^{-10} m	2 keV
 Kern	10^{-14} m	20 MeV
 Proton	10^{-15} m (1 Femtometer)	200 MeV
 Quarks	$<10^{-18}$ m (1 Attometer)	>200 GeV



1 eV („Elektronenvolt“) = $1,6 \cdot 10^{-16}$ J
 Energie, die ein Elektron gewinnt,
 wenn es durch eine Spannung
 von 1 V beschleunigt wird

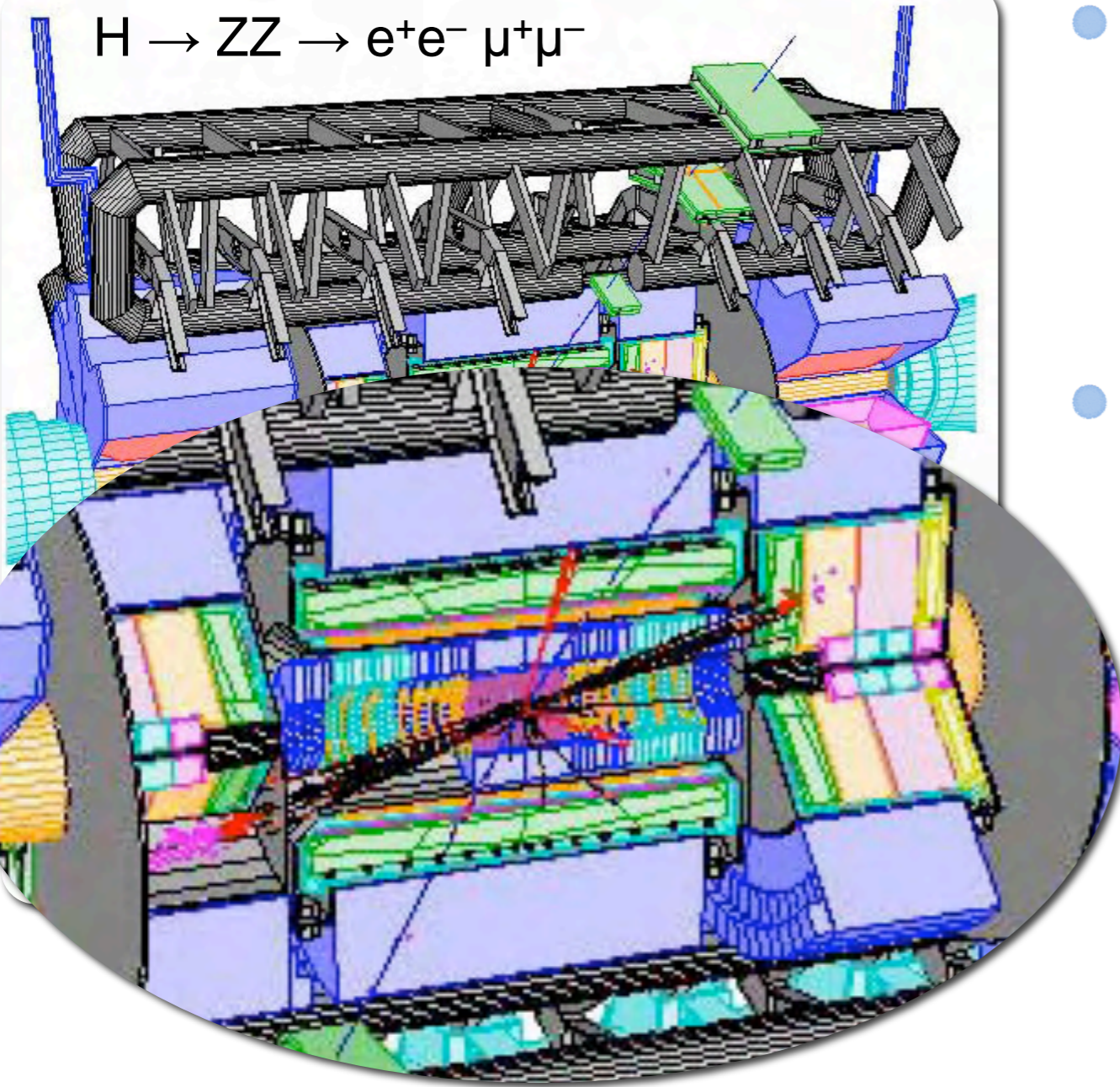


[DESY]



- **Vollständige** Charakterisierung der Kollision: Ort, Impuls, Energie, Art aller Teilchen → verschiedene Detektortypen, **zwiebelschalenartig** um Kollisionspunkt
- Neue Teilchen zerfallen sehr schnell
 - Nachweis von **Zerfallsprodukten**: geladene Leptonen (e, μ , τ), Photonen, Pionen, Protonen, Neutronen, Neutrinos
 - Keine freien Quarks → Nachweis als **Jets** = Bündel von Teilchen
 - Nachweis **aller** Zerfallsprodukte → möglichst **hermetischer** Detektor
- Neue Teilchen werden selten erzeugt → hohe **Kollisionsraten** → schnelle Auslese

$H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^- \mu^+\mu^-$



- **Vollständige** Charakterisierung der Kollision: Ort, Impuls, Energie, Art aller Teilchen → verschiedene Detektortypen, **zwiebelschalenartig** um Kollisionspunkt
- Neue Teilchen zerfallen sehr schnell
 - Nachweis von **Zerfallsprodukten**: geladene Leptonen (e, μ , τ), Photonen, Pionen, Protonen, Neutronen, Neutrinos
 - Keine freien Quarks → Nachweis als **Jets** = Bündel von Teilchen
 - Nachweis **aller** Zerfallsprodukte → möglichst **hermetischer** Detektor
- Neue Teilchen werden selten erzeugt → hohe **Kollisionsraten** → schnelle Auslese

Teilchennachweis

Impulsmessung

Energiemessung

Teilchenidentifikation

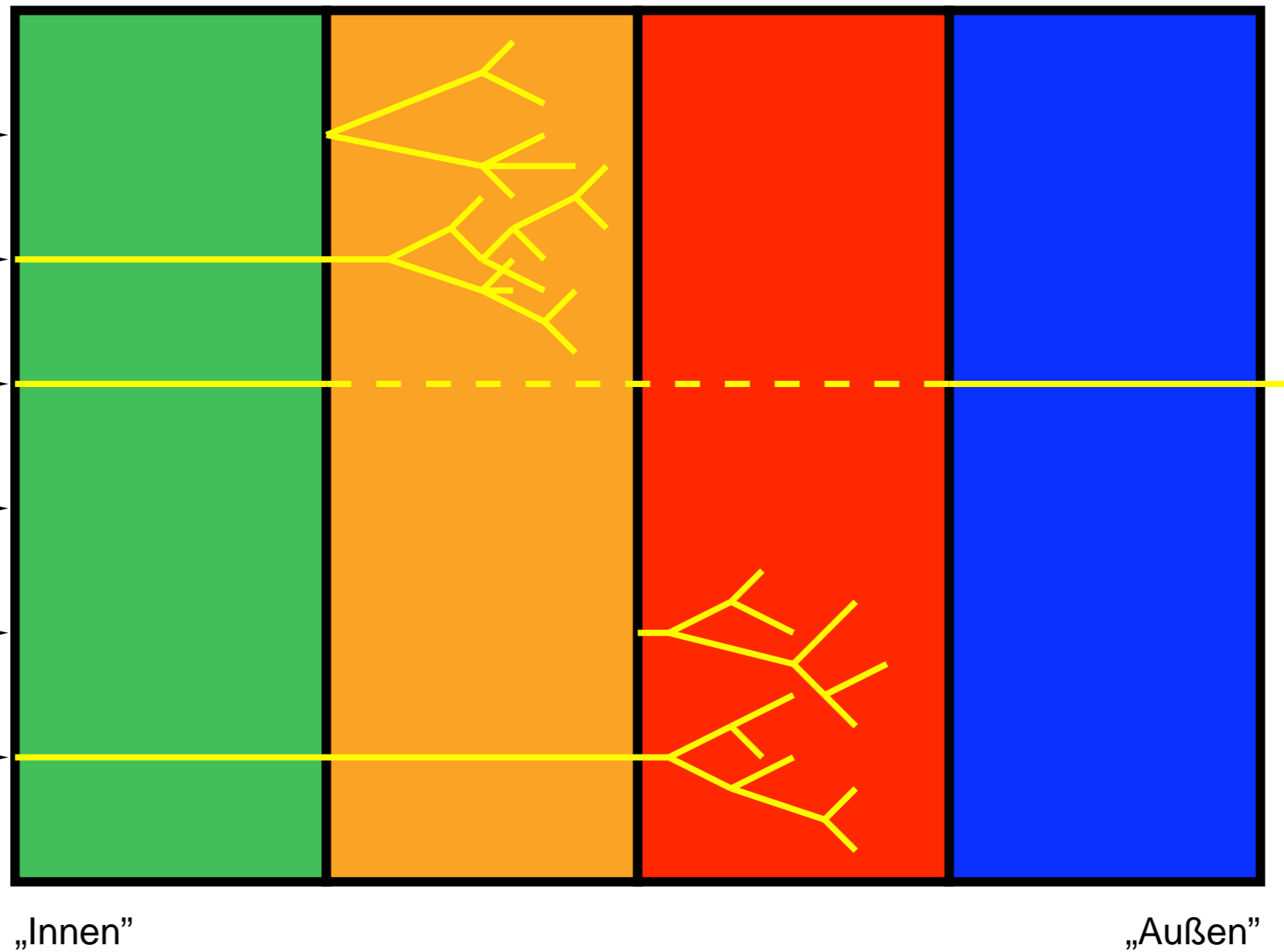
Spurdetektor
(„Tracking“)

Kalorimeter
elektromagnetisch hadronisch

Myondetektor

Zerfallsprodukte der Kollision

- Photon
- Elektron/Positron
- Myon
- Neutrino
- Neutron
- Pion, Proton

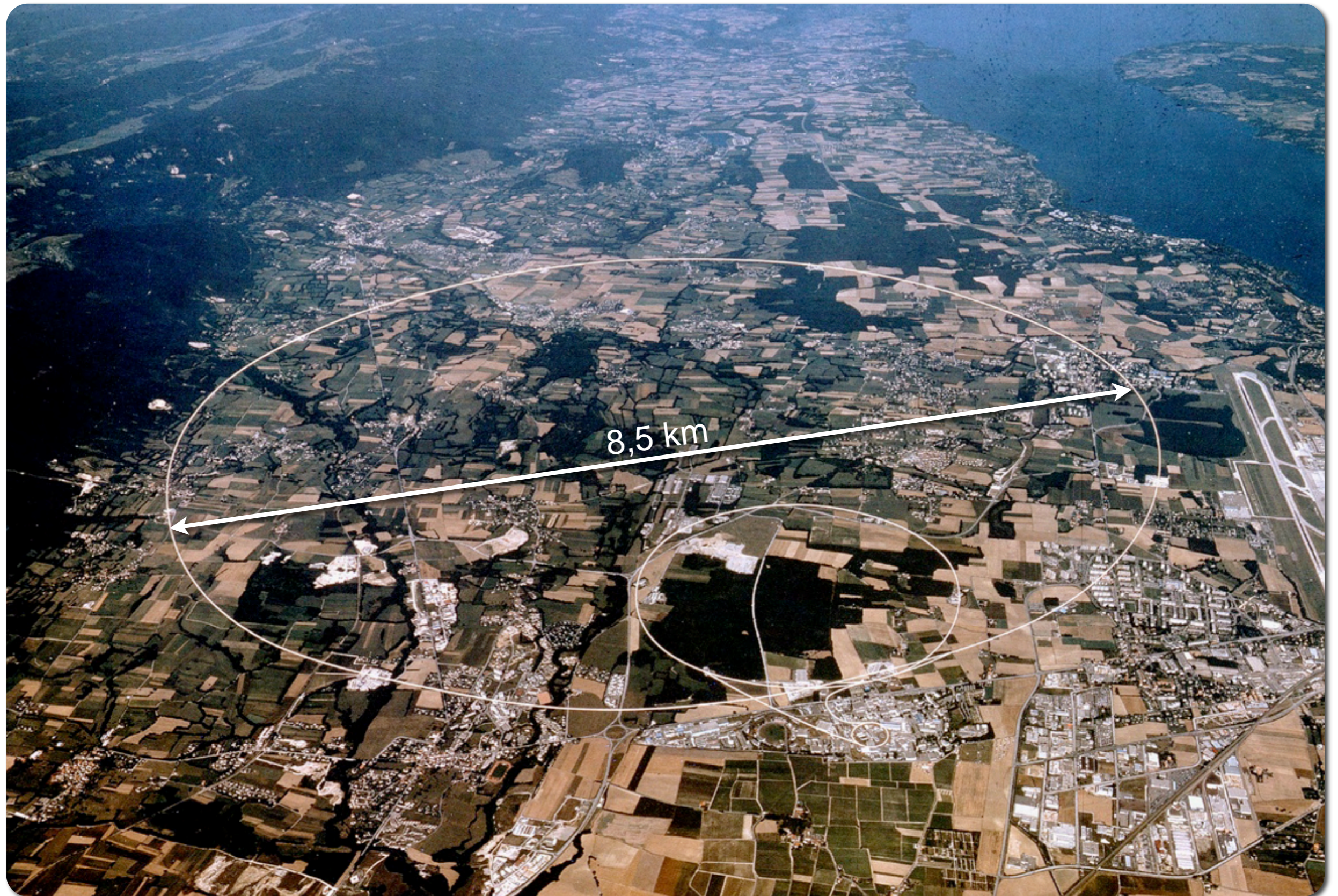


Flash-Animation: Teilchen in CMS



Die LHC-Experimente im Überblick

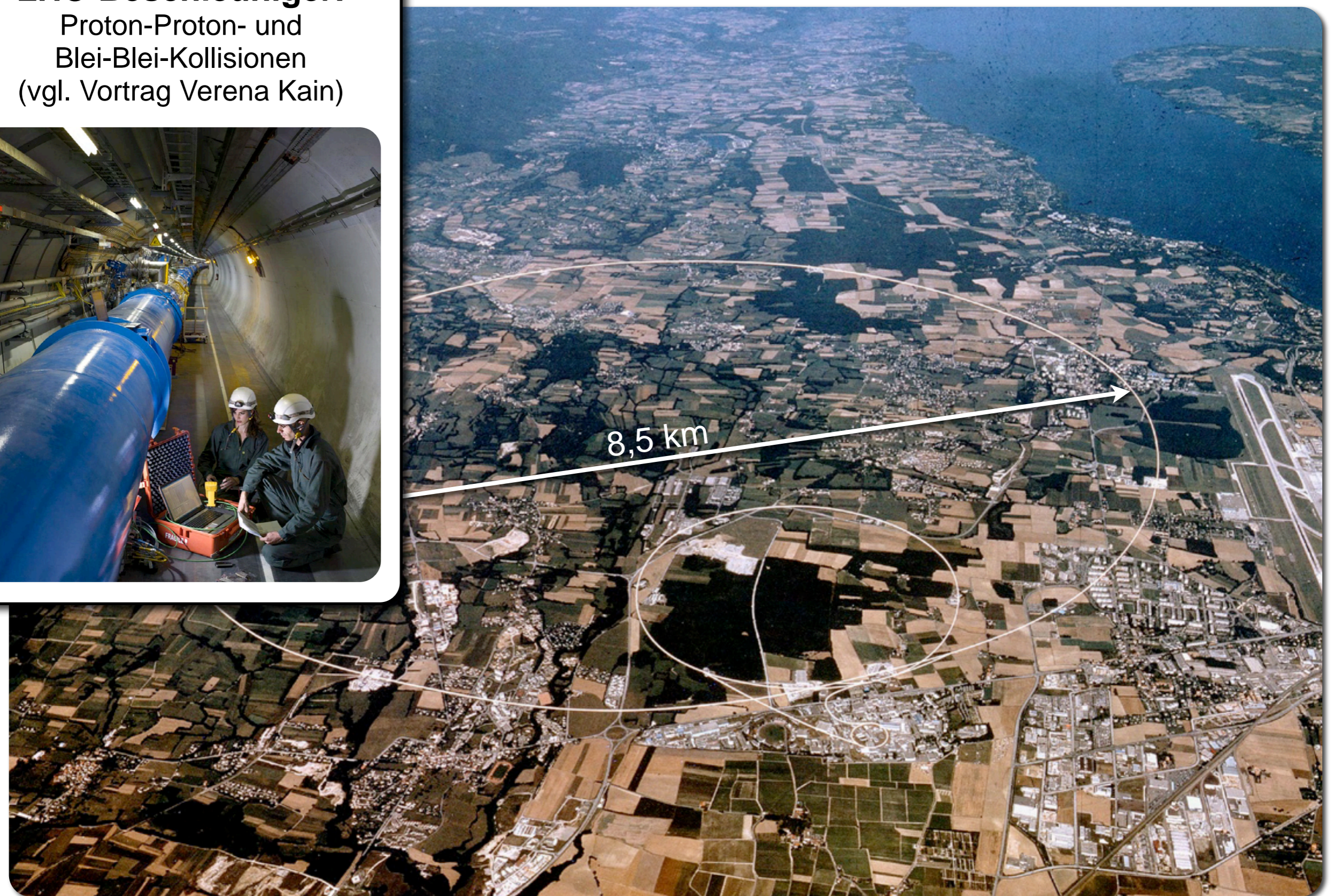
LHC – der Large Hadron Collider



LHC – der Large Hadron Collider

LHC-Beschleuniger:

Proton-Proton- und
Blei-Blei-Kollisionen
(vgl. Vortrag Verena Kain)



LHC – der Large Hadron Collider

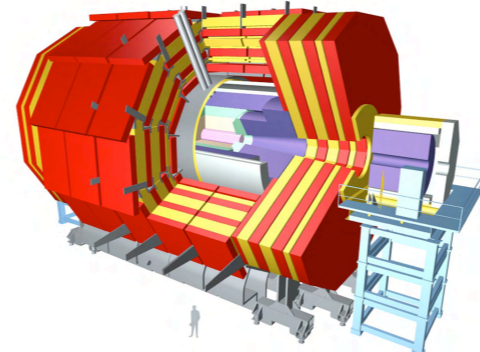
LHC-Beschleuniger:

Proton-Proton- und
Blei-Blei-Kollisionen
(vgl. Vortrag Verena Kain)



CMS-Experiment:

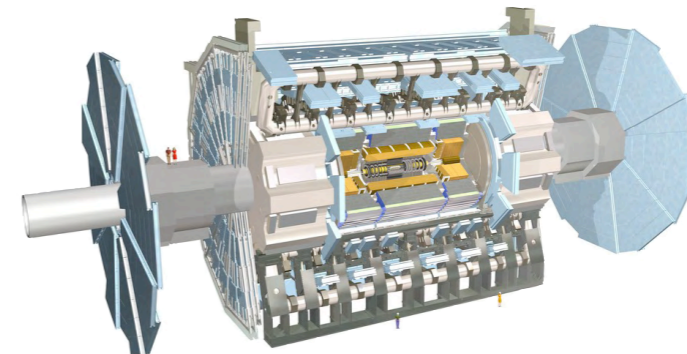
Vielzweckexperiment



8,5 km

ATLAS-Experiment:

Vielzweckexperiment



LHC – der Large Hadron Collider



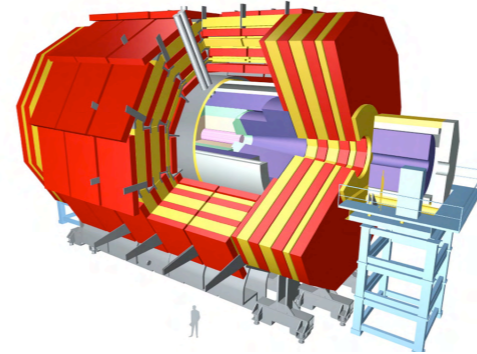
LHC-Beschleuniger:

Proton-Proton- und Blei-Blei-Kollisionen
(vgl. Vortrag Verena Kain)



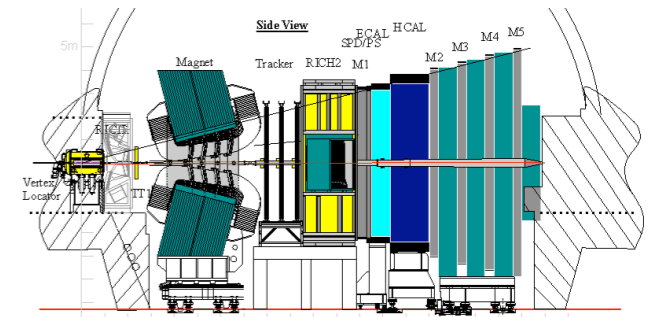
CMS-Experiment:

Vielzweckexperiment



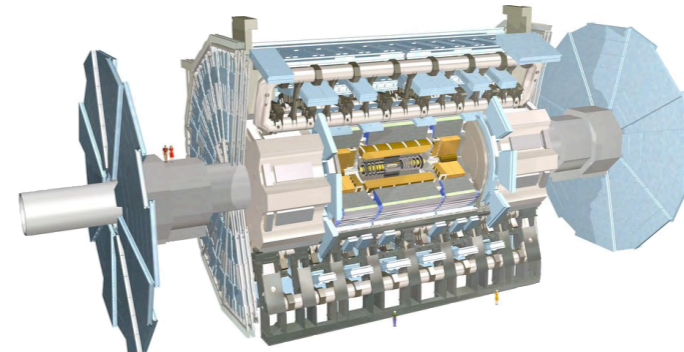
LHCb-Experiment:

Symmetrie Materie/Antimaterie



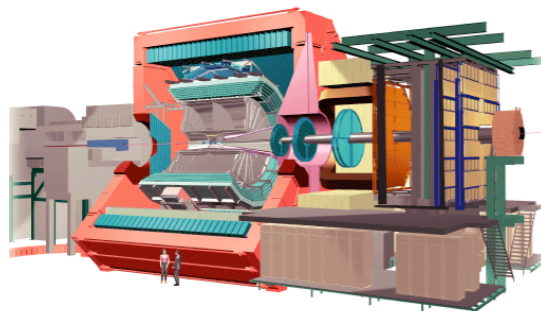
ATLAS-Experiment:

Vielzweckexperiment

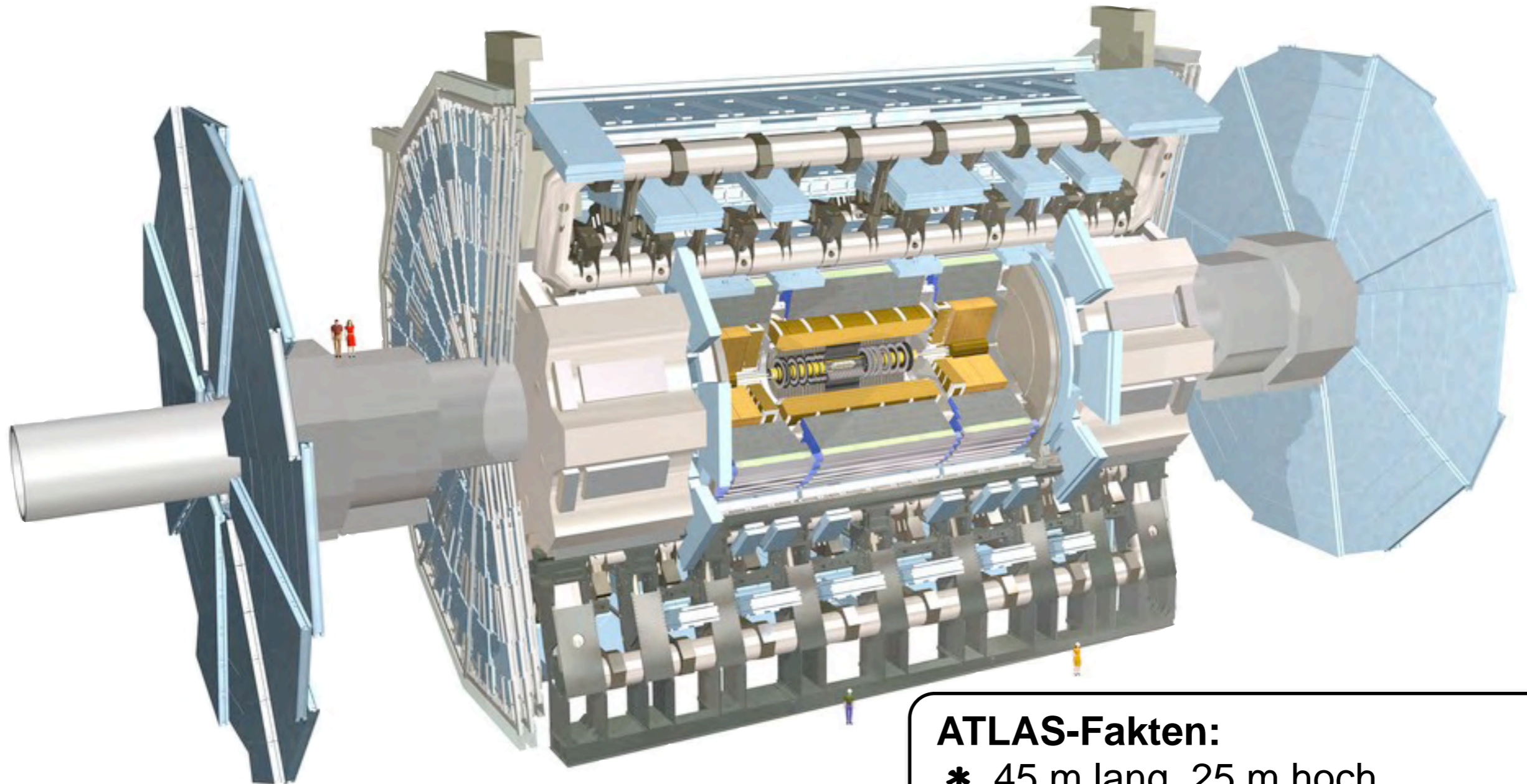


ALICE-Experiment:

Schwerionen & „Ursuppe“

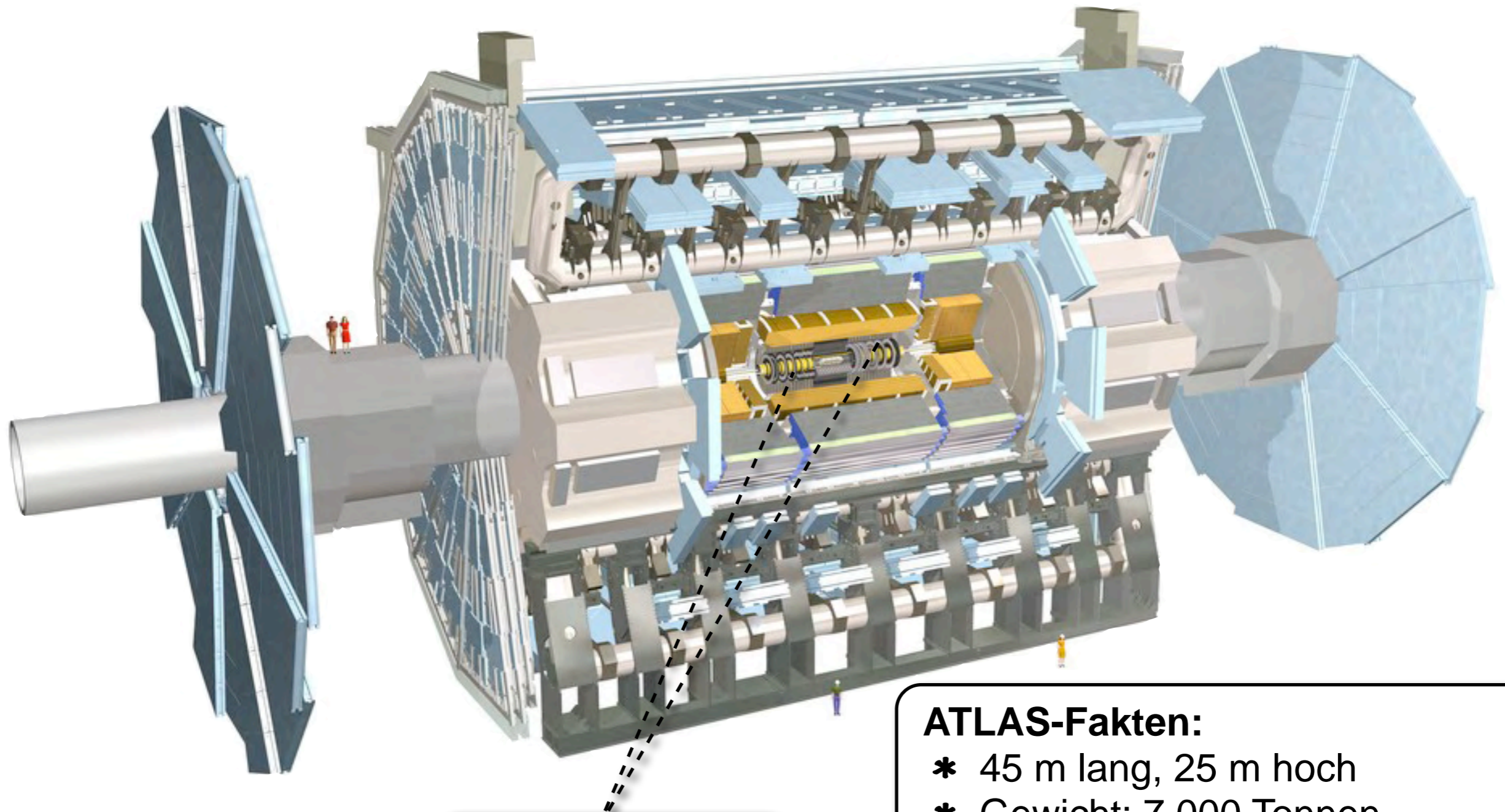


8,5 km



ATLAS-Fakten:

- * 45 m lang, 25 m hoch
- * Gewicht: 7.000 Tonnen
- * 100 Millionen Elektronikkanäle
- * Mitarbeiter: ca. 2500

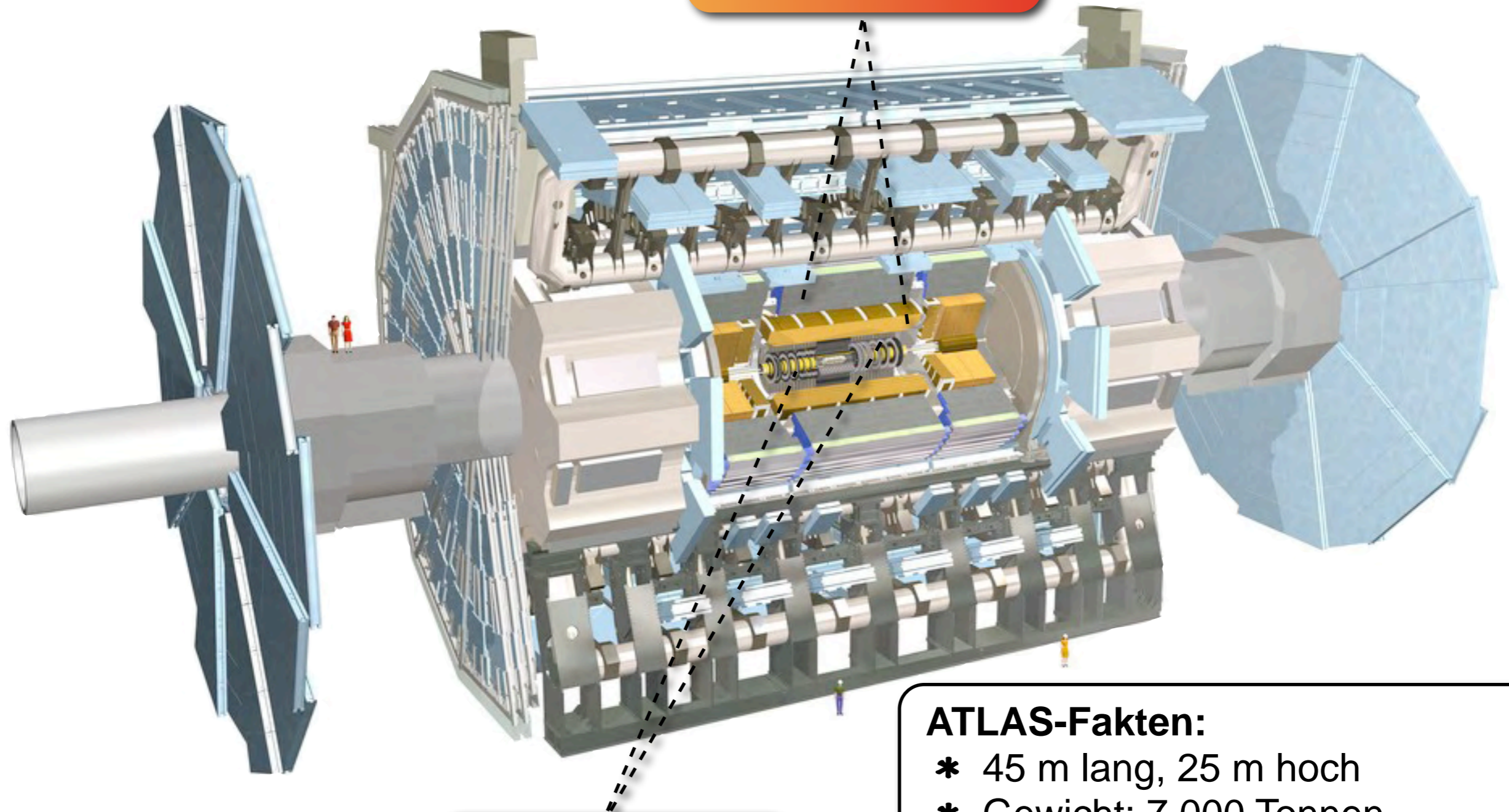


Spurdetektoren

ATLAS-Fakten:

- * 45 m lang, 25 m hoch
- * Gewicht: 7.000 Tonnen
- * 100 Millionen Elektronikkanäle
- * Mitarbeiter: ca. 2500

Kalorimeter



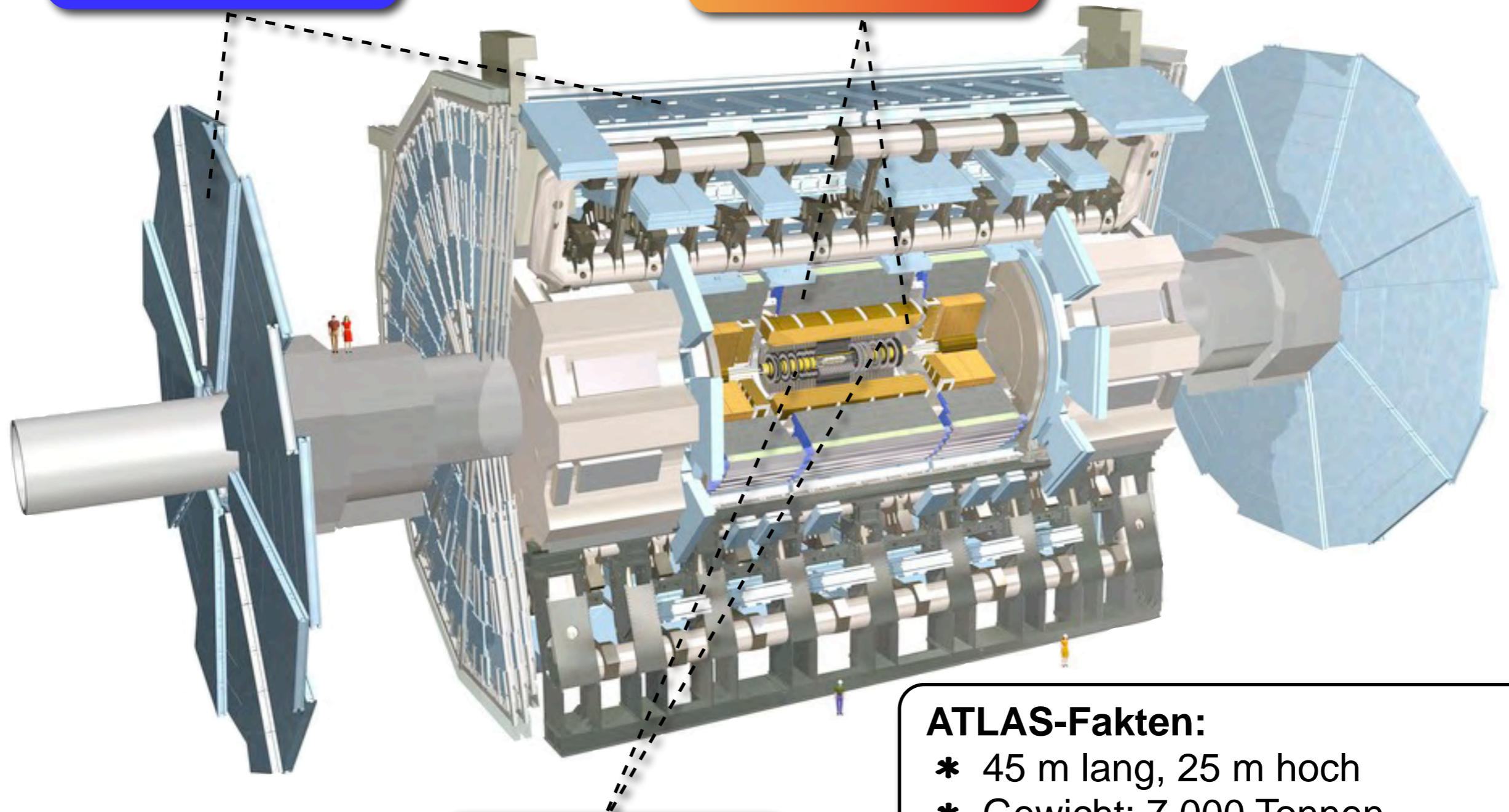
Spurdetektoren

ATLAS-Fakten:

- * 45 m lang, 25 m hoch
- * Gewicht: 7.000 Tonnen
- * 100 Millionen Elektronikkanäle
- * Mitarbeiter: ca. 2500

Myon-Detektor

Kalorimeter



Spurdetektoren

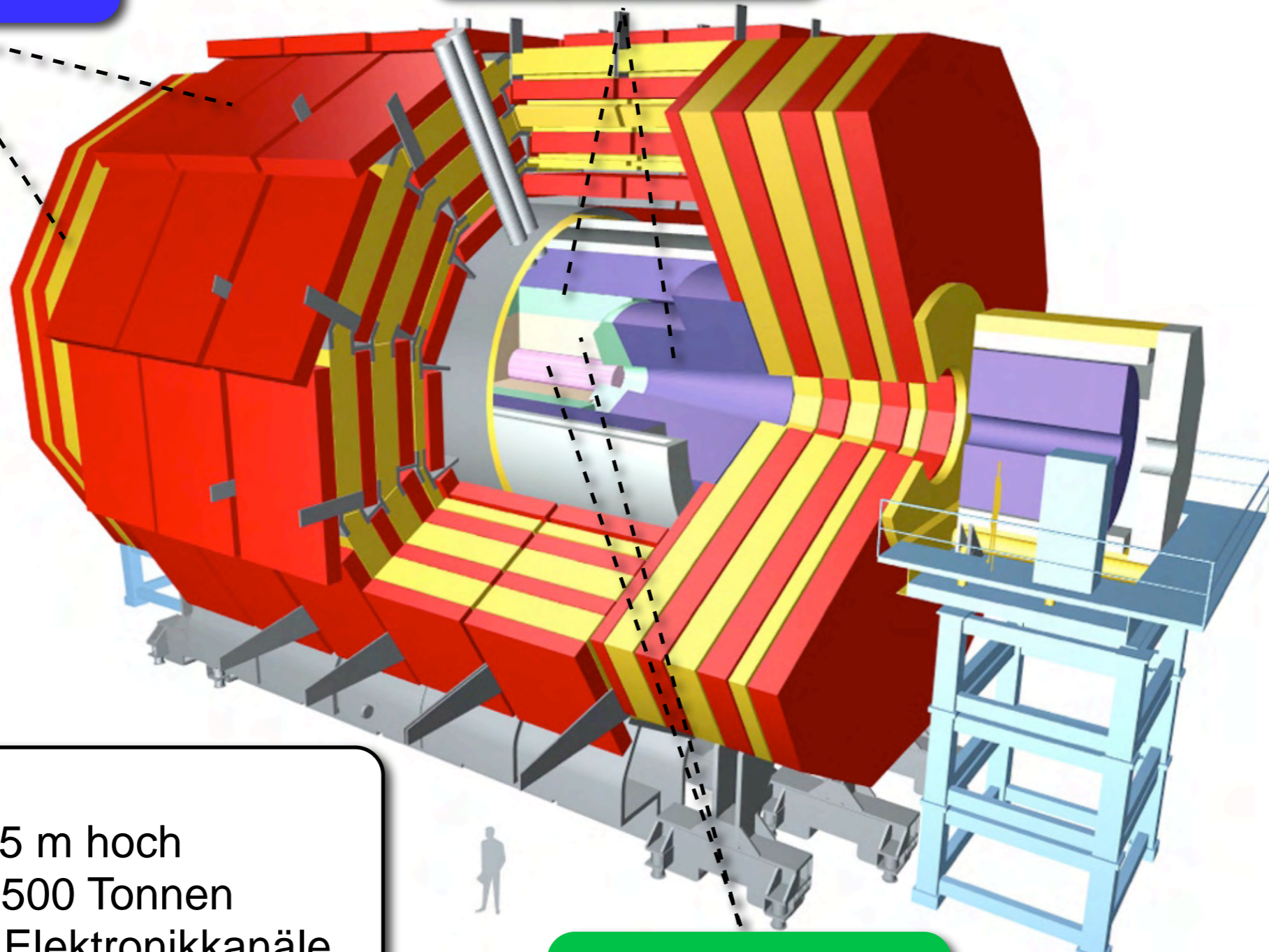
ATLAS-Fakten:

- * 45 m lang, 25 m hoch
- * Gewicht: 7.000 Tonnen
- * 100 Millionen Elektronikkanäle
- * Mitarbeiter: ca. 2500

CMS – Compact Muon Solenoid

Myon-Detektor

Kalorimeter



CMS-Fakten:

- * 21 m lang, 15 m hoch
- * Gewicht: 12.500 Tonnen
- * 80 Millionen Elektronikkanäle
- * Mitarbeiter: ca. 2500

Spurdetektoren

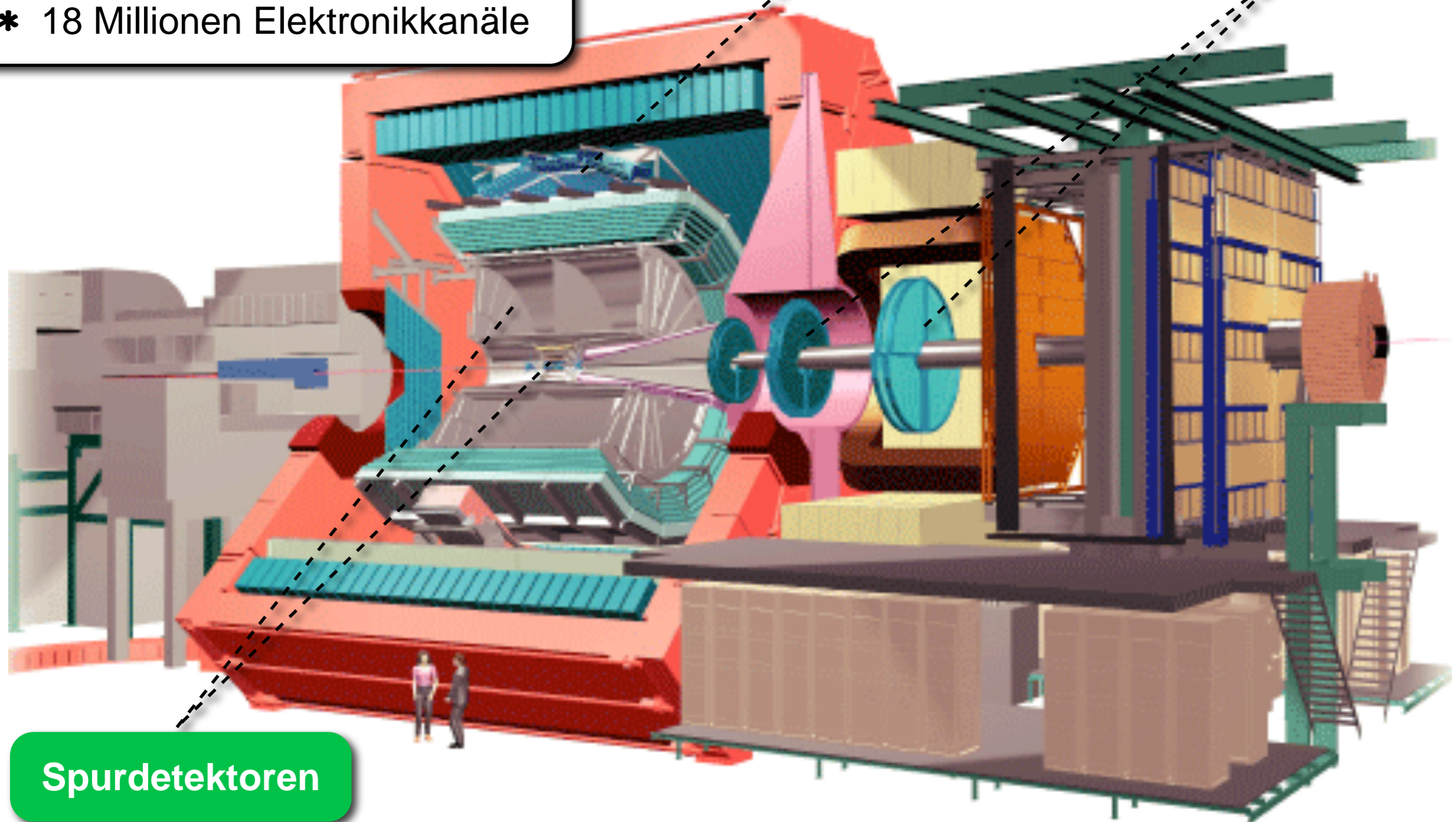
ALICE – Schwerionen & Ursuppe

ALICE-Fakten:

- * 26 m lang, 16 m hoch
- * Gewicht: 10.000 Tonnen
- * 18 Millionen Elektronikkanäle

Kalorimeter

Myon-Detektor



Spurdetektoren

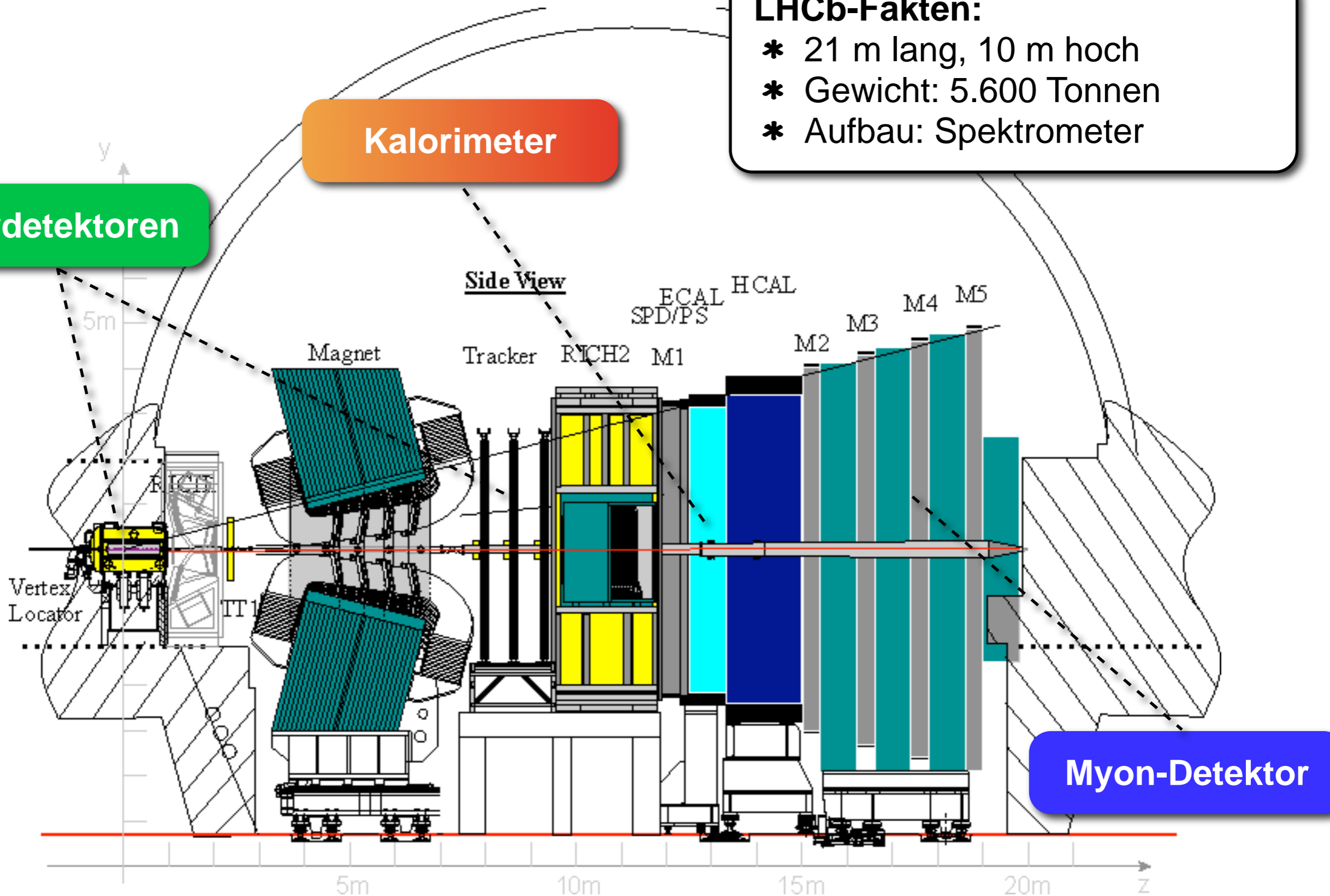
LHCb – Symmetrie Materie/Antimaterie

LHCb-Fakten:

- * 21 m lang, 10 m hoch
- * Gewicht: 5.600 Tonnen
- * Aufbau: Spektrometer

Kalorimeter

Spurdetektoren

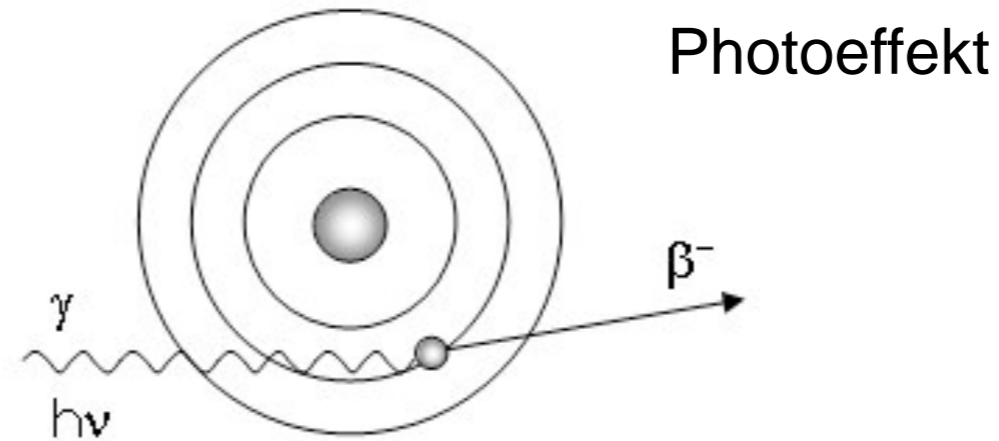


Myon-Detektor



Wechselwirkungen von Teilchen in Materie

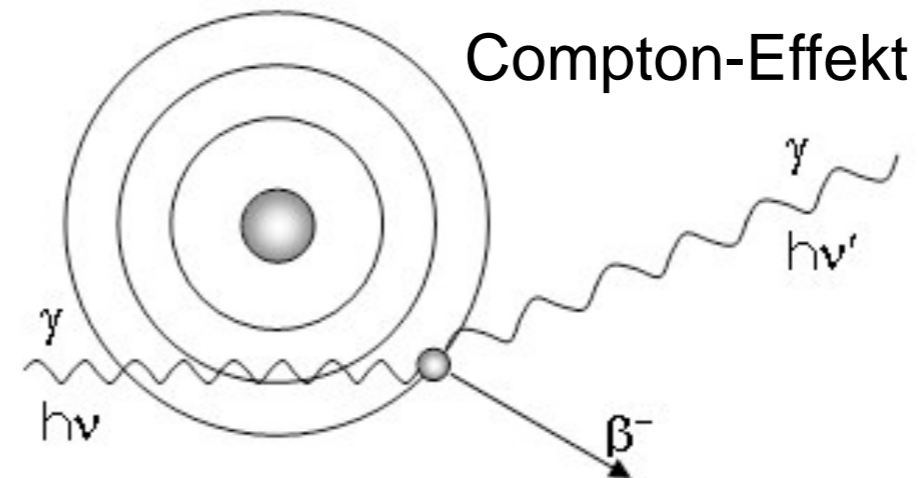
- **Photoelektrischer Effekt:** Photon schlägt Elektron aus Atomhülle, Photon wird absorbiert (kleine Energien)
- **Compton-Effekt:** Photon schlägt Elektron aus Atomhülle, ändert Wellenlänge (mittlere Energien)
- **Paarproduktion** von Elektronen und Positronen: Photon erzeugt e^+e^- im Kernfeld (hohe Energien, $> 10 \text{ MeV}$)



Photoeffekt



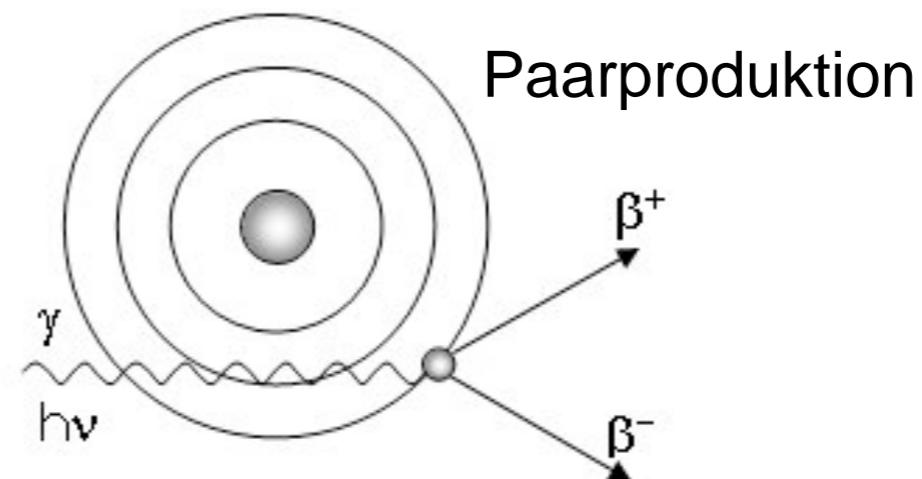
A. Einstein



Compton-Effekt



A.H. Compton



Paarproduktion

[www.sckcen.be]

- Semiklassisches Modell („Bethe-Bloch-Formel“)

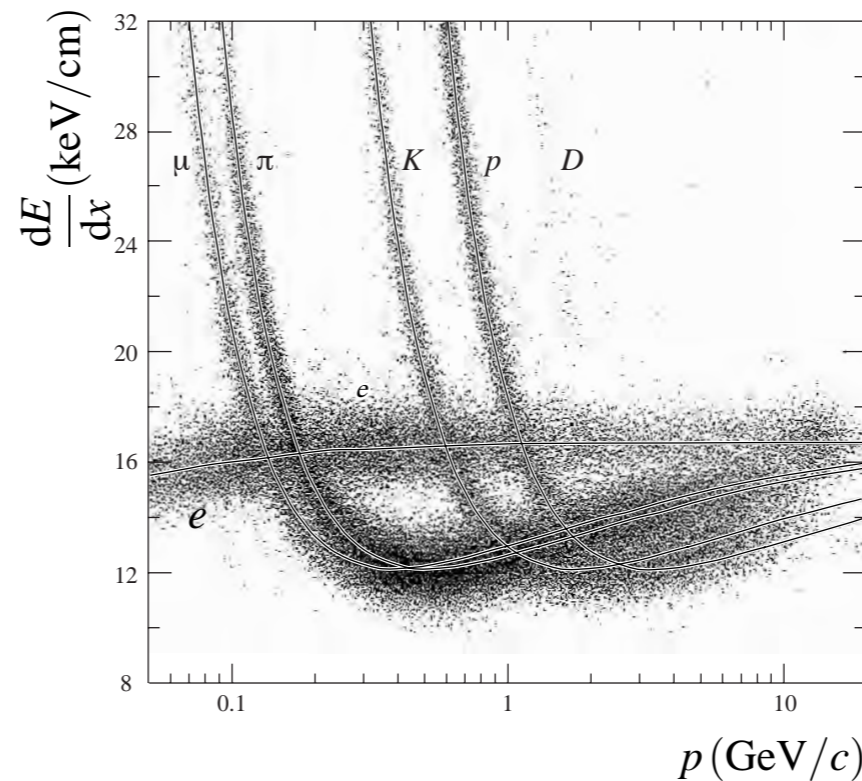
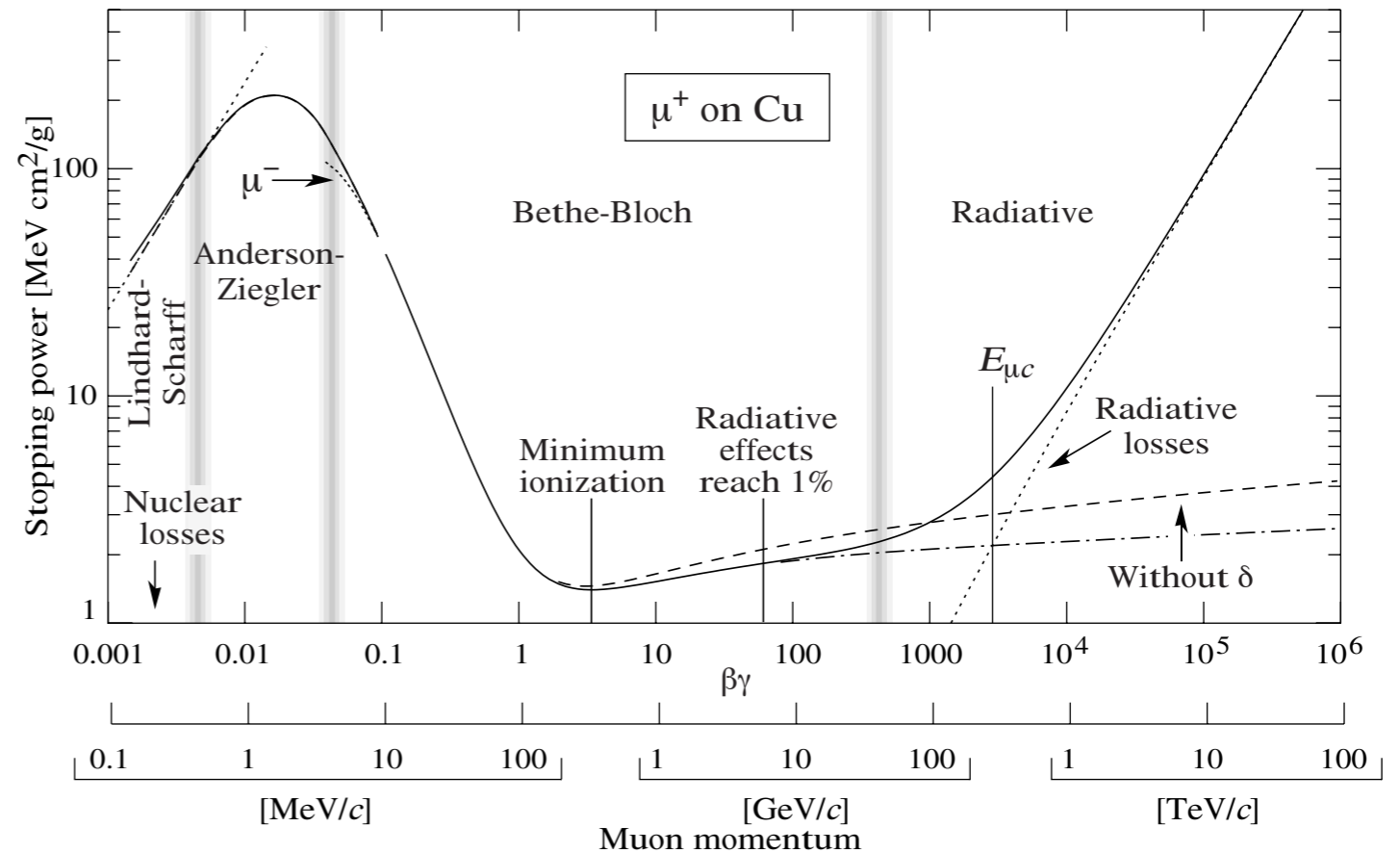


H. Bethe



F. Bloch

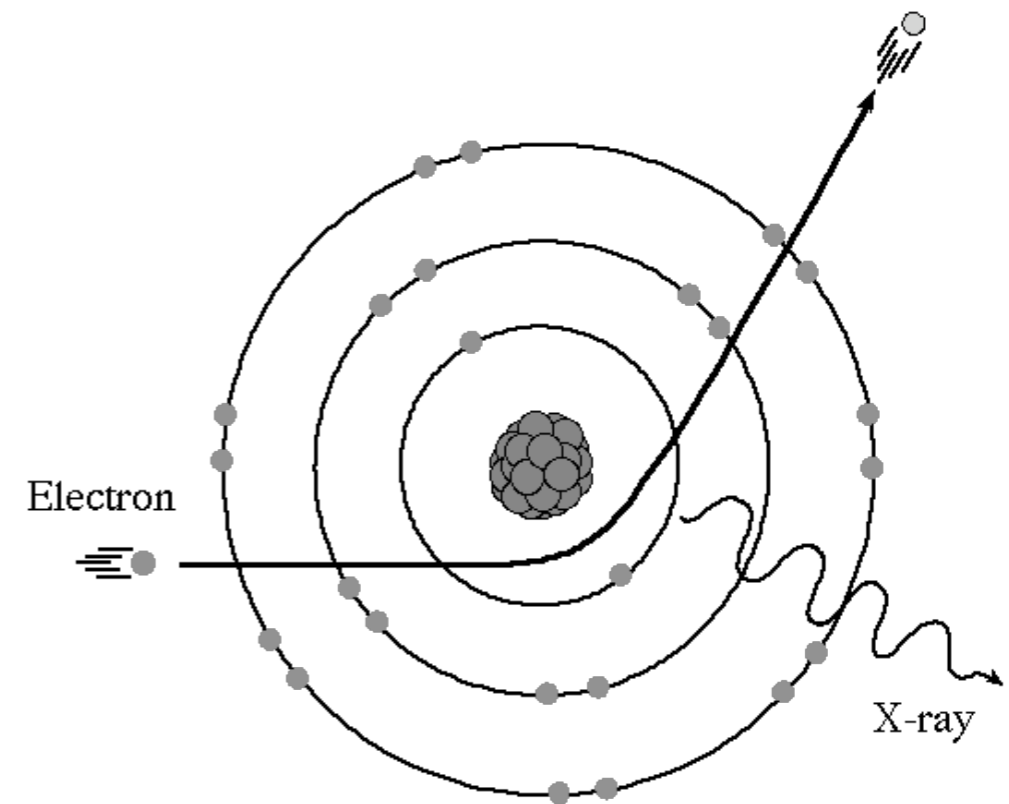
- Geladene Teilchen verlieren Energie durch elektromagnetische Wechselwirkung mit Atomen: **Ionisation**
- Energieverlust pro Längeneinheit: **dE/dx**
- dE/dx unterschiedlich für unterschiedliche Teilchenarten
→ **Teilchenidentifikation**



dE/dx in PEP4/9-Zeitprojektionskammer

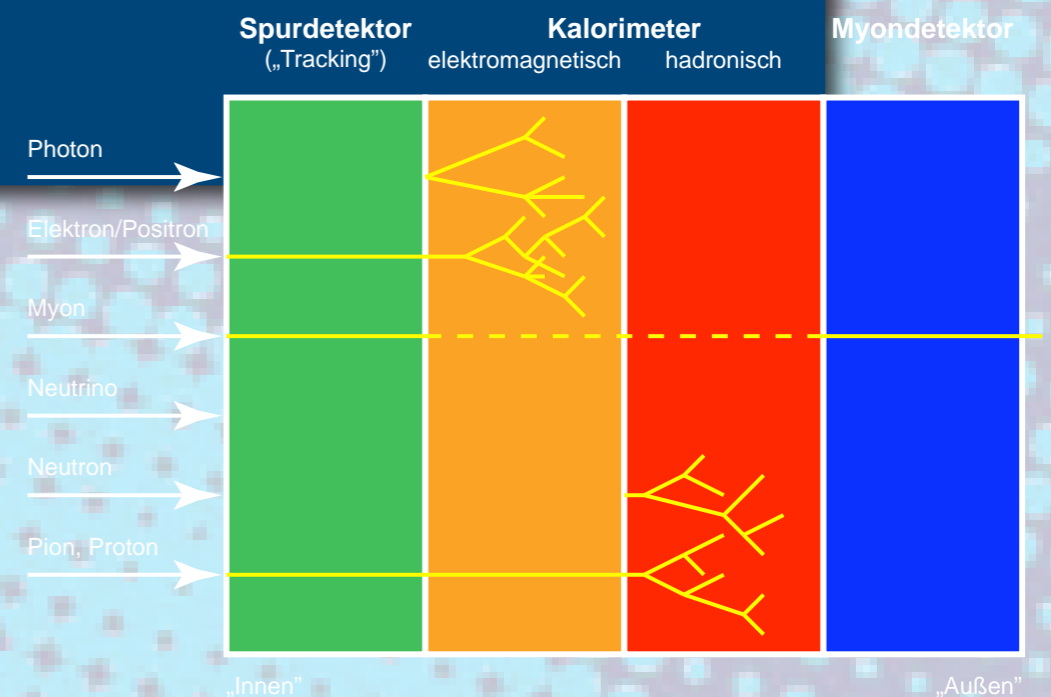
[Particle Data Group]

- Energieverlust von **Elektronen**
 - Geringe **Masse**:
 $m_e = (1/200) m_\mu = (1/1800) m_p$
 - Wichtigster Mechanismus für Energieverlust: **Bremsstrahlung** ($\sim 1/m^4$)
(Emission von Photonen im Coulombfeld des Atomkerns)
- **Myonen** durchdringen mehr Materie als andere geladene Teilchen → Nachweis in „äußerer Zwiebelschale“
 - Myonen sind Leptonen: keine starke Wechselwirkung
 - Myonen sind schwer: Bremsstrahlung vernachlässigbar

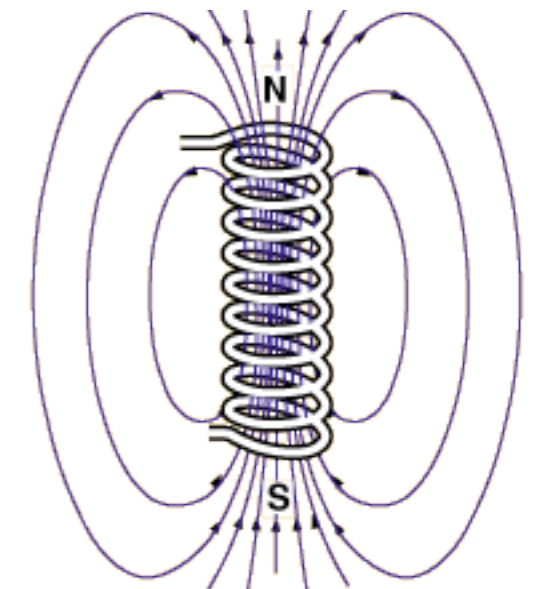
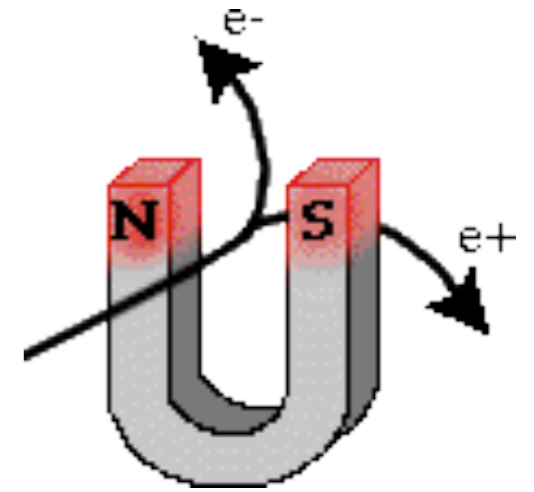




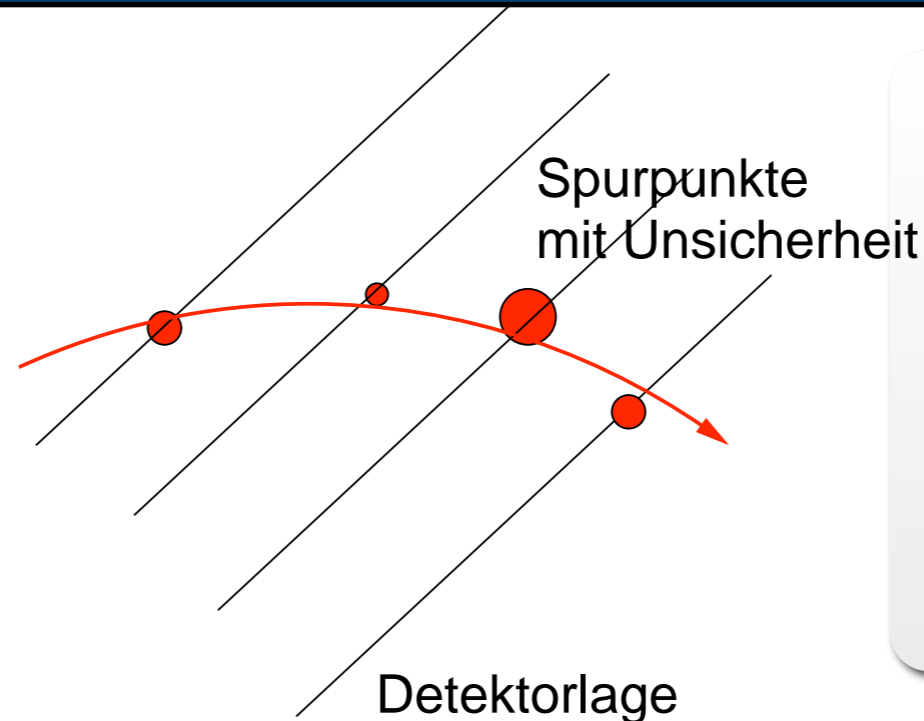
Impulsmessung mit Spurdetektoren



- Geladene Teilchen werden von **Magnetfeldern** abgelenkt
- **Lorentzkraft** als Zentripetalkraft: $e \vec{v} \times \vec{B} = \frac{mv^2}{r} \cdot \frac{\vec{r}}{r}$
- Typische Magnete in Collider-Detektoren
 - **Solenoidmagnet** (häufig supraleitend) mit Rückflussjoch
 - Ausnahme: LHCb → **Dipolmagnet**
- Homogenes Magnetfeld: **helikale** (= schraubenlinienförmige) Bewegung
 - Senkrecht zu Feldlinien: Kreisbahn
 - Parallel zu Feldlinien: gleichförmig-geradlinig
- Impuls senkrecht zu B aus **Krümmungsradius** der Teilchenspur:
 $p_T[\text{GeV}/c] = 0.3 B[\text{T}] \cdot r[\text{m}]$



- Mehrlagiger Spurdetektor
- Elektrische Signal in jeder Detektorlage
→ **Spurpunkte**
- Spuranpassung:
 - **Mustererkennung**: liegen Spurpunkte auf gemeinsamer Helixbahn?
 - **Spurfit**: Anpassung der Helixparameter
- Vertexanpassung: zeigen Spuren auf gemeinsamen Ursprungsort („Vertex“)?

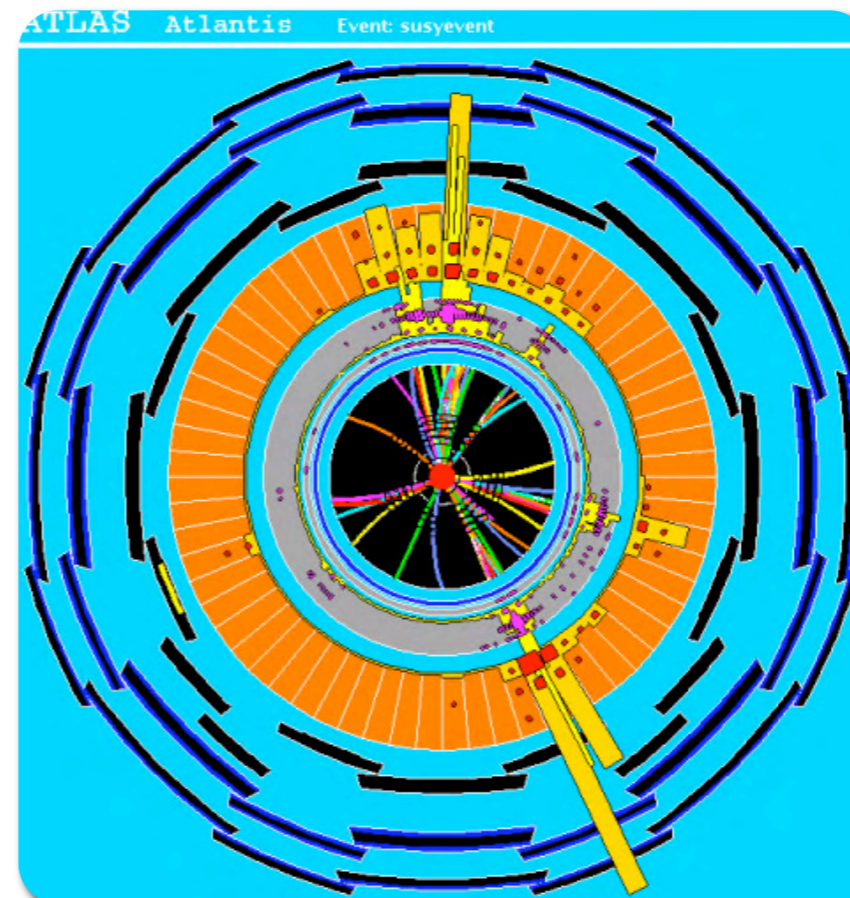


Spuranpassung: minimiere

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sigma_i^2}$$

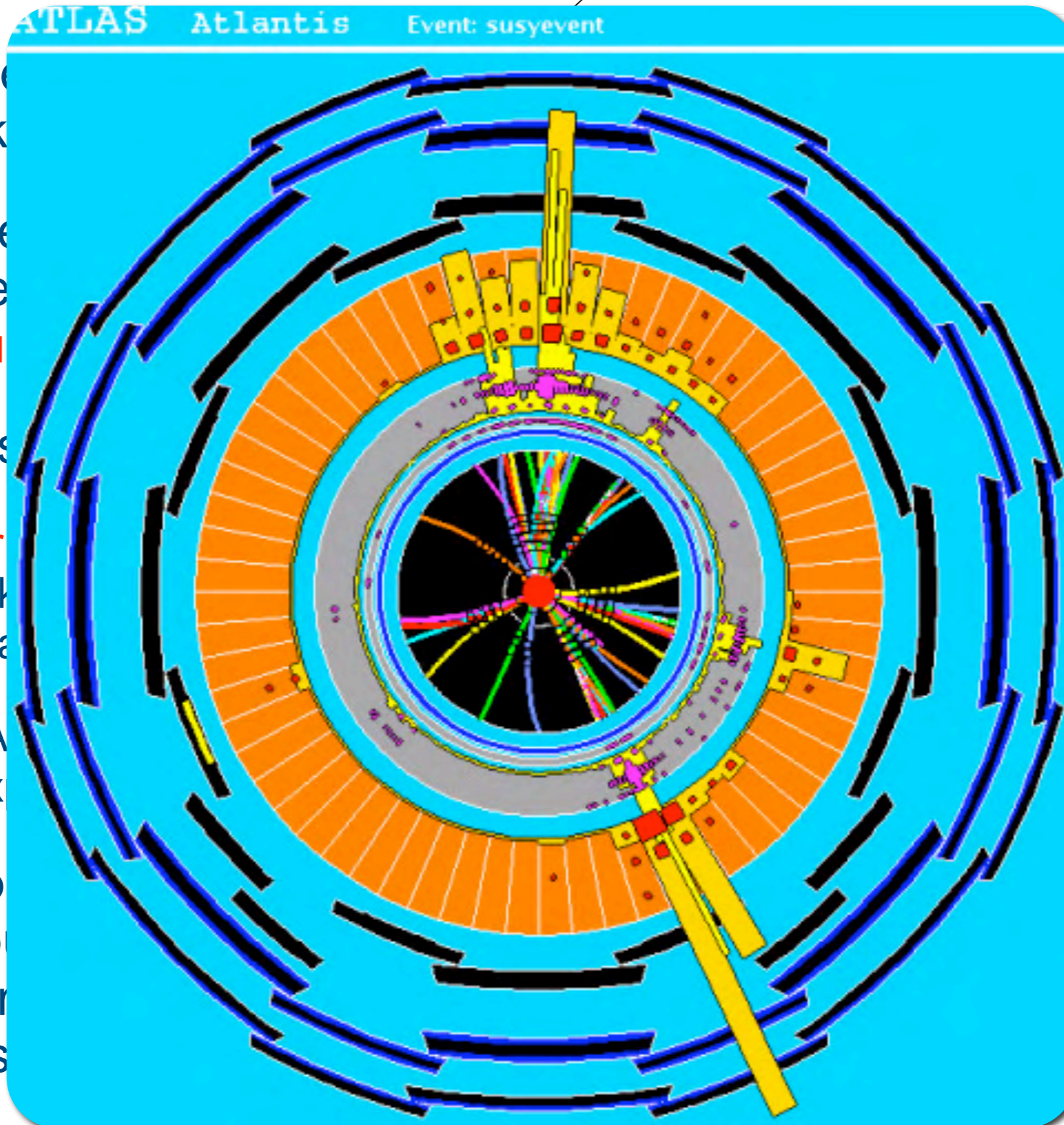
x_i Messung

σ_i Unsicherheit



Simulierter Zerfall eines supersymmetrischen Teilchens (Seitenansicht)

- Mehrlagige Spurdetektoren
- Elektrische Ladung jeder Detektorzelle → **Spurpunkte**
- Spuranpassung
- **Mustererkennung**: Spurpunkte gemeinsam
- **Spurfit**: Abgleich der Helix
- Vertexanpassung zeigen Spur gemeinsame Ursprungs



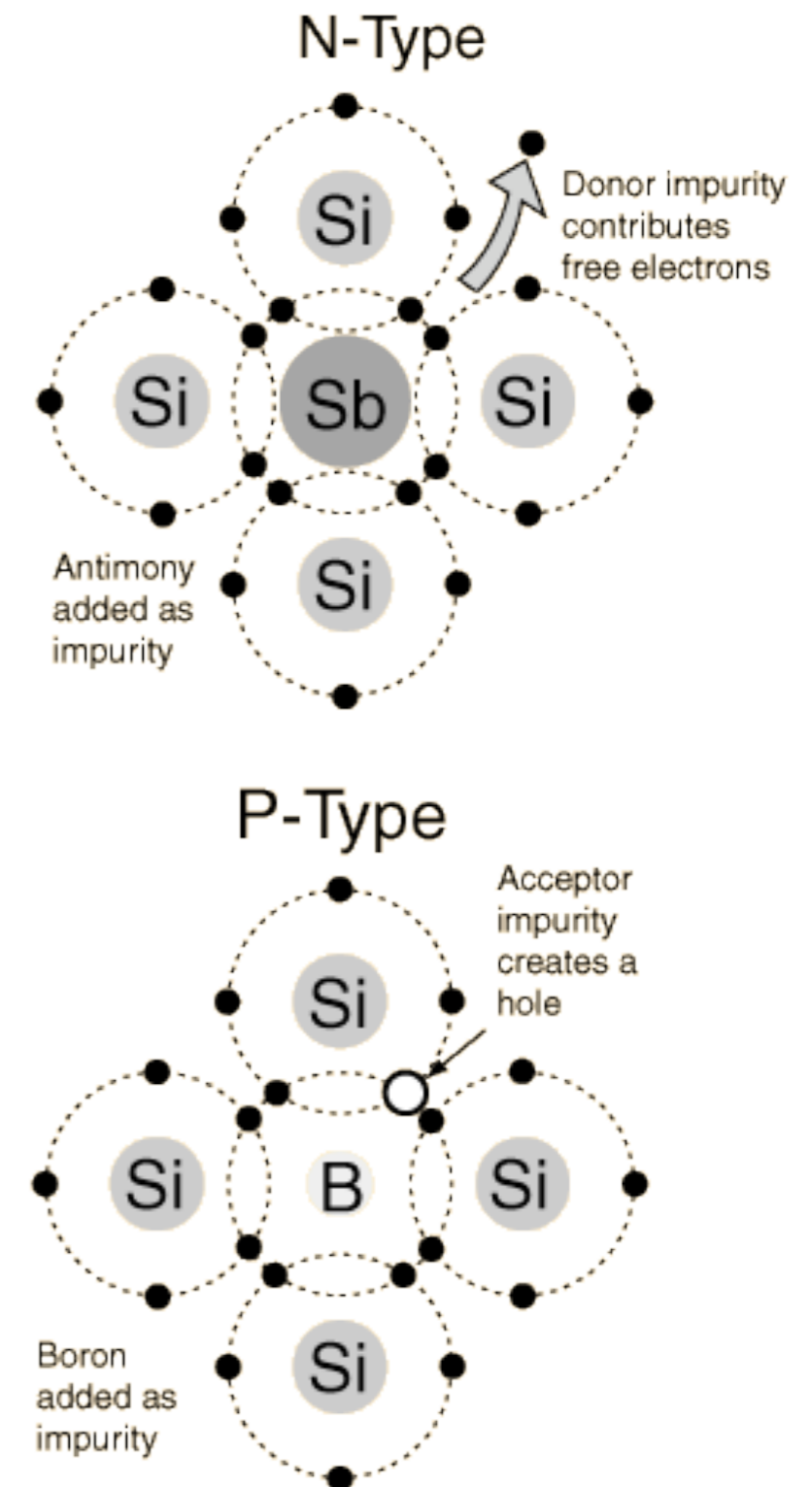
Minimierung: minimiere

$$\chi^2 = \sum \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sigma_i^2}$$

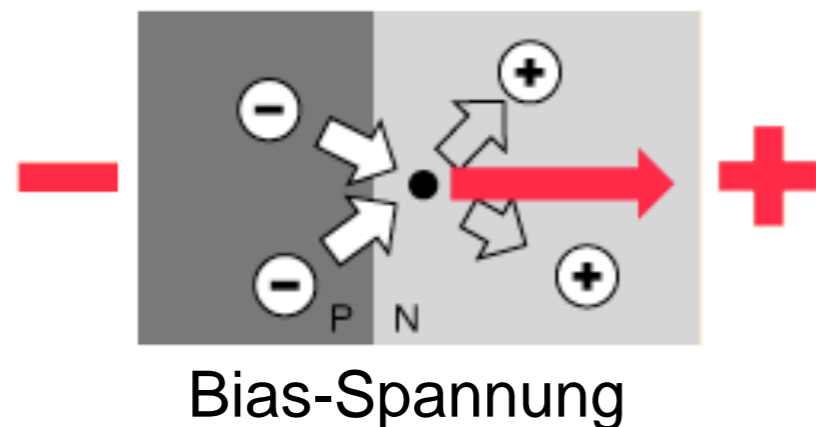
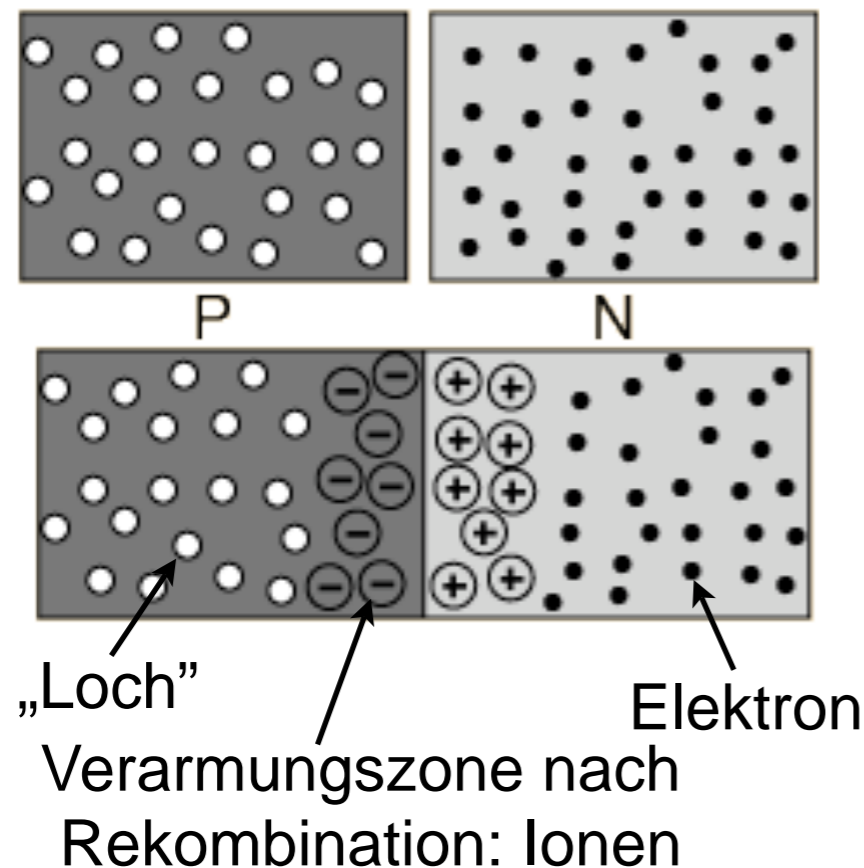
Minimierung
Genauigkeit

Simulierter Zerfall
eines super-
symmetrischen
Teilchens
(Seitenansicht)

- Heutige Spurdetektoren: **Halbleitertechnologie**
- Typische Halbleiter (z.B. Silizium, GaAs)
 - Kristallgitter mit **4 Valenzelektronen**
 - Zwei Arten von **Ladungsträgern**:
 - Negativ – freie Elektronen
 - Positiv – Elektronen wandern zwischen freien Positionen im Kristallgitter („Löcher“)
- Veränderung der Eigenschaften durch **Dotierung**:
 - Füge Atome mit 5 Valenzelektronen hinzu (P, As, Sb): „**n-dotiert**“ (zusätzliche Elektronen)
 - Füge Atome mit 3 Valenzelektronen hinzu (B, Al, Ga, In): „**p-dotiert**“ (zusätzliche Löcher)
- Tieferes Verständnis: Bändermodell



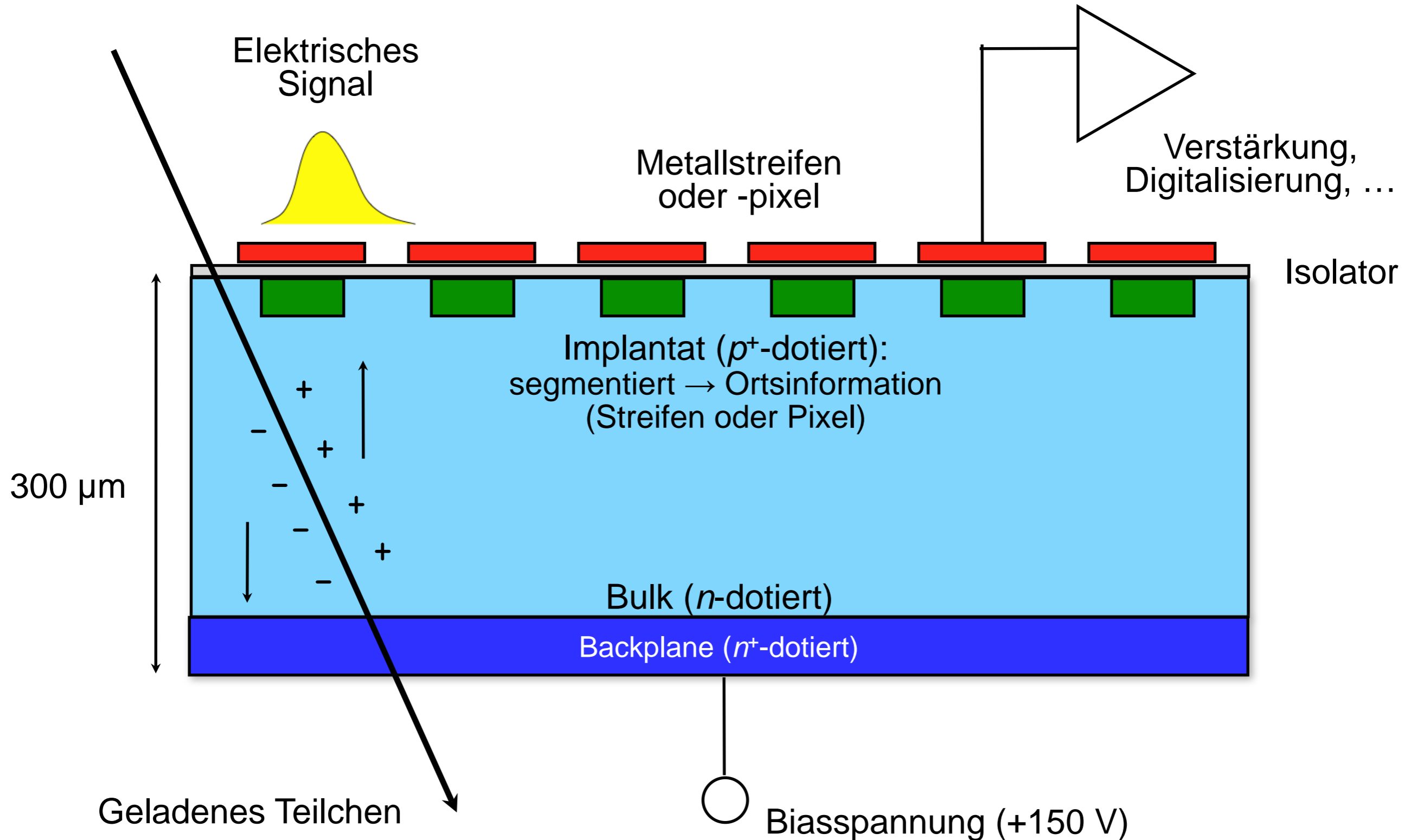
[hyperphysics.phy-astr.gsu.edu]



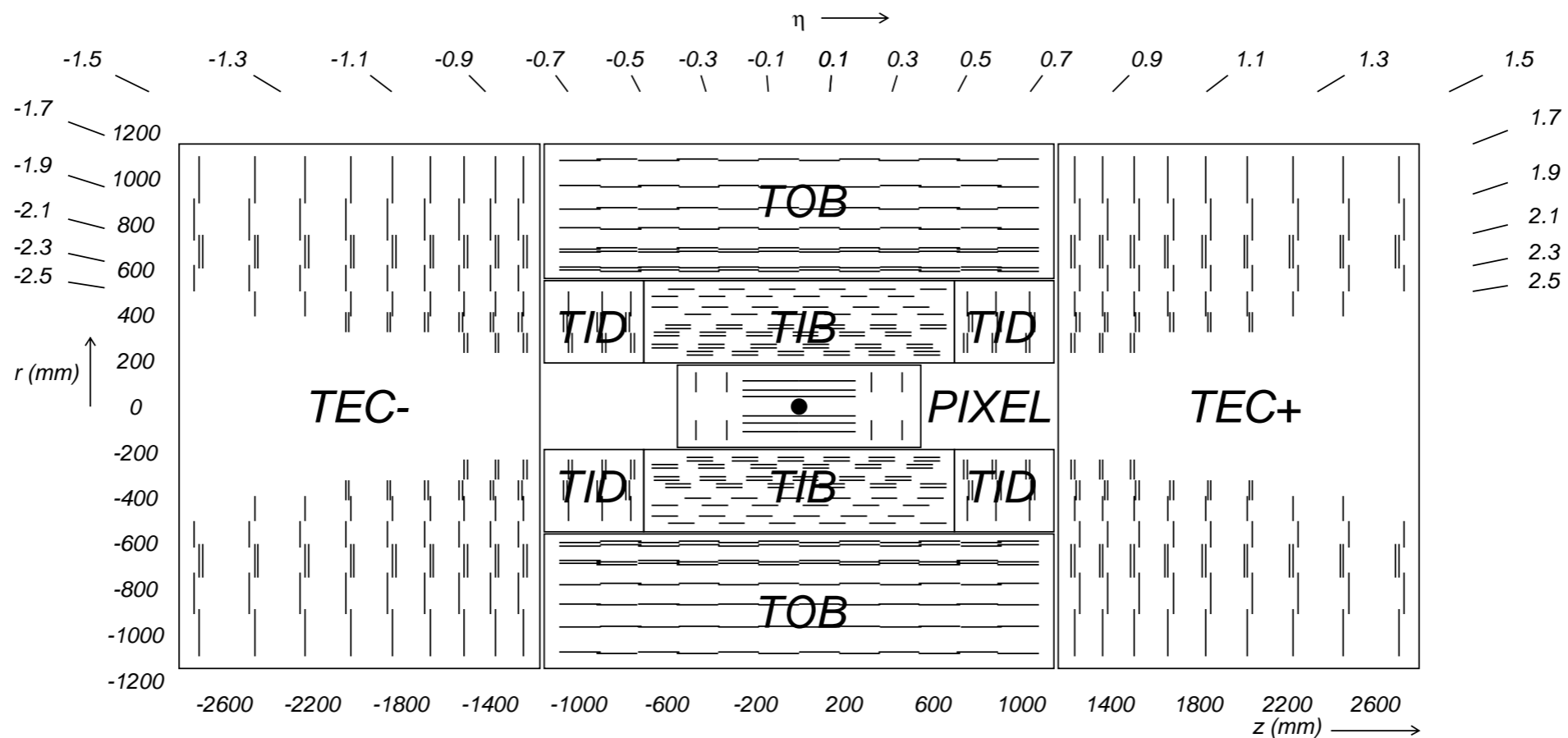
[hyperphysics.phy-astr.gsu.edu]

- Übergang zwischen p -dotiertem und n -dotiertem Halbleiter
- Ladungsträger **diffundieren** zur anderen Seite und **rekombinieren**
- Ausbildung einer nicht-leitenden Schicht („Verarmungszone“)
- (Umgekehrte) Bias-Spannung
- Entfernung von Ladungsträgern
→ **Vergrößerung** der Verarmungszone
- Durchgang geladene Teilchen: neue Ladungsträger durch **Ionisierung**
→ elektrisches Signal

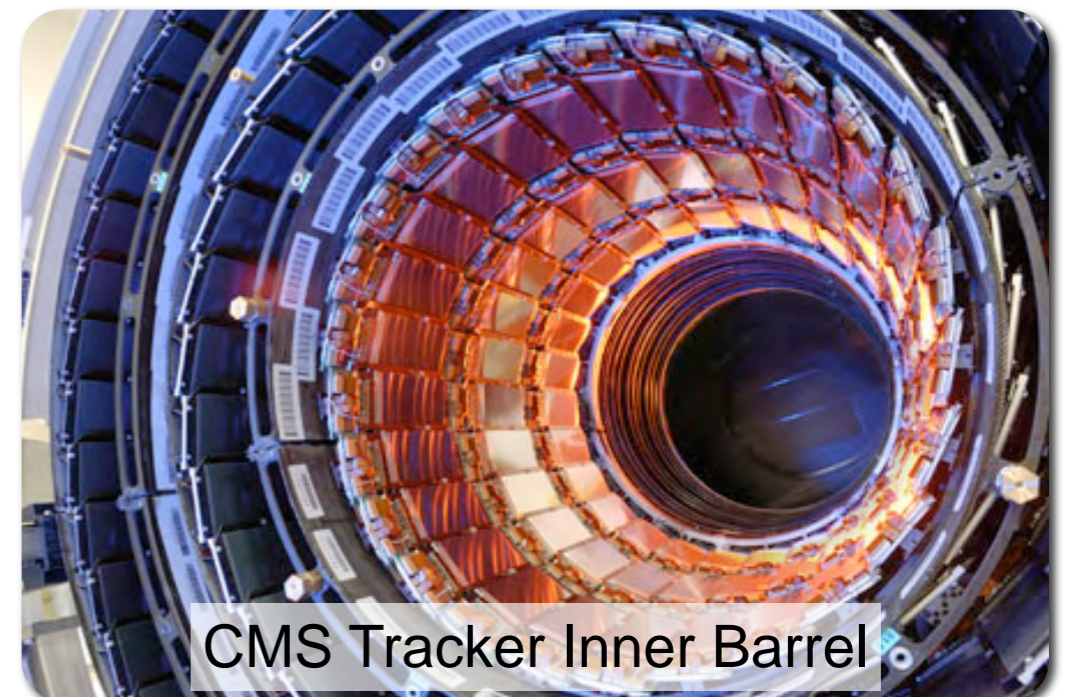
Funktionsprinzip: Siliziumdetektoren



Beispiel: CMS-Spurdetektor

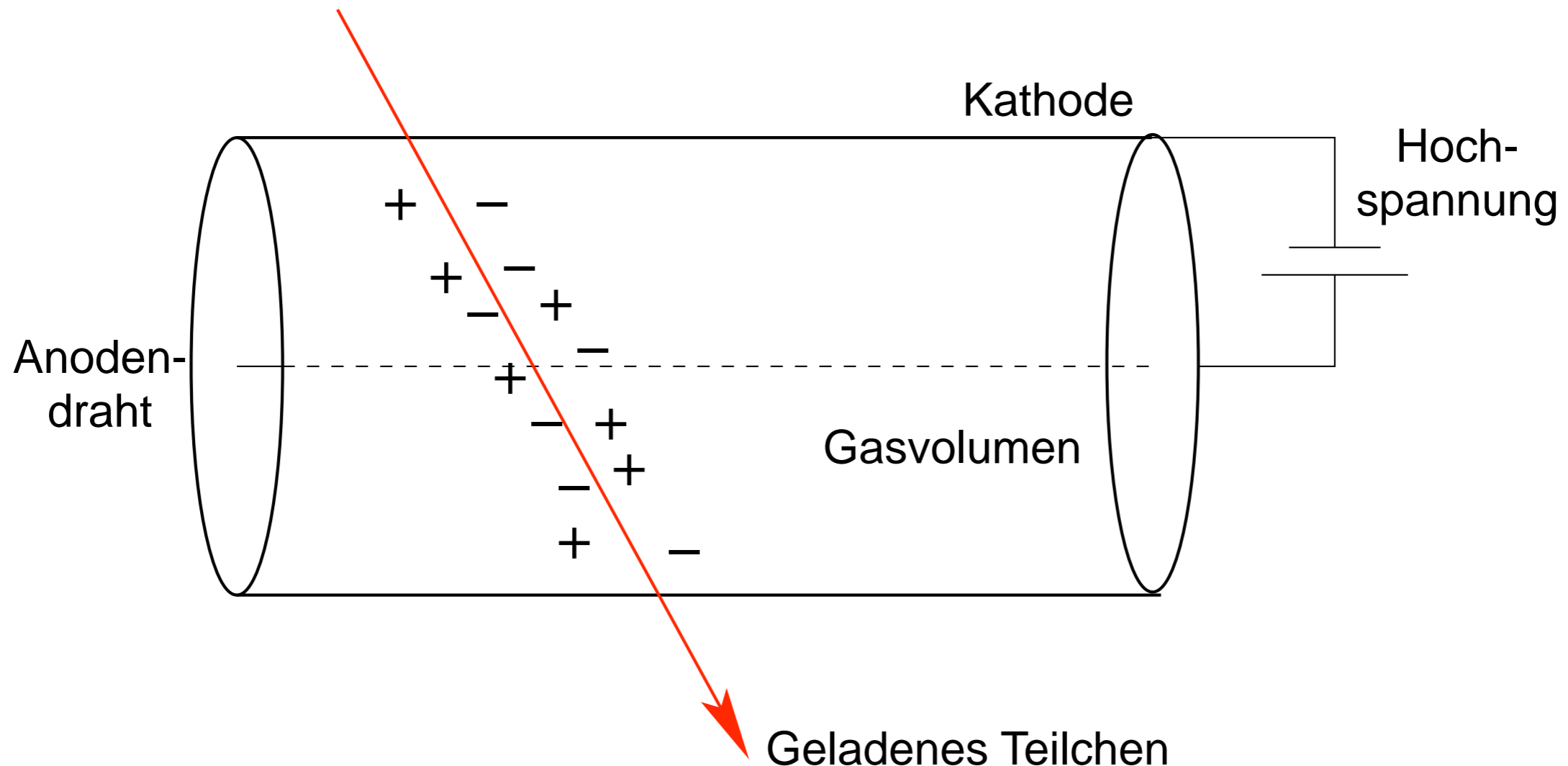


- CMS-Experiment: **gesamter** Spurdetektor aus Silizium
- Mehr als **200 m² Detektorfläche**, mehr als 60 Millionen Auslesekanäle
- Innere Lagen: **Pixeldetektoren** → hohe Auflösung
- Äußere Lagen: **Streifendetektoren** → große Abdeckung

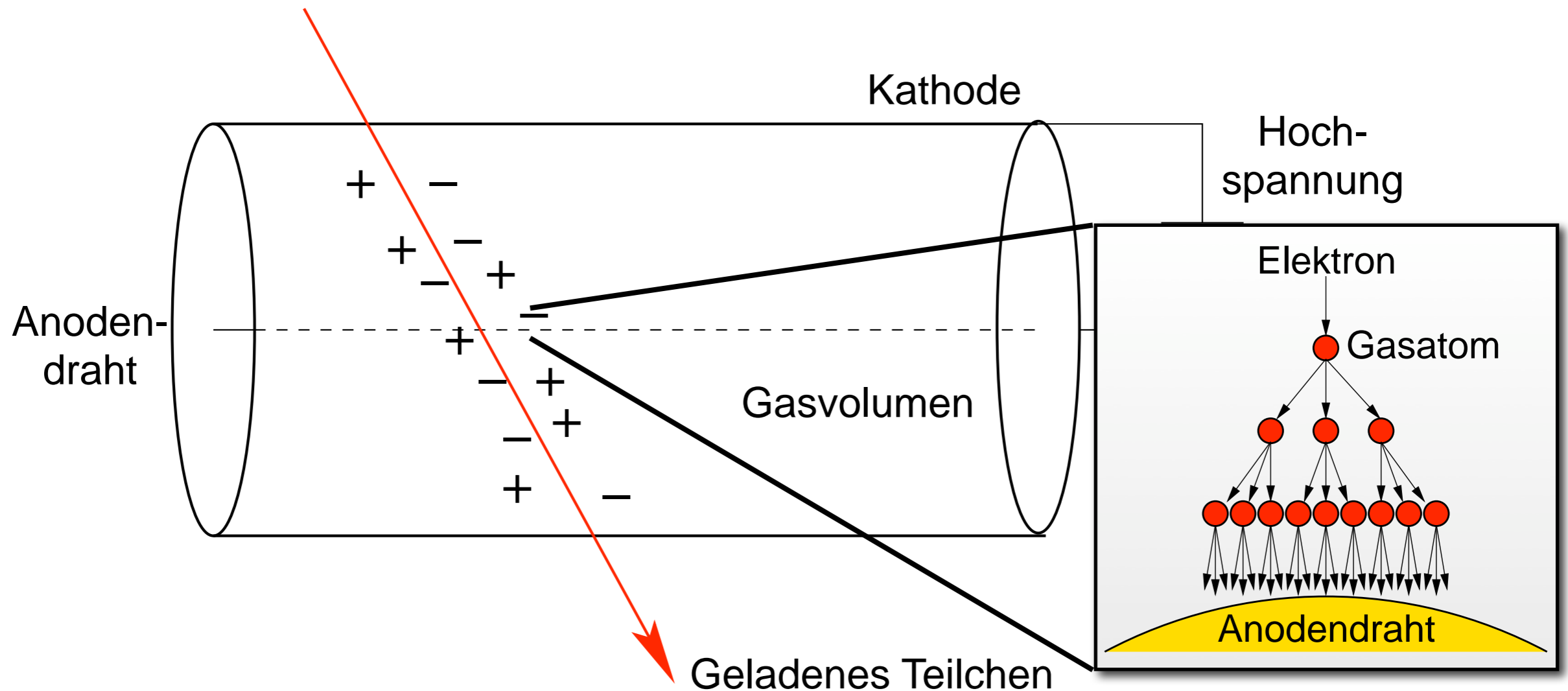


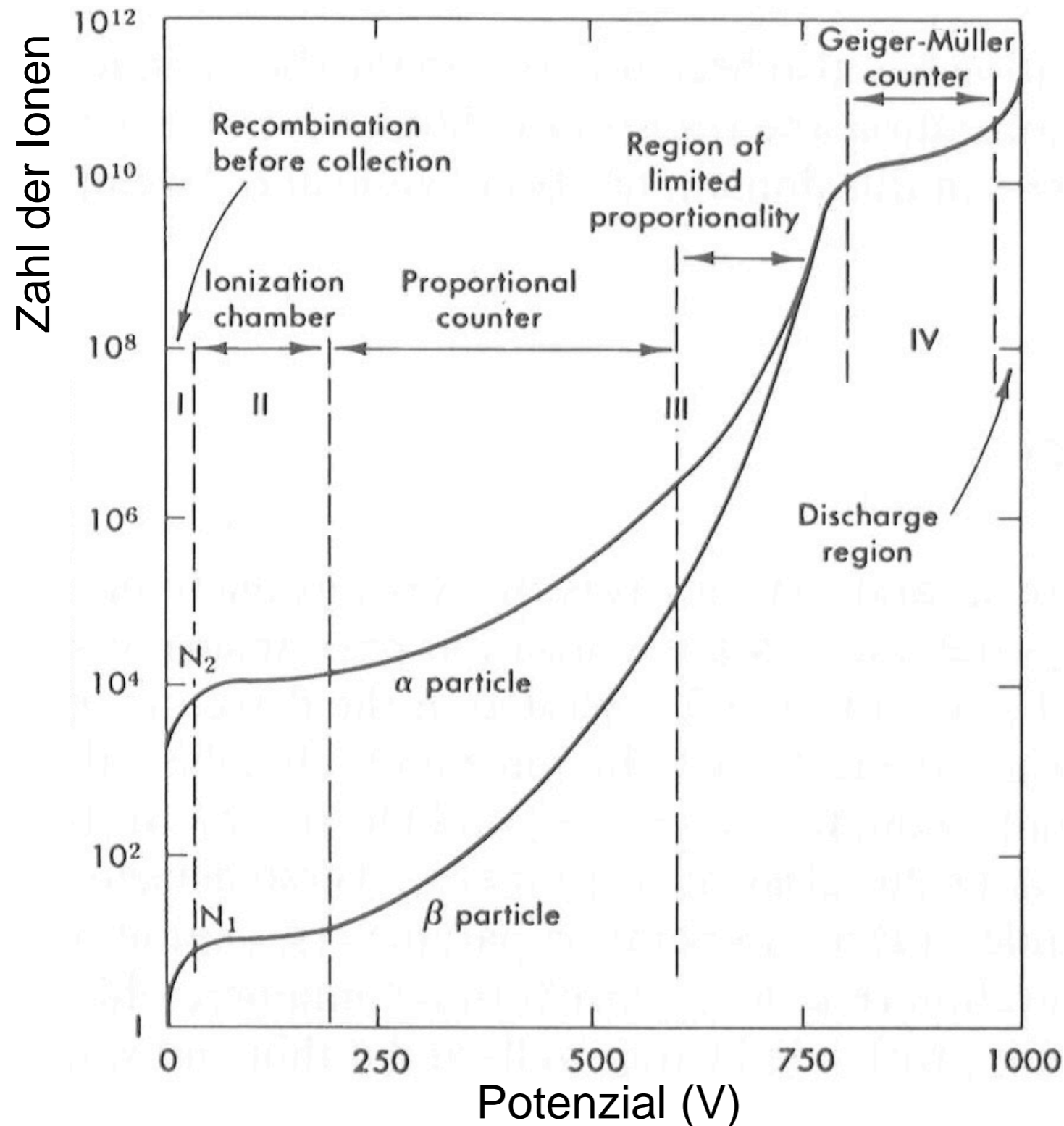
CMS Tracker Inner Barrel

- Geladene Teilchen durchfliegen Detektor mit „Zählgas“: **Ionisation** (5× mehr Energie pro Ionisation als bei Silizium notwendig)
- Hochspannung zwischen Anode und Kathode: **Gasverstärkung** (Townsend-Lawine)



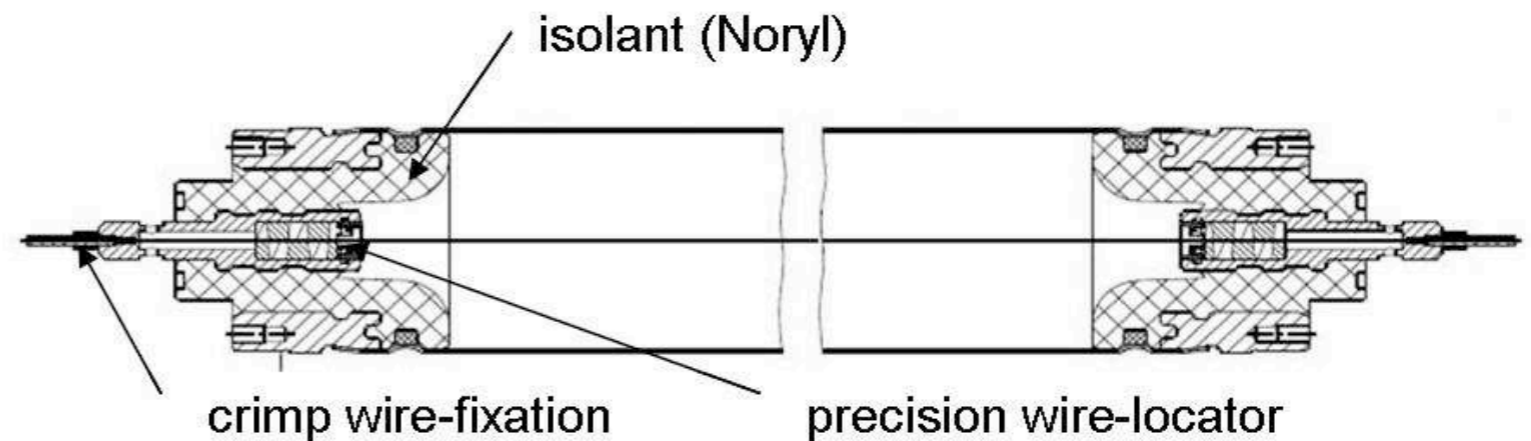
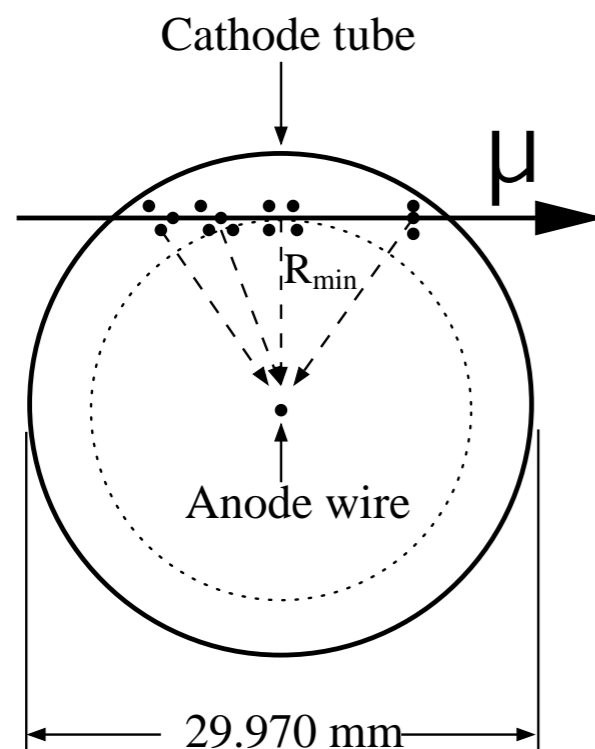
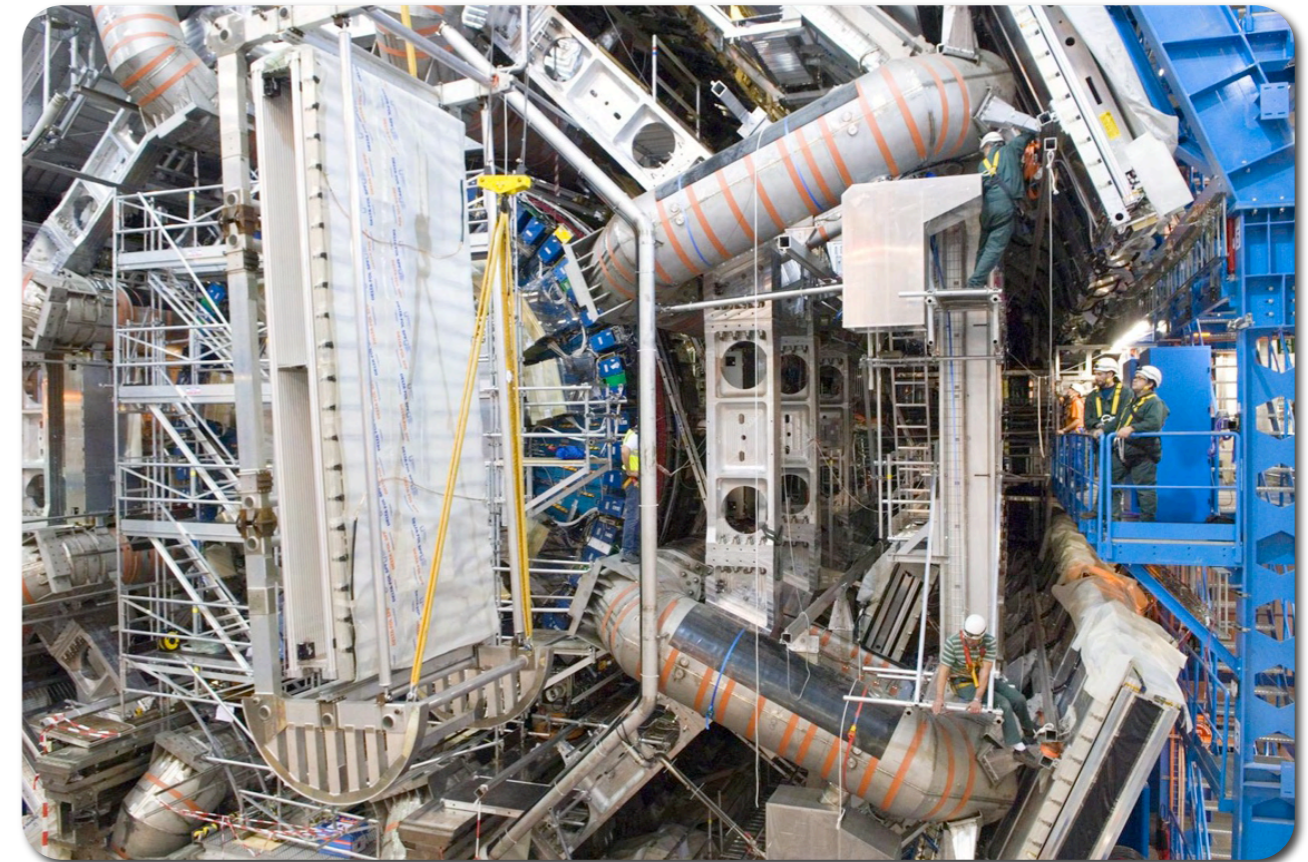
- Geladene Teilchen durchfliegen Detektor mit „Zählgas“: **Ionisation** (5× mehr Energie pro Ionisation als bei Silizium notwendig)
- Hochspannung zwischen Anode und Kathode: **Gasverstärkung** (Townsend-Lawine)





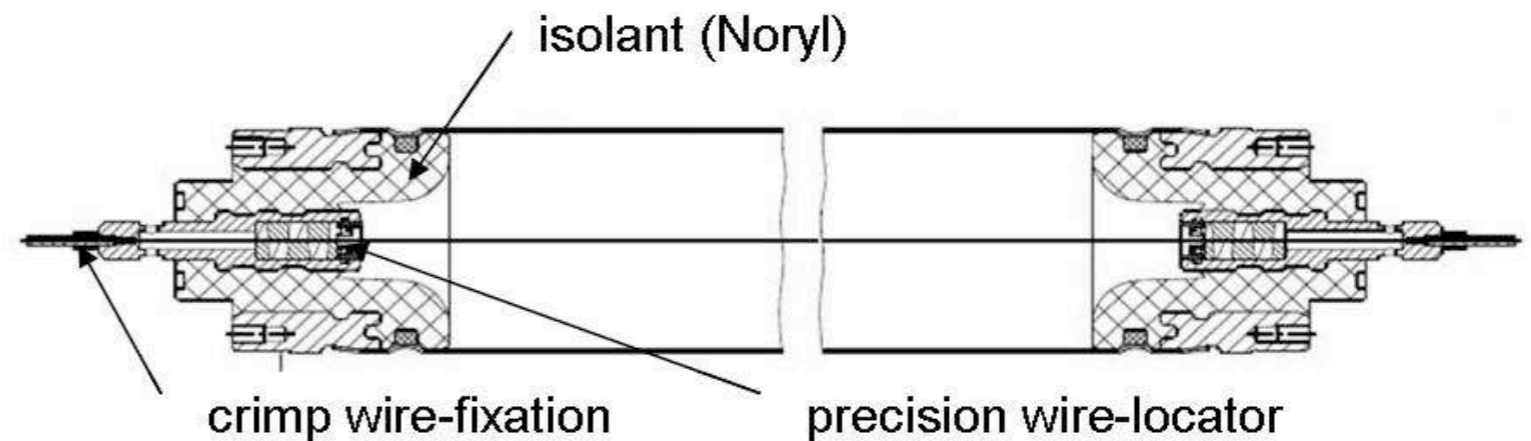
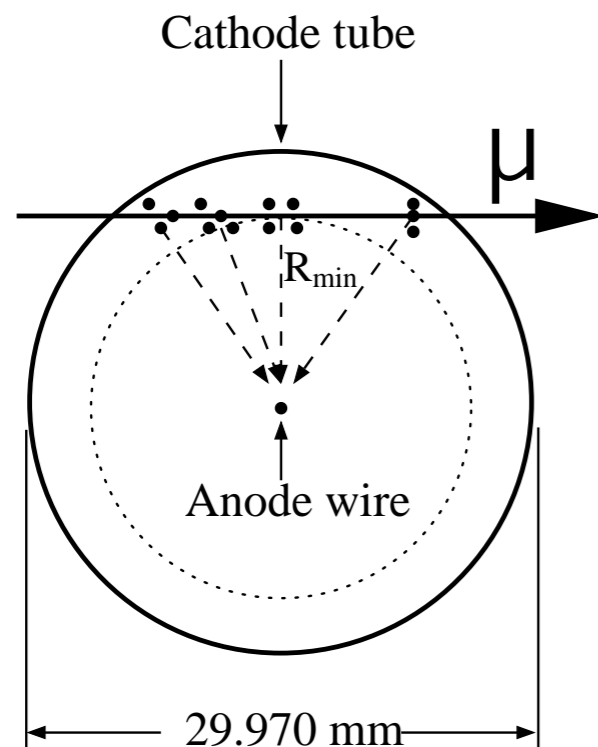
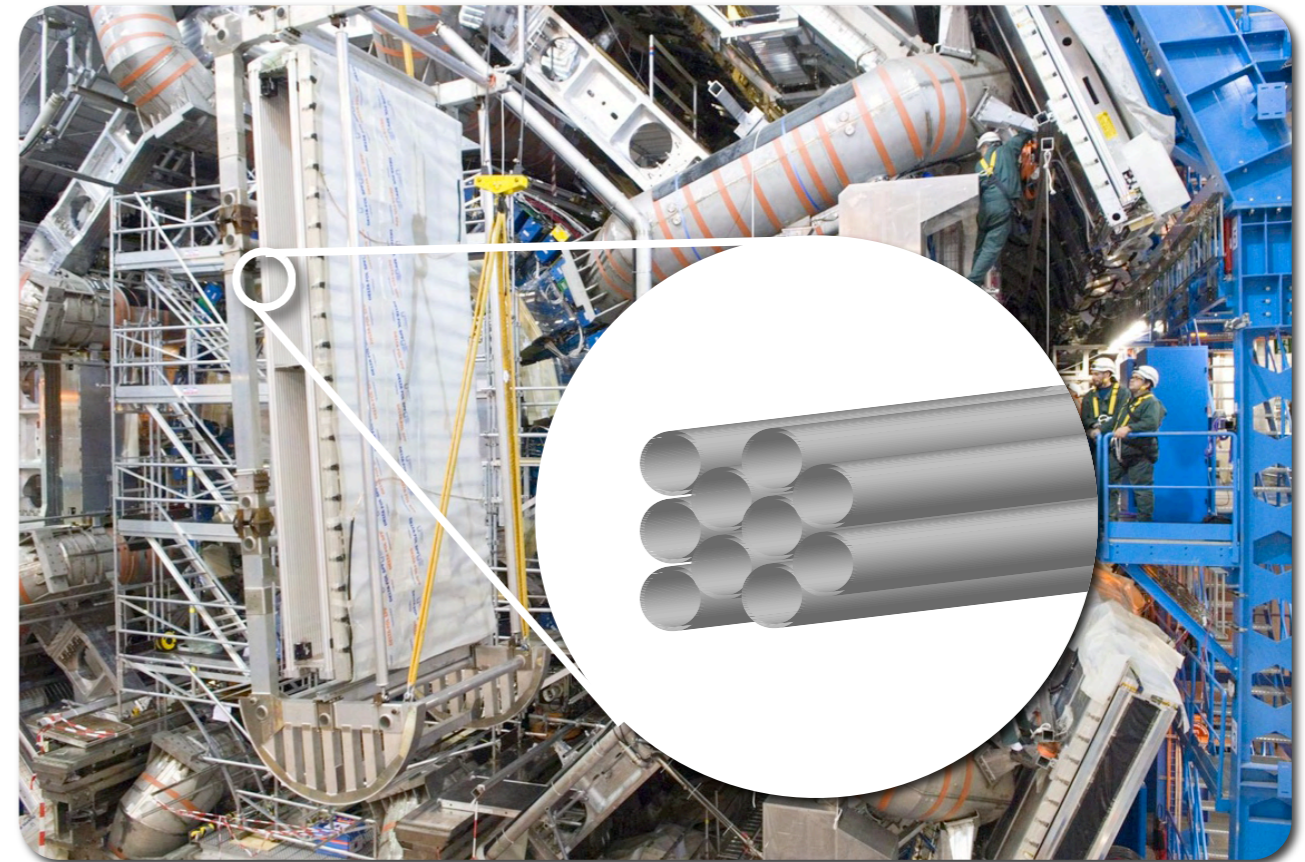
- **Ionisationskammer:** keine Gasverstärkung
- **Proportionalzähler:** Signal proportional zur Primärionisation
- **Geiger-Müller-Modus:** Zählung der durchgehenden Teilchen
- Typische „Zählgase“
 - **Zählen:** Argon
 - **Löschen** der Ladungslawine: CO_2

- Nachweis von Myonen in ATLAS
- Myonen: einzige Teilchenart, die Kalorimeter durchdringt
- Genaue Impulsmessung: 5500 m² **Driftröhren** (MDT = monitored drift tubes) in starkem ringförmigen Magnetfeld



Zählgas: Argon/CO₂ (93%,7%)
Betriebsspannung: ca 3000 V

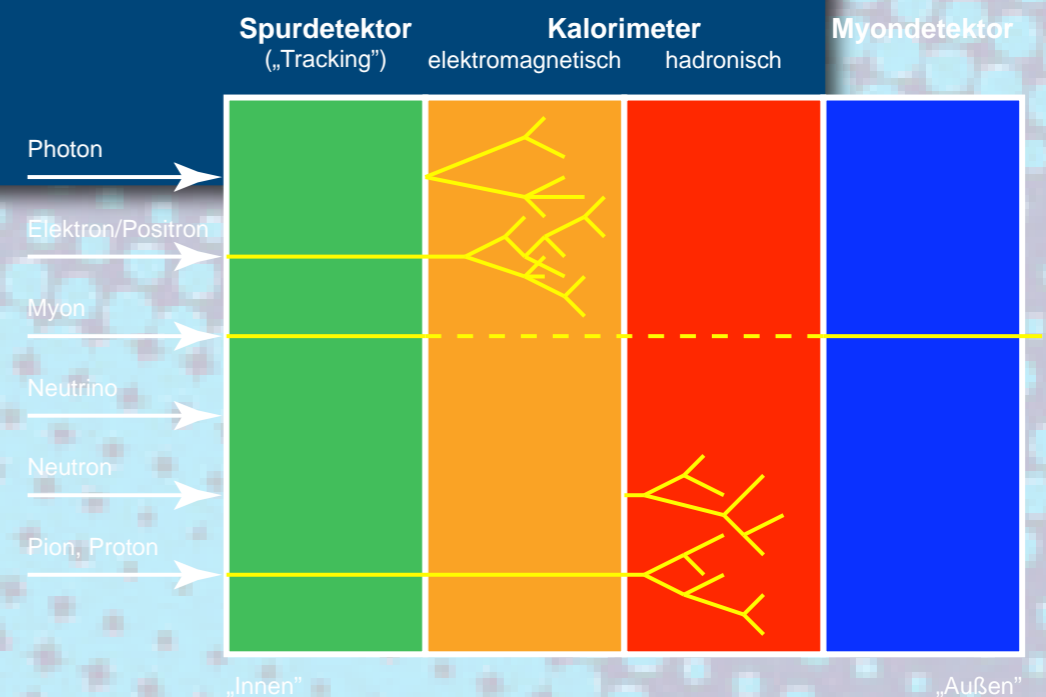
- Nachweis von Myonen in ATLAS
- Myonen: einzige Teilchenart, die Kalorimeter durchdringt
- Genaue Impulsmessung: 5500 m² **Driftröhren** (MDT = monitored drift tubes) in starkem ringförmigen Magnetfeld



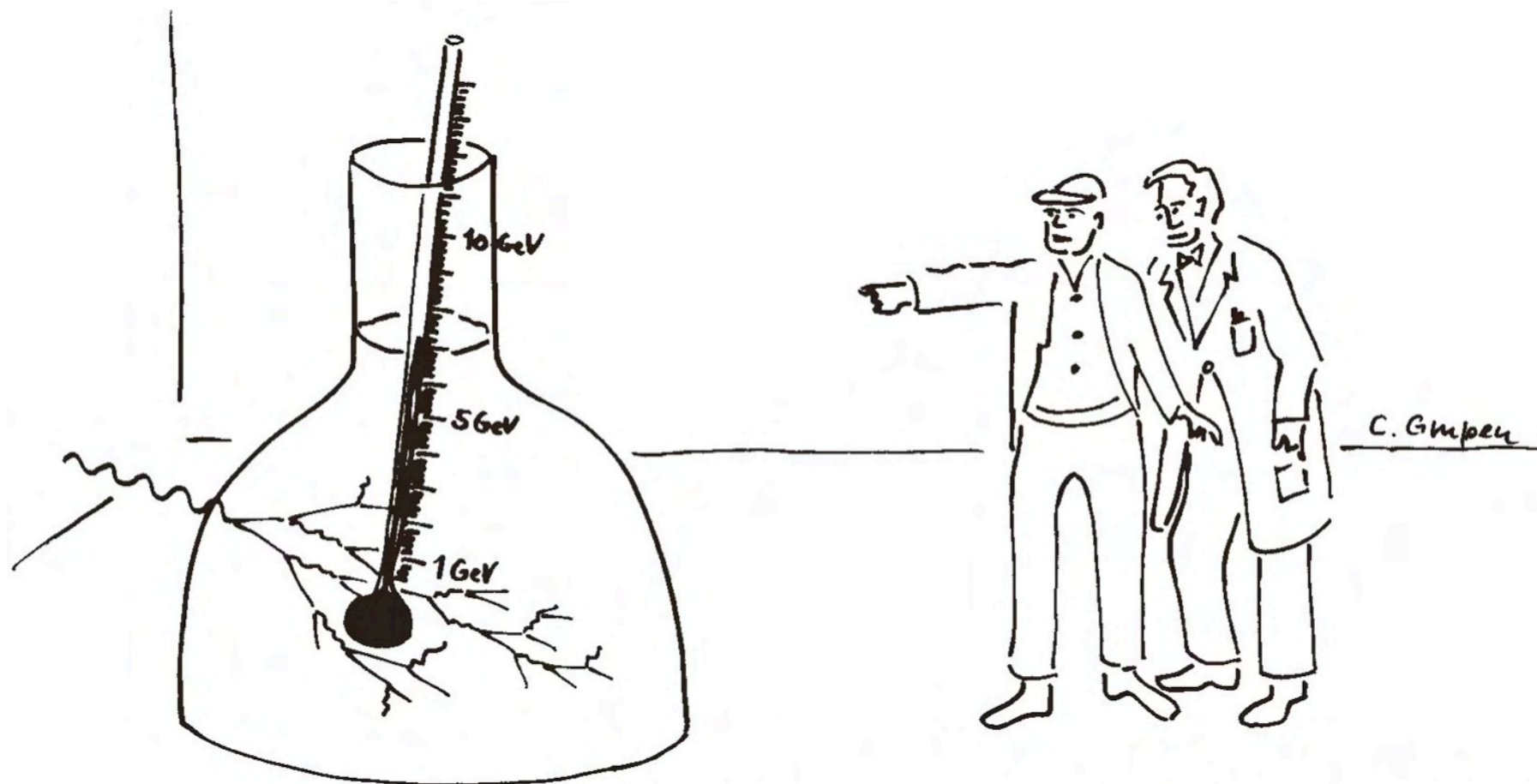
Zählgas: Argon/CO₂ (93%,7%)
Betriebsspannung: ca 3000 V



Energiemessung mit Kalorimetern

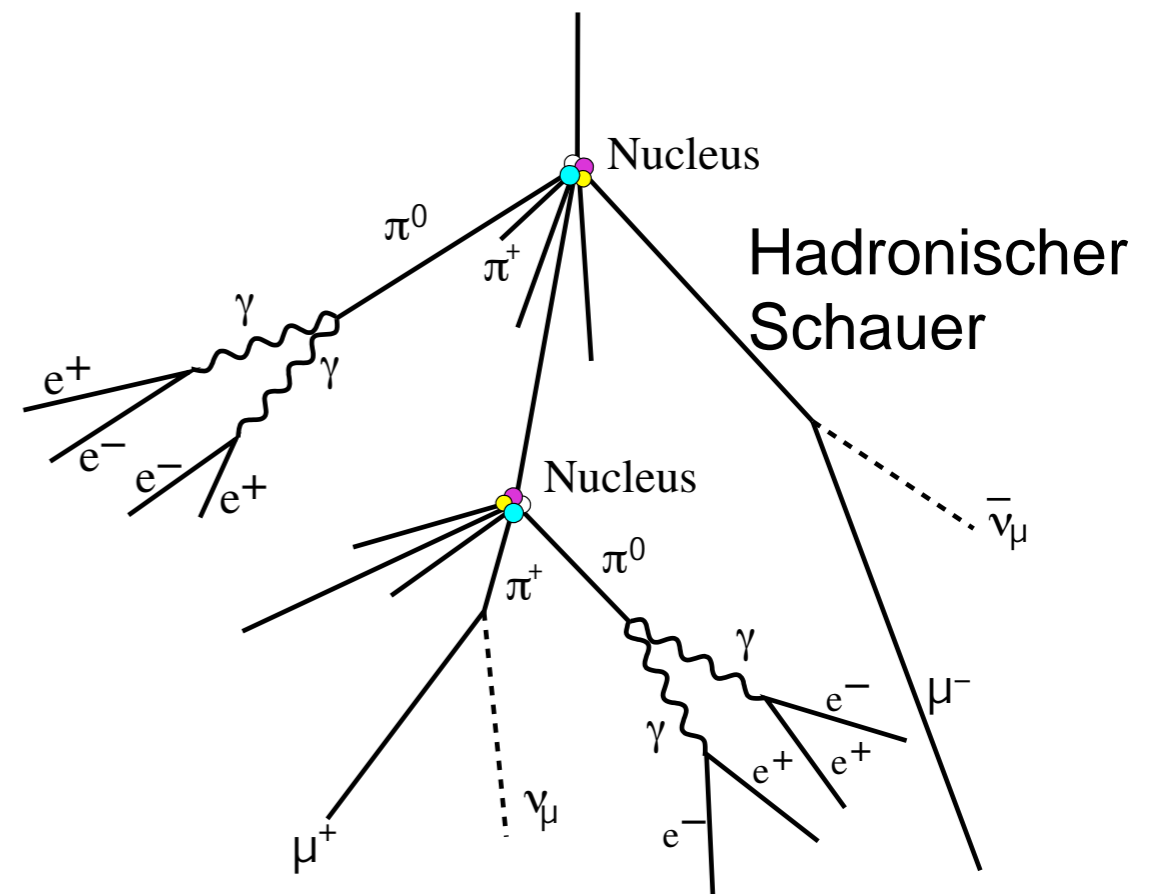
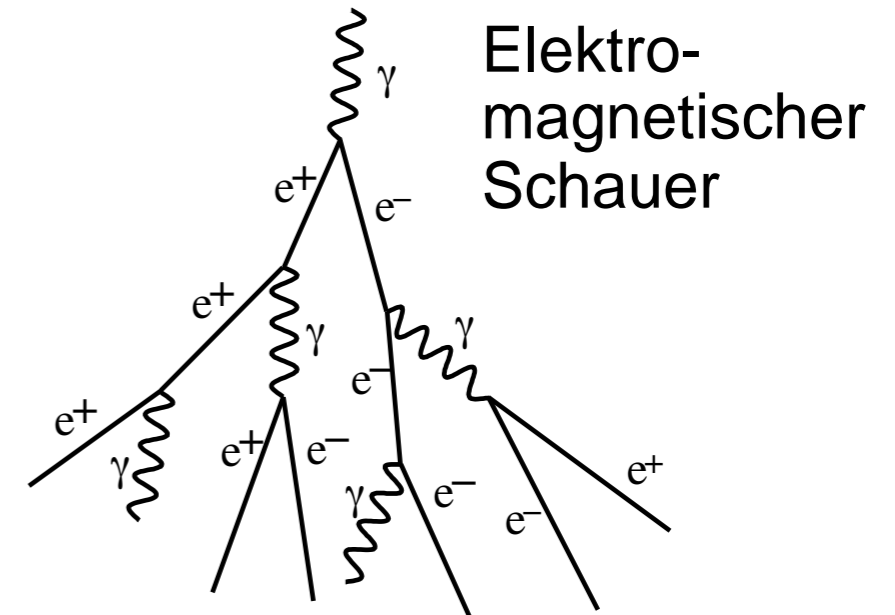


- Historisch: Kalorimeter = „**Wärmemesser**“
- Teilchenphysik: Kalorimeter = „**Energiesmesser**“
- Idee: messe **Teilchenenergie** mittels (teilweiser) **Absorption** in schwerem Detektormaterial



“Look, our new total absorption calorimeter!”

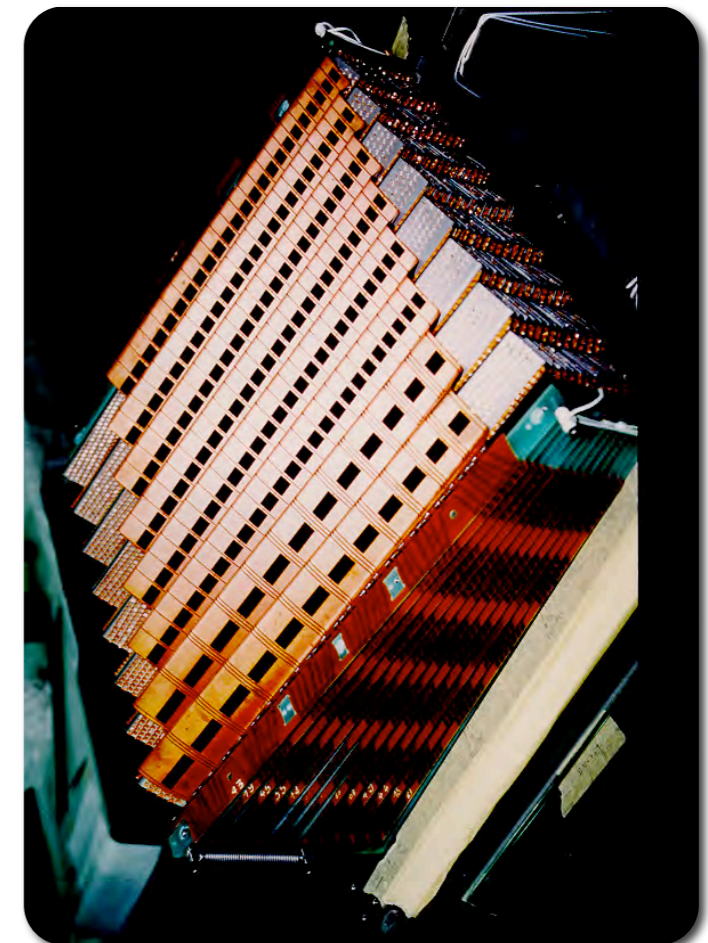
- Teilchen wechselwirken mit Detektormaterial im Kalorimeter: **Schauer** neuer Teilchen
- Wechselwirkungen in Materie: stark unterschiedlich zwischen Elektronen/Photonen und Hadronen
 - **Elektromagnetische** Kalorimeter
 - **Hadronische** Kalorimeter
- **Gesamtlänge** aller Spuren im Schauer proportional zur **Energie** des Primärteilchens
- Teilchenidentifikation möglich durch Analyse der **Schauerform**



- **Homogene** Kalorimeter:
Schauernachweis in
gesamtem Detektorvolumen
- **Kristalle**: CsI(Tl), PbWO₄, ...
→ durchgehendes Teilchen
erzeugt **Lichtblitz** („Szintillation“)
- **Flüssige Edelgase**: Argon (LAr),
Krypton (LKr) → Ionisation
- **Sampling**-Kalorimeter:
Absorbermaterial und
sensitives Material wechseln
sich ab
- **Metall–Szintillator**: Blei, Eisen,
Uran + Plastiksintillator
- **Metall–Flüssige Edelgase**: Blei,
Kupfer, Messing + LAr

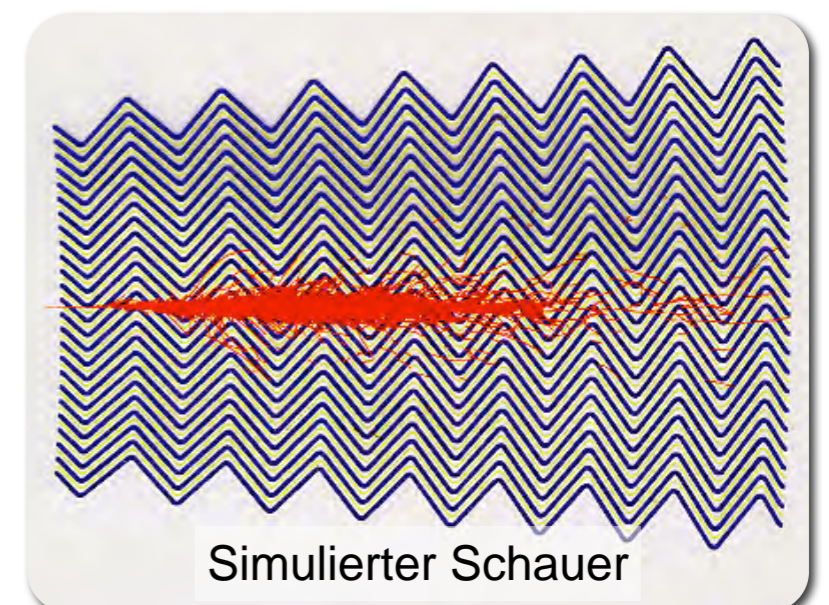
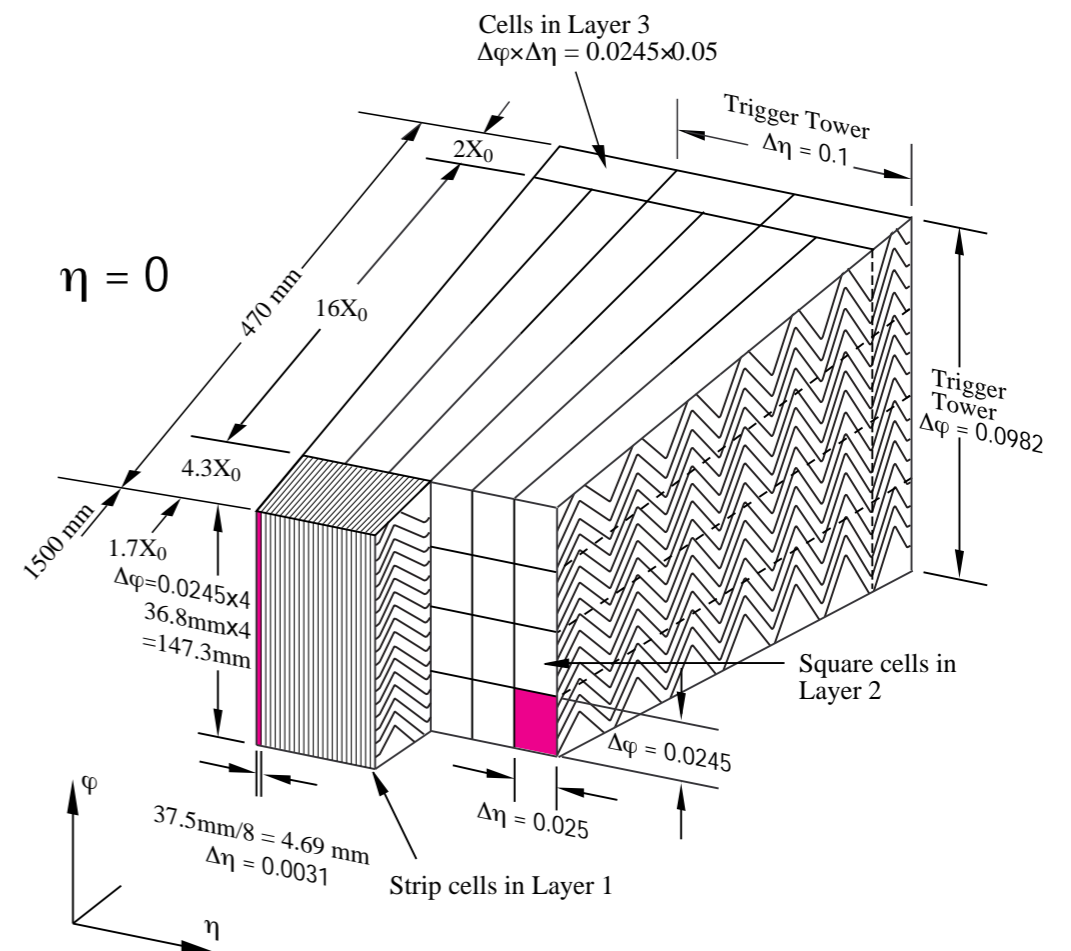


PbWO₄:
Rohmaterial für
elektromagne-
tisches Kalorimeter
bei CMS



Segment des
Flüssigargon-
Kalorimeters
(ATLAS)

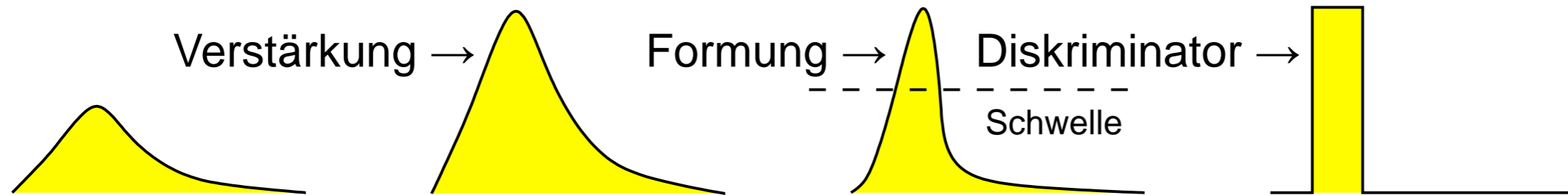
- Flüssigargon-Kalorimeter:
 - Durchgehendes Teilchen **ionisiert** hochreines flüssiges Argon
 - Erzeugte Ionen driften zu Elektroden (Spannung: ca. 2000 V), erzeugen elektrisches Signal
 - Betriebstemperatur: ca. 80 K (flüssiger Stickstoff)
- Elektromagnetisches Kalorimeter bei ATLAS
 - **Absorption** elektromagnetischer Schauer in **Bleiplatten**
 - Besonderheit Akkordeonstruktur: schnelle Auslese, keine Lücken in Detektorabdeckung





Vom Detektor zur Publikation

- Detektoren liefern in der Regel **kleine analoge Signal**
→ Vorverarbeitung **nah am Detektor** (“Front-End”)
- **ASD** (engl.: amplifier–shaper–discriminator)

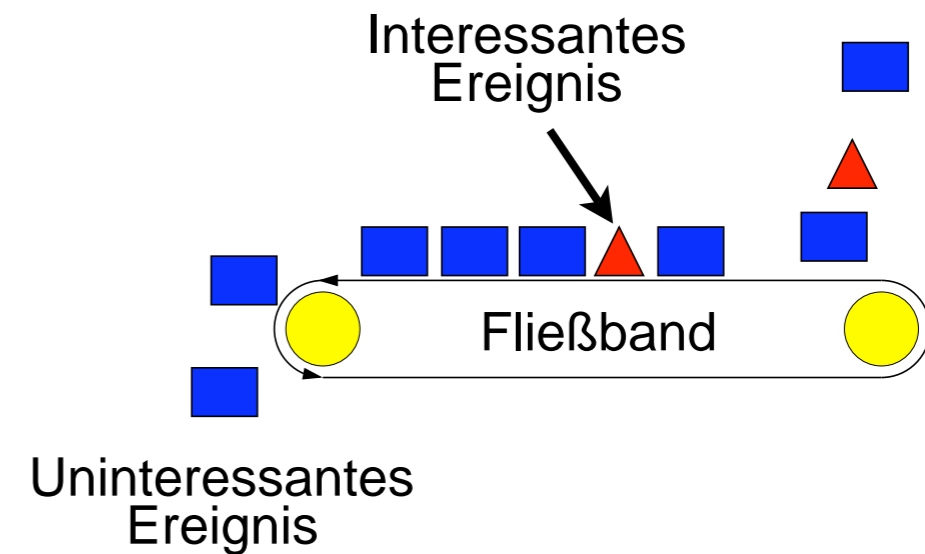


- **ADC** (engl.: analog–to–digital converter)

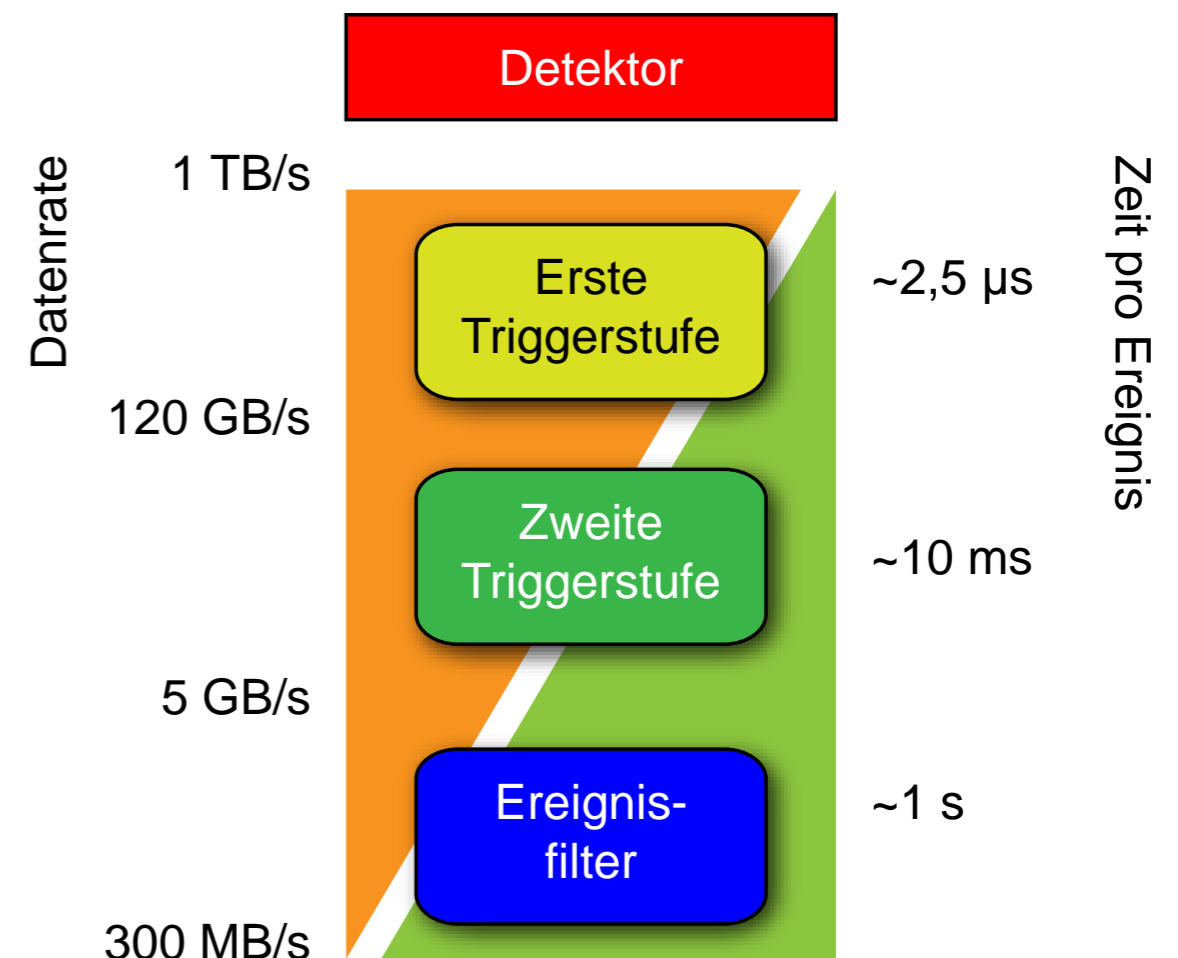
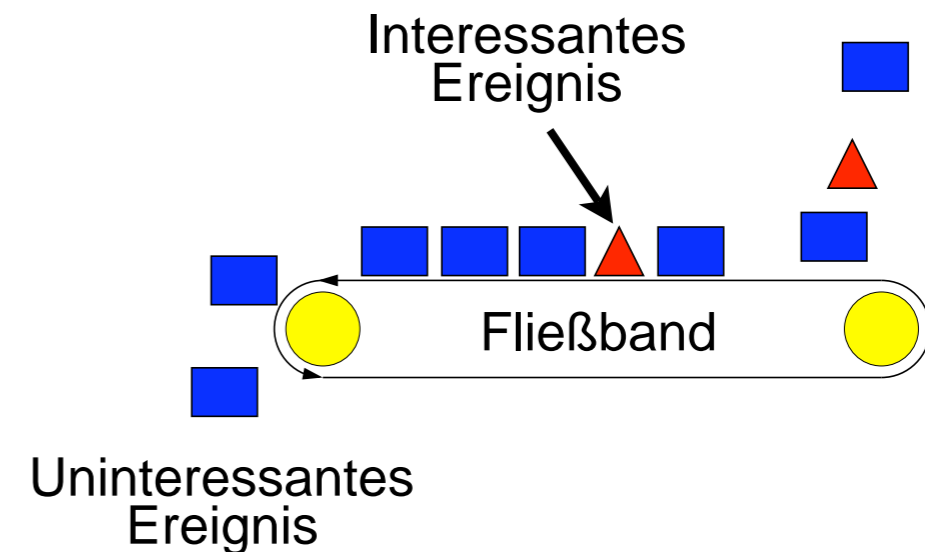


- Datenübertragung häufig mit optischen Fasern
 - Kleine Dämpfung über typische Abstände (50–100 m)
 - Keine Beeinflussung durch elektromagnetische Störungen

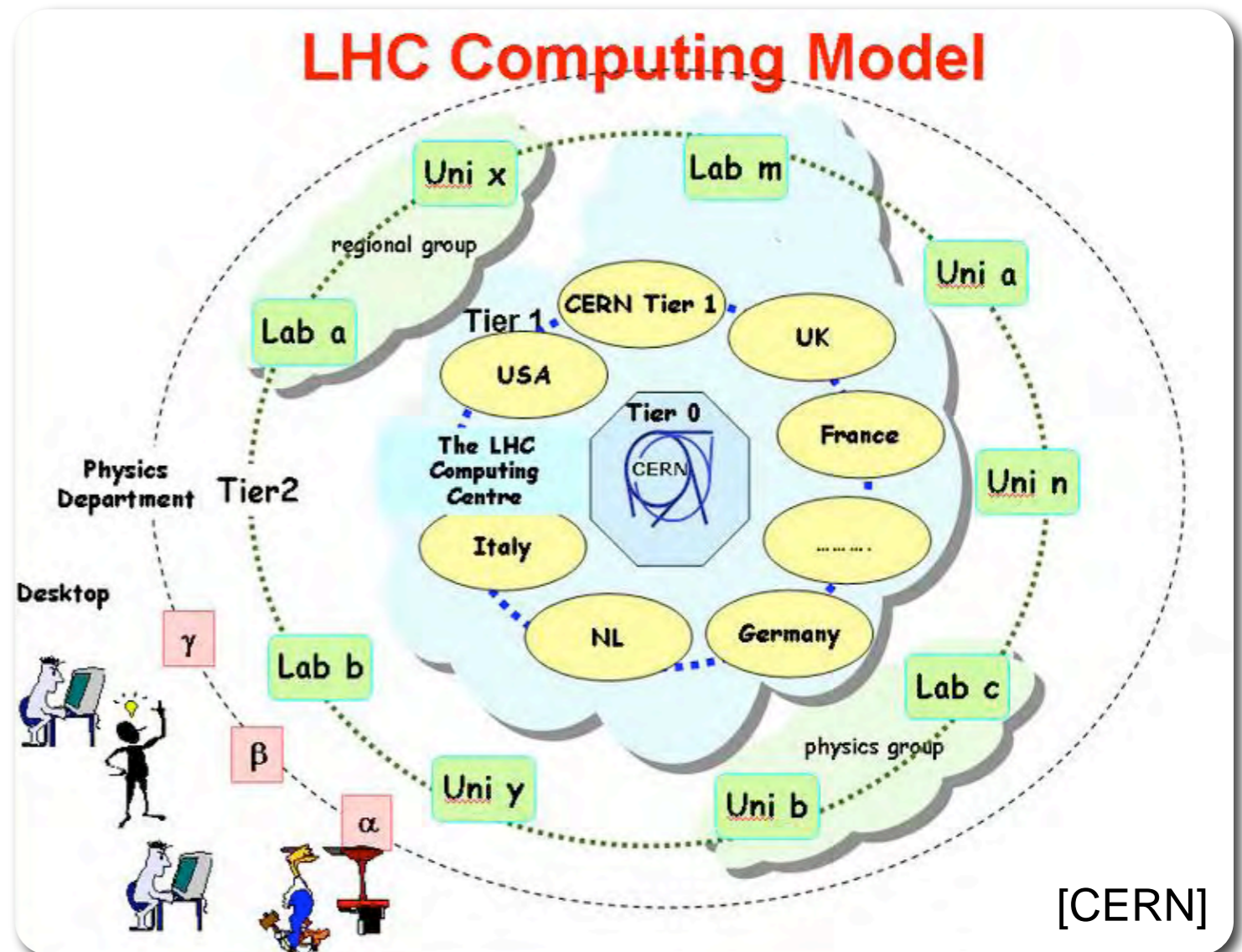
- Herausforderung Datenrate:
1 Milliarde Kollisionen pro Sekunde
- Datenrate ca. **1 TB/s** → mit heutiger Technologie nicht verarbeitbar
- Zum Glück: >99.999999% aller Kollisionen „uninteressant“ → **schnelle Selektion** „interessanter“ Kollisionen



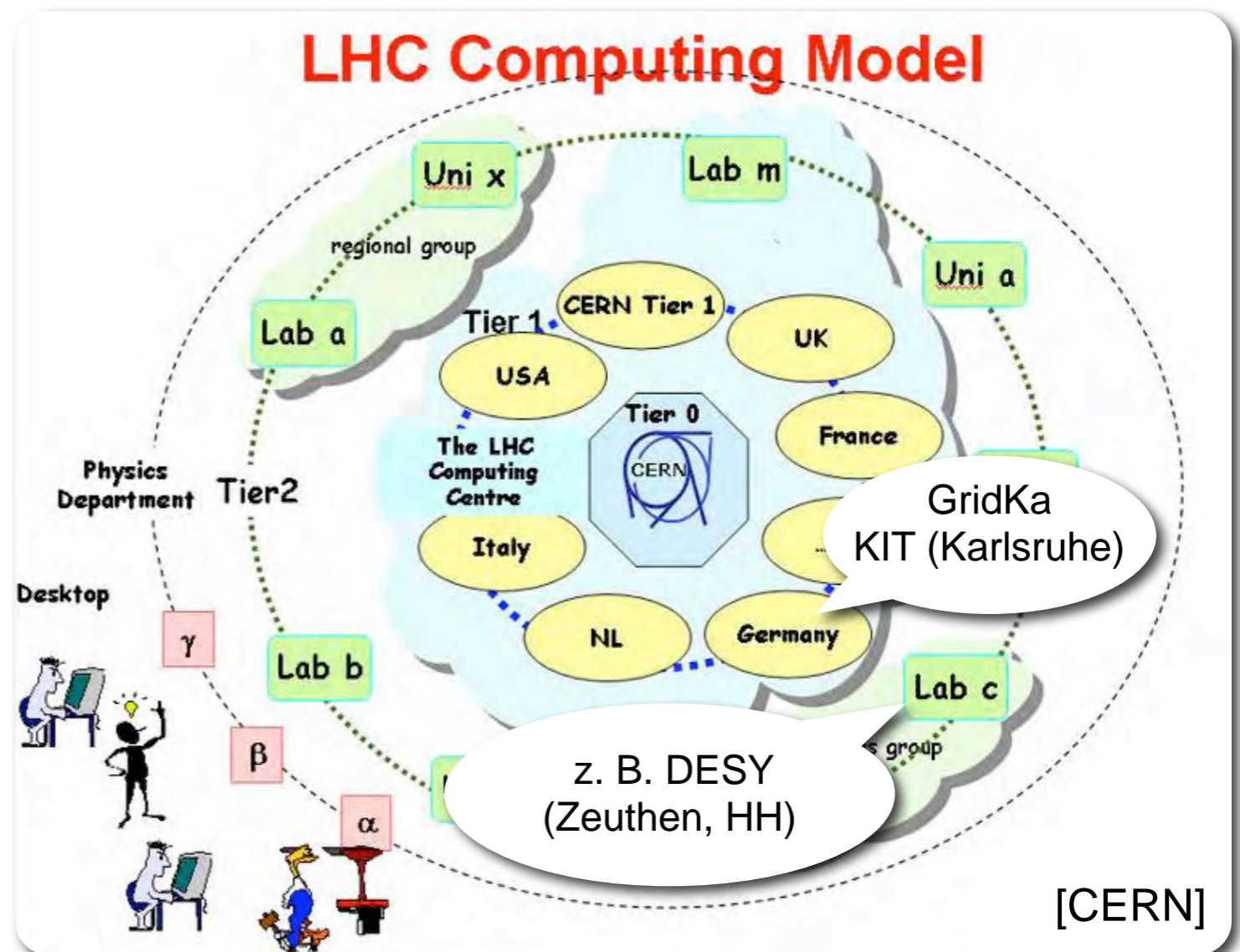
- Herausforderung Datenrate:
1 Milliarde Kollisionen pro Sekunde
- Datenrate ca. **1 TB/s** → mit heutiger Technologie nicht verarbeitbar
- Zum Glück: >99.999999% aller Kollisionen „uninteressant“ → **schnelle Selektion** „interessanter“ Kollisionen
- Lösung: mehrstufige Online-**Datenfilterung** („Trigger“):
 1. **Einfache** Signale, geringer Auflösung, z. B. ein hochenergetisches Myon → spezielle Trigger-**Hardware**
 2. Größere Auflösung in **Teilen** des Detektors, z. B. Kegel um Myon → Software auf **Computerfarm**
 3. Information von **Gesamtdetektor** → Software auf Computerfarm



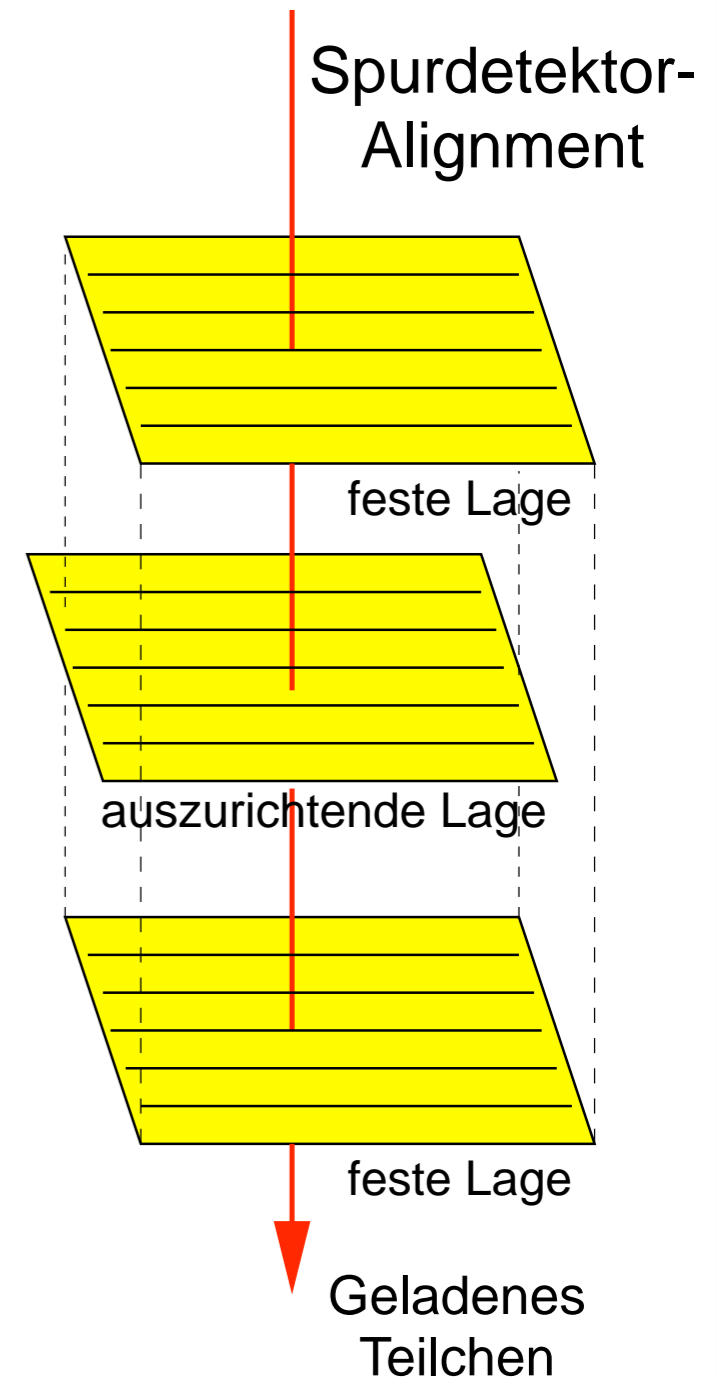
- Herausforderungen:
 - **Datenrate**: ca. 15 PByte/Jahr von allen LHC-Experimenten (CD-Stapel von 20 km Höhe)
 - **Prozessierung** (Rekonstruktion, Simulation etc.): Rechenleistung von 100.000 Computern
- Lösung: **Grid-Computing**
 - Rechenleistung und Speicherplatz **weltweit verteilt**
 - Geschickte Aufteilung der Ressourcen: Bringe die **Anwendung zu den Daten**
 - Name „Grid“: Analogie zu Stromnetz („power grid“)
 - LHC: Mehrstufiger („Multi-Tier“) Zugang



- Herausforderungen:
 - **Datenrate**: ca. 15 PByte/Jahr von allen LHC-Experimenten (CD-Stapel von 20 km Höhe)
 - **Prozessierung** (Rekonstruktion, Simulation etc.): Rechenleistung von 100.000 Computern
- Lösung: **Grid-Computing**
 - Rechenleistung und Speicherplatz **weltweit verteilt**
 - Geschickte Aufteilung der Ressourcen: Bringe die **Anwendung zu den Daten**
 - Name „Grid“: Analogie zu Stromnetz („power grid“)
 - LHC: Mehrstufiger („Multi-Tier“) Zugang

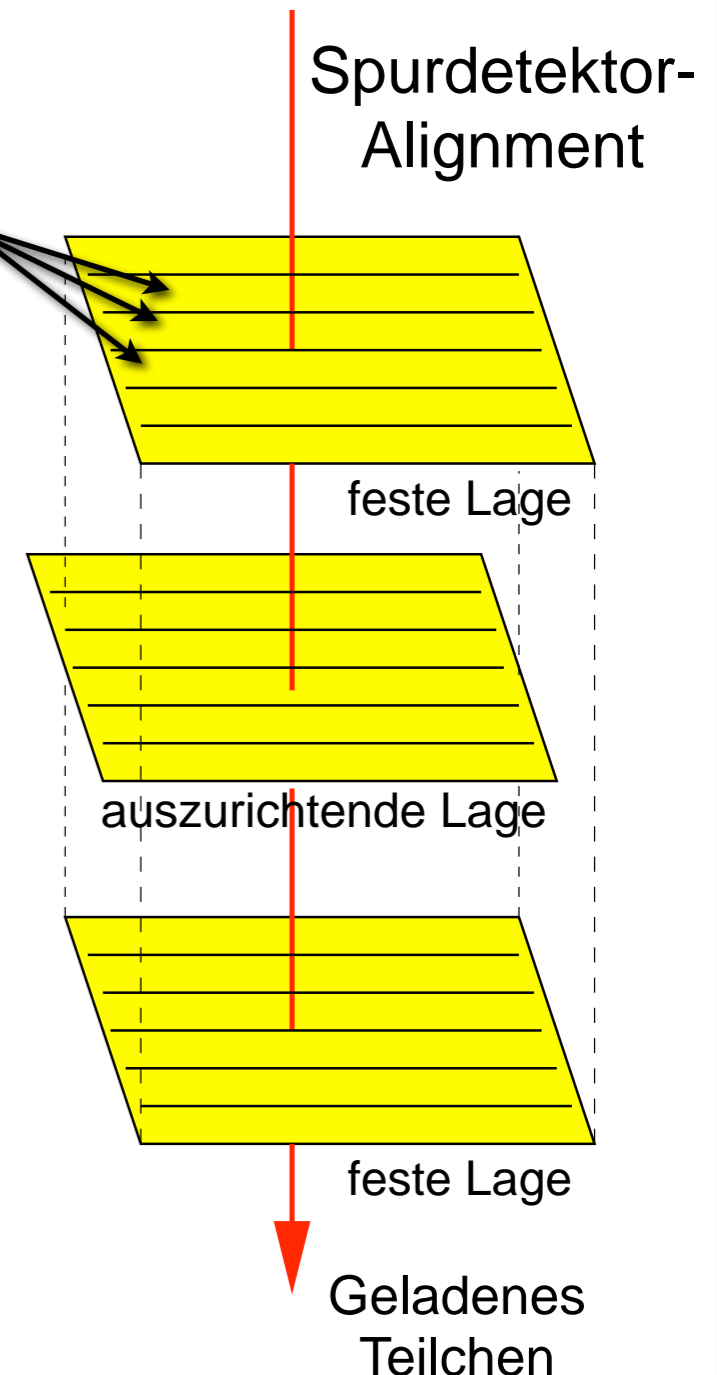


- **Kalibration:** Sicherstellung gleichmäßiger Detektorantwort
 - Herausforderung 1: Nicht jeder Auslesekanal eines Subdetektors zeigt die **gleiche Antwort** bei Teilchendurchgang
 - Herausforderung 2: Antwort kann **zeitlich variabel** sein
- **Alignment:** genaue Ausrichtung der Detektoren
 - Herausforderung: **riesige Detektoren** (z.B. ATLAS: $25 \times 25 \times 45 \text{ m}^3$), aber Spurauflösung von **einigen $10 \mu\text{m}$**
 - Grobe Ausrichtung: Präzisionsmechanik bei Konstruktion, Vermessungstechnik
 - Feinausrichtung mit **Daten** von Teilchenspuren

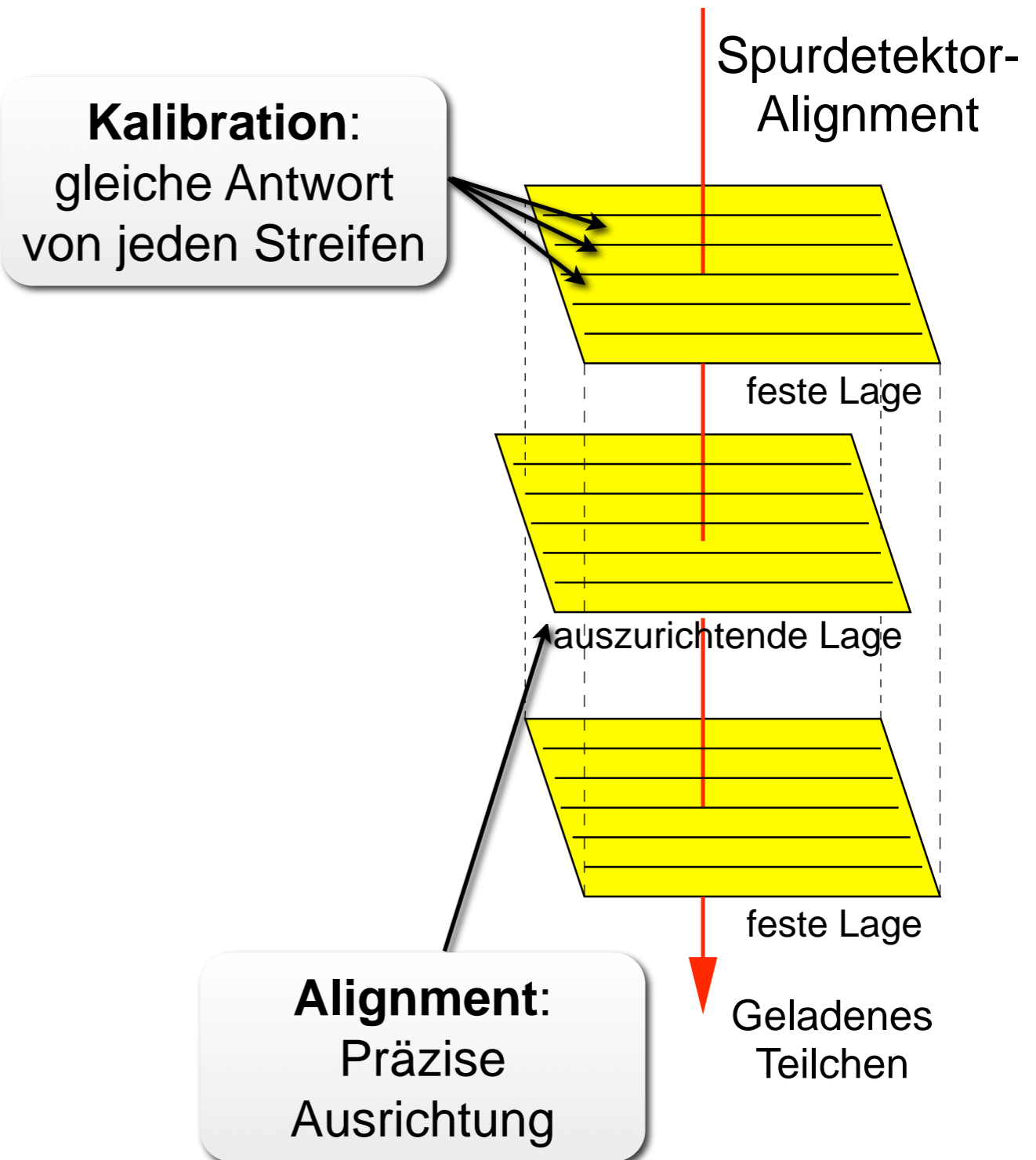


- **Kalibration:** Sicherstellung gleichmäßiger Detektorantwort
 - Herausforderung 1: Nicht jeder Auslesekanal eines Subdetektors zeigt die **gleiche Antwort** bei Teilchendurchgang
 - Herausforderung 2: Antwort kann **zeitlich variabel** sein
- **Alignment:** genaue Ausrichtung der Detektoren
 - Herausforderung: **riesige Detektoren** (z.B. ATLAS: $25 \times 25 \times 45 \text{ m}^3$), aber Spurauflösung von **einigen $10 \mu\text{m}$**
 - Grobe Ausrichtung: Präzisionsmechanik bei Konstruktion, Vermessungstechnik
 - Feinausrichtung mit **Daten** von Teilchenspuren

Kalibration:
gleiche Antwort
von jeden Streifen



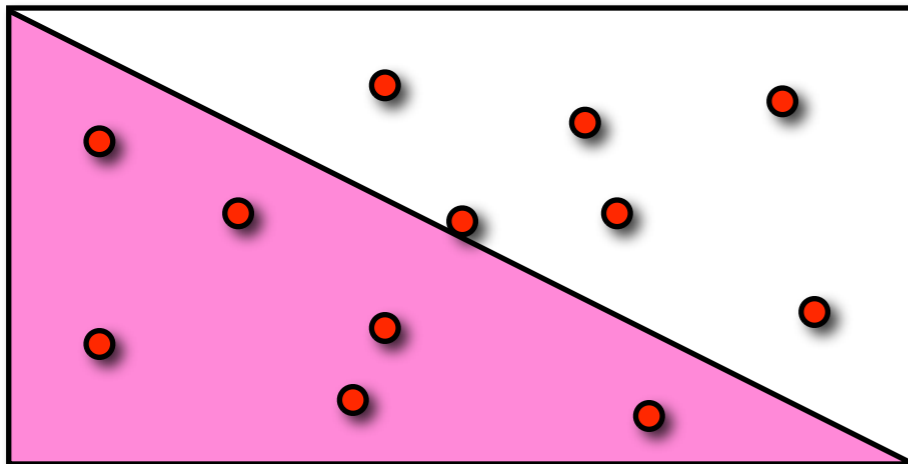
- **Kalibration:** Sicherstellung gleichmäßiger Detektorantwort
 - Herausforderung 1: Nicht jeder Auslesekanal eines Subdetektors zeigt die **gleiche Antwort** bei Teilchendurchgang
 - Herausforderung 2: Antwort kann **zeitlich variabel** sein
- **Alignment:** genaue Ausrichtung der Detektoren
 - Herausforderung: **riesige Detektoren** (z.B. ATLAS: $25 \times 25 \times 45 \text{ m}^3$), aber Spurauflösung von **einigen $10 \mu\text{m}$**
 - Grobe Ausrichtung: Präzisionsmechanik bei Konstruktion, Vermessungstechnik
 - Feinausrichtung mit **Daten** von Teilchenspuren



- **Monte-Carlo** (MC-) Simulationen: numerische Methoden, die auf **Zufallszahlen** basieren

„It's called 'Monte Carlo' because you're playing on someone else's money." [B. Jacobsen, Berkeley]

- Beispiel: MC-Integration

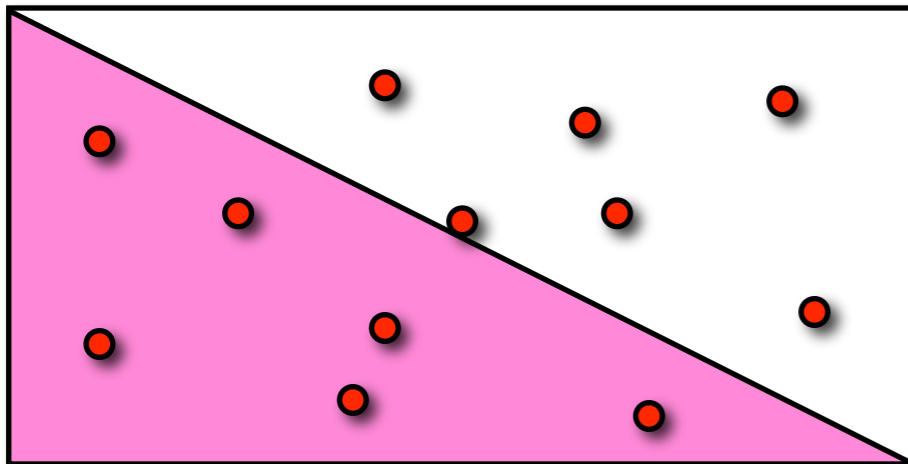


Integral proportional zur Zahl der zufälligen Punkte unter der Kurve

- **Monte-Carlo** (MC-) Simulationen: numerische Methoden, die auf **Zufallszahlen** basieren

„It's called 'Monte Carlo' because you're playing on someone else's money." [B. Jacobsen, Berkeley]

- **Beispiel: MC-Integration**



Integral proportional zur Zahl der zufälligen Punkte unter der Kurve

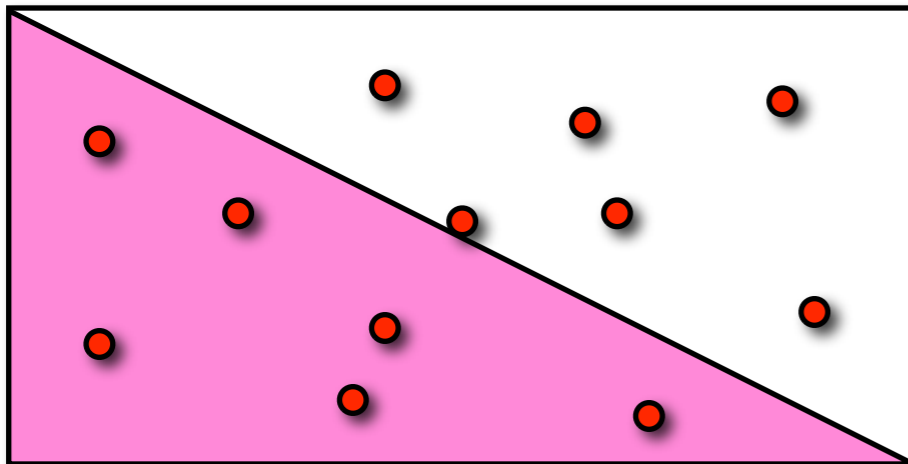
MC-Simulation in der Teilchenphysik

Ereignisgenerator
simuliere physikalischen Prozess
(Quantenmechanik: Wahrscheinlichkeiten)

- **Monte-Carlo** (MC-) Simulationen: numerische Methoden, die auf **Zufallszahlen** basieren

„It's called 'Monte Carlo' because you're playing on someone else's money." [B. Jacobsen, Berkeley]

- **Beispiel: MC-Integration**



Integral proportional zur Zahl der zufälligen Punkte unter der Kurve

MC-Simulation in der Teilchenphysik

Ereignisgenerator

simuliere physikalischen Prozess
(Quantenmechanik: Wahrscheinlichkeiten)



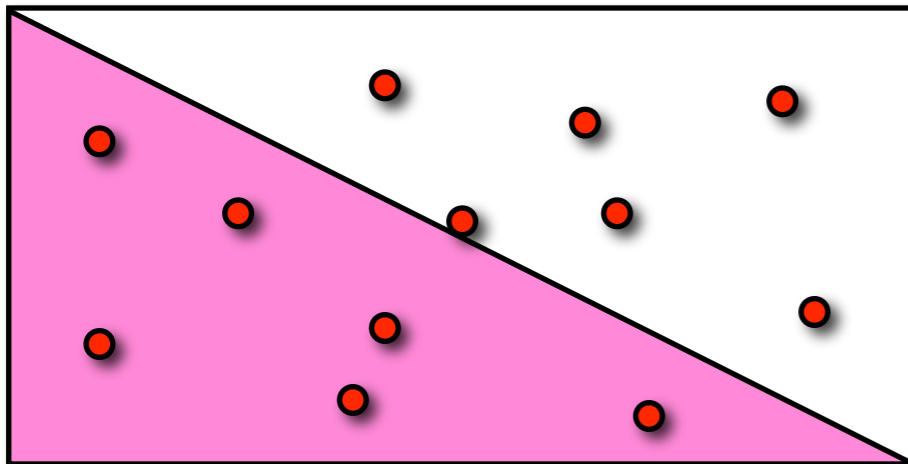
Detektorsimulation:

simuliere Wechselwirkung mit
Detektormaterial

- **Monte-Carlo** (MC-) Simulationen: numerische Methoden, die auf **Zufallszahlen** basieren

„It's called 'Monte Carlo' because you're playing on someone else's money." [B. Jacobsen, Berkeley]

- Beispiel: MC-Integration



Integral proportional zur Zahl der zufälligen Punkte unter der Kurve

MC-Simulation in der Teilchenphysik

Ereignisgenerator

simuliere physikalischen Prozess
(Quantenmechanik: Wahrscheinlichkeiten)

Detektorsimulation:

simuliere Wechselwirkung mit
Detektormaterial

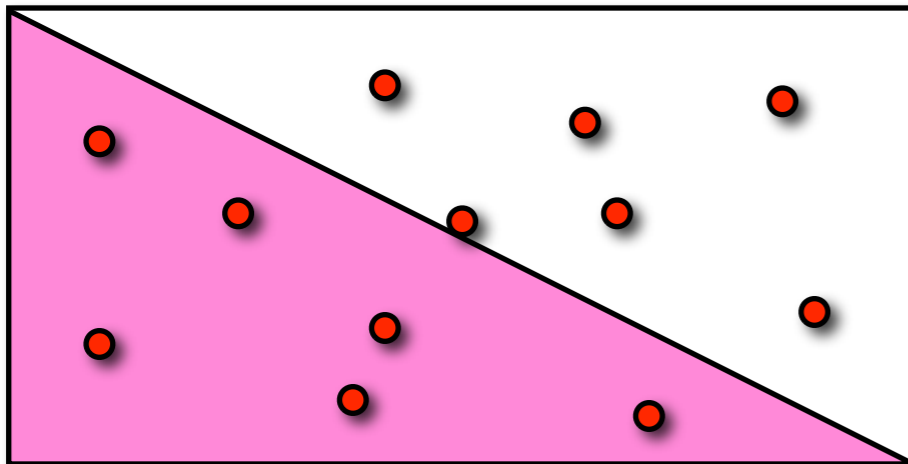
Digitalisierung:

übersetze Wechselwirkungen im
Detektor in realistische Signale

- **Monte-Carlo** (MC-) Simulationen: numerische Methoden, die auf **Zufallszahlen** basieren

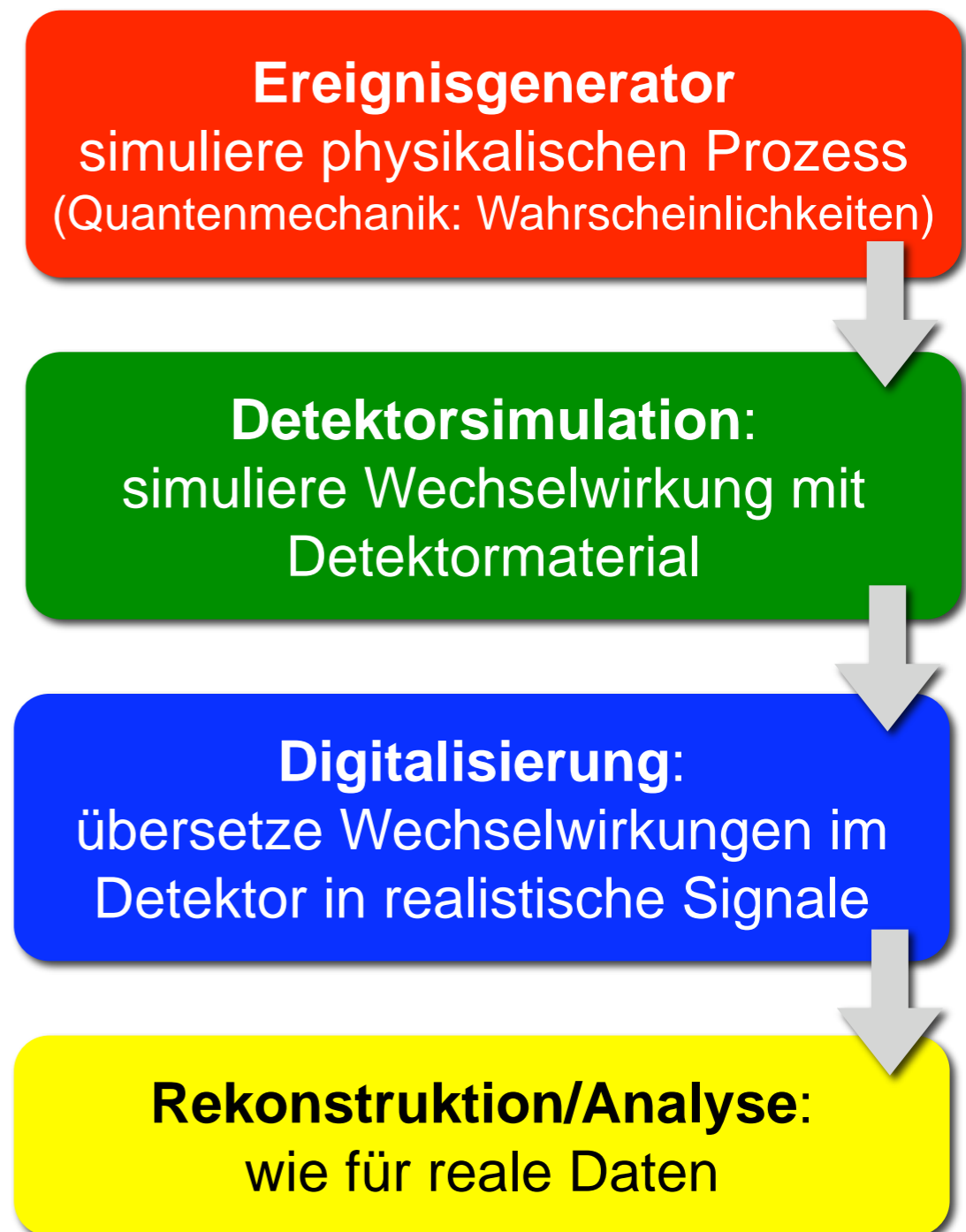
„It's called 'Monte Carlo' because you're playing on someone else's money." [B. Jacobsen, Berkeley]

- Beispiel: MC-Integration

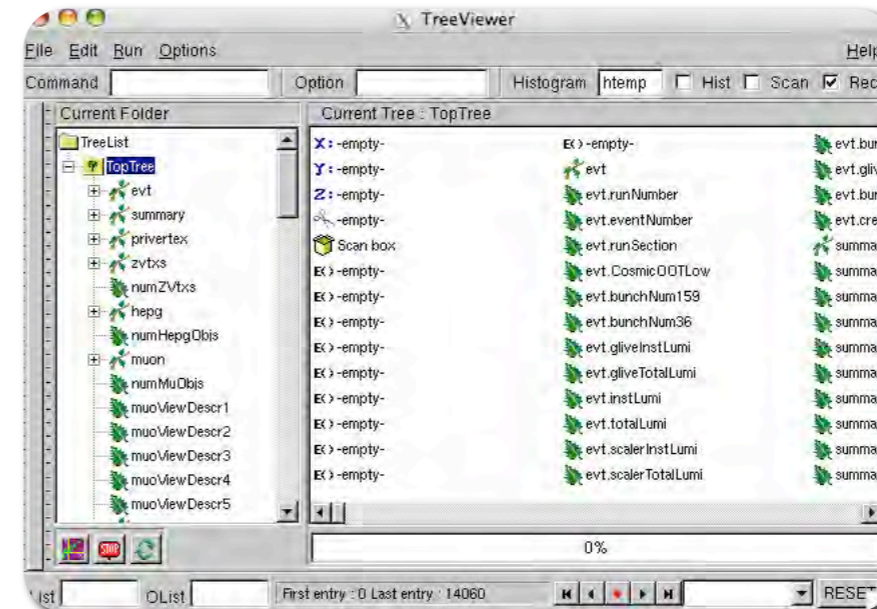


Integral proportional zur Zahl der zufälligen Punkte unter der Kurve

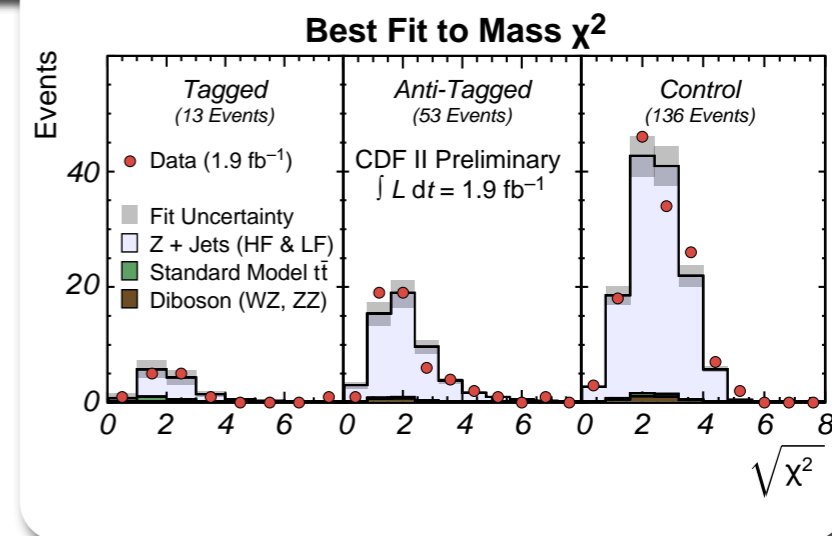
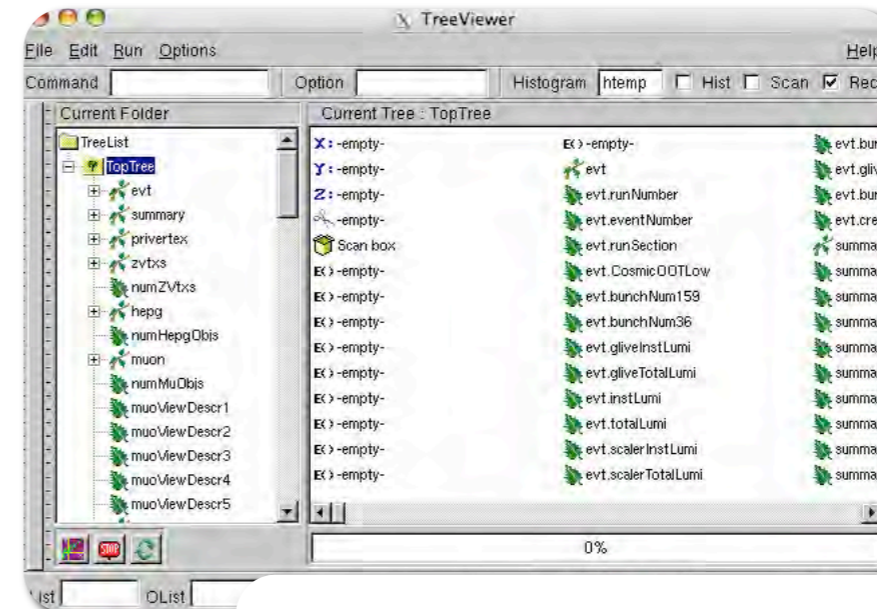
MC-Simulation in der Teilchenphysik



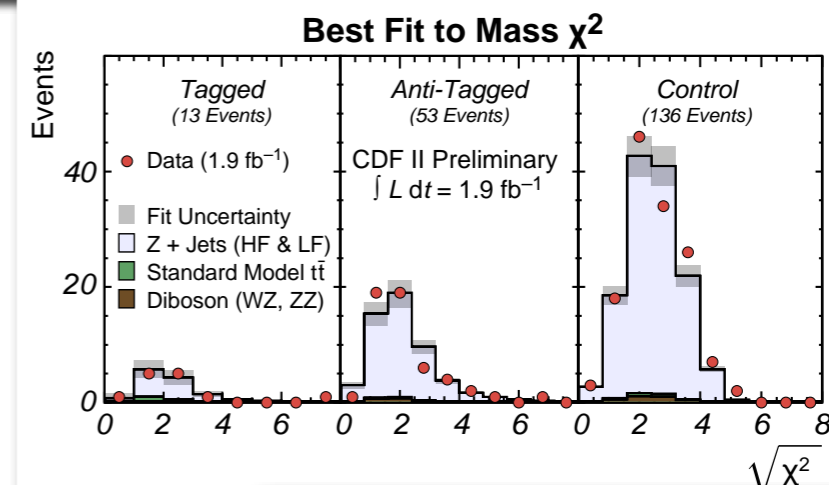
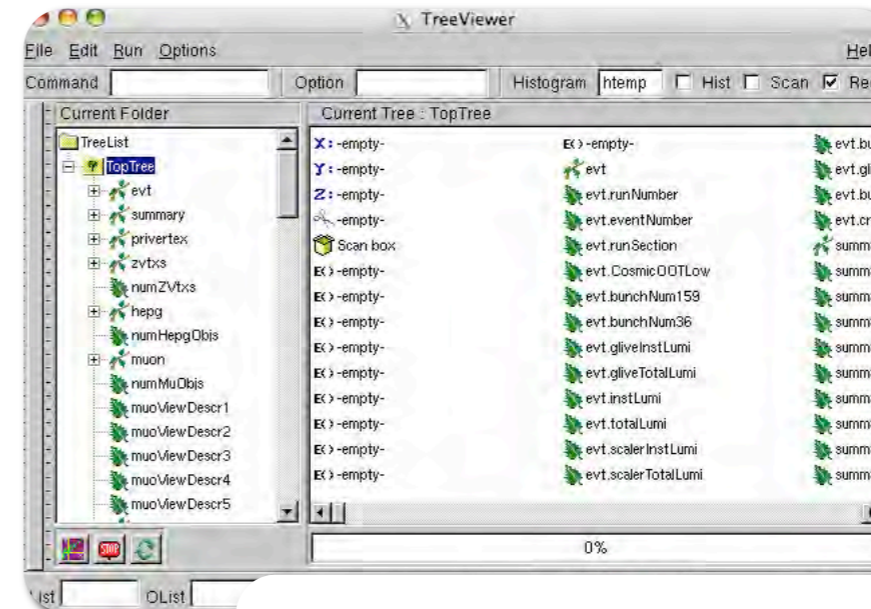
- Objektorientierte Datenanalyse mit ROOT (<http://root.cern.ch>)
- Analyseschritte (schematisch):
 - **Trennung** der „interessanten“ Kollisionen (z.B. Higgs-Kandidat) von „uninteressanten“ Kollisionen: Selektionsschnitte, Anpassungen („Fits“), neuronale Netze, ...
 - MC-Simulationen, Vergleich mit theoretischen Vorhersagen
 - **Präsentation** der Ergebnisse, eingehende **Prüfung** durch Kollaboration
 - Vorstellung auf **Konferenzen**
 - **Veröffentlichung** in internationalen Fachzeitschriften



- Objektorientierte Datenanalyse mit ROOT (<http://root.cern.ch>)
- Analyseschritte (schematisch):
 - **Trennung** der „interessanten“ Kollisionen (z.B. Higgs-Kandidat) von „uninteressanten“ Kollisionen: Selektionsschnitte, Anpassungen („Fits“), neuronale Netze, ...
 - MC-Simulationen, Vergleich mit theoretischen Vorhersagen
- **Präsentation** der Ergebnisse, eingehende **Prüfung** durch Kollaboration
- Vorstellung auf **Konferenzen**
- **Veröffentlichung** in internationalen Fachzeitschriften



- Objektorientierte Datenanalyse mit ROOT (<http://root.cern.ch>)
- Analyseschritte (schematisch):
 - Trennung** der „interessanten“ Kollisionen (z.B. Higgs-Kandidat) von „uninteressanten“ Kollisionen: Selektionsschnitte, Anpassungen („Fits“), neuronale Netze, ...
 - MC-Simulationen, Vergleich mit theoretischen Vorhersagen
- Präsentation** der Ergebnisse, eingehende **Prüfung** durch Kollaboration
- Vorstellung auf **Konferenzen**
- Veröffentlichung** in internationalen Fachzeitschriften



PRL 101, 192002 (2008) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 7 NOVEMBER 2008

Search for the Flavor-Changing Neutral-Current Decay $t \rightarrow Zq$ in $p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s} = 1.96 \text{ TeV}$

T. Aaltonen,²⁴ J. Adelman,¹⁴ T. Akimoto,⁵⁶ M. G. Albrow,¹⁸ B. Álvarez González,¹² S. Amerio,^{44a,44b} D. Amidei,³⁵ A. Anastassov,³⁹ A. Annovi,²⁰ J. Antos,¹⁵ G. Apollinari,¹⁸ A. Apresyan,⁴⁹ T. Arisawa,⁵⁸ A. Artikov,¹⁶ W. Ashmanskas,¹⁸ A. Attal,⁴ A. Aurisano,⁵⁴ F. Azfar,⁴³ P. Azzurri,^{47a,47b} W. Badgett,¹⁸ A. Barbaro-Galtieri,²⁹ V. E. Barnes,⁴⁹ B. A. Barnett,²⁶ V. Bartsch,³¹ G. Bauer,³³ P.-H. Beauchemin,³⁴ F. Bedeschi,^{47a} P. Bednar,¹⁵ D. Beecher,³¹ S. Behari,²⁶ G. Bellettini,^{47a,47b} J. Bellinger,⁶⁰ D. Benjamin,¹⁷ A. Beretvas,¹⁸ J. Beringer,²⁹ A. Bhatti,⁵¹ M. Binkley,¹⁸ D. Bisello,^{44a,44b} I. Bizjak,³¹ R. E. Blair,² C. Blocker,⁷ B. Blumenfeld,²⁶ A. Bocci,¹⁷ A. Bodek,⁵⁰ V. Boisvert,⁵⁰ G. Bolla,⁴⁹ D. Bortoletto,⁴⁹ J. Boudreau,⁴⁸ A. Boveia,¹¹ B. Brau,¹¹ A. Bridgeman,²⁵ L. Brigliadori,^{44a} C. Bromberg,²⁶ E. Brubaker,¹⁴ J. Budagov,¹⁶ H. S. Budd,⁵⁰ S. Budd,²⁵ K. Burkett,¹⁸ G. Busetto,^{44a,44b} P. Bussey,²² A. Buzatu,³⁴ K. L. Byrum,² S. Cabrera,^{17a} C. Calancha,³² M. Campanelli,³⁶ M. Campbell,³⁵ F. Canelli,¹⁸ A. Canepa,⁴⁶ D. Carlsmith,⁶⁰ R. Carosi,^{47a} S. Carrillo,^{19,k} S. Carron,³⁴ B. Casal,¹² M. Casarsa,¹⁸ A. Castro,^{6a,6b} P. Catastini,^{47a,47c} D. Cauz,^{55a,55b} V. Cavaliere,^{47a,47c} M. Cavalli-Sforza,⁴ A. Cerri,²⁹ L. Cerrito,^{31,o} S. H. Chang,²⁸ Y. C. Chen,³¹ M. Chertok,⁸ G. Chiarelli,^{47a} G. Chlachidze,¹⁸ F. Chlebana,¹⁸ K. Cho,²⁸ D. Chokheli,¹⁹ J. P. Chou,²³ G. Choudalakis,³³ S. H. Chung,⁵³ K. Chung,¹³ W. H. Chung,⁶⁰ Y. S. Chung,⁵⁰ C. I. Ciobanu,⁴⁵ M. A. Ciocci,^{47a,47c} A. Clark,²¹ D. Clark,⁷ G. Compostella,^{44a} M. E. Convery,¹⁸ J. Conway,⁸ K. Copic,³⁵ M. Cordelli,²⁰ G. Cortiana,^{44a,44b} D. J. Cox,⁸ F. Crescioli,^{47a,47b} C. Cuenca Almenar,^{8,4} J. Cuevas,^{12,n} R. Culbertson,¹⁸ J. C. Cully,³⁵ D. Dagenhart,¹⁸ M. Datta,¹⁸ T. Davies,²² P. de Barbaro,⁵⁰ S. De Cecco,^{52a} A. Deisher,²⁹ G. De Lorenzo,⁴ M. Dell'Orso,^{47a,47b} C. Deluca,⁴ L. Demortier,⁵¹ J. Deng,¹⁷ M. Deninno,^{6a} P. F. Derwent,¹⁸ G. P. di Giovanni,⁴⁹ C. Dionisi,^{52a,52b} B. Di Ruzza,^{55a,55b} J. R. Dittmann,⁵ M. D'Onofrio,⁵ S. Donati,^{47a,47b} P. Dong,⁹ J. Donini,^{44a} T. Dorigo,^{44a} S. Dube,⁵³ J. Efron,⁴⁰ A. Elagin,⁵⁴ R. Erbacher,⁸ D. Errede,²⁵ S. Errede,²⁵ R. Eusebi,¹⁸ H. C. Fang,²⁹ S. Farrington,⁴³ W. T. Fedorko,¹⁴ R. G. Feild,⁶¹ M. Feindt,²⁷ J. P. Fernandez,³² C. Ferrazza,^{47a,47d} R. Field,¹⁹ G. Flanagan,⁴⁹ R. Forrest,⁸ M. Franklin,²³ J. C. Freeman,¹⁸ I. Furic,¹⁹ M. Gallinaro,^{52a} J. Galyardt,¹³ F. Garberson,¹¹ J. E. Garcia,^{47a} A. F. Garfinkel,⁴⁹ K. Genser,¹⁸ H. Gerberich,²⁵ D. Gerdes,³⁵ A. Gessler,²⁷ S. Giagu,^{52a,52b} ...



- Vier Experimente am LHC
 - Zwei Vielzweckdetektoren:
ATLAS, CMS
 - Zwei spezialisierte Detektoren:
LHCb, ALICE
- Nachweis aller Kollisionsprodukte:
 - Zwiebelschalenartiger Detektoraufbau
 - Spezialisierte Detektoren:
Messung von Impuls, Energie und Teilchenart
 - „Cutting-Edge“-Technologien:
Halbleiterdetektoren, schnelle Elektronik, Grid-Computing, ...