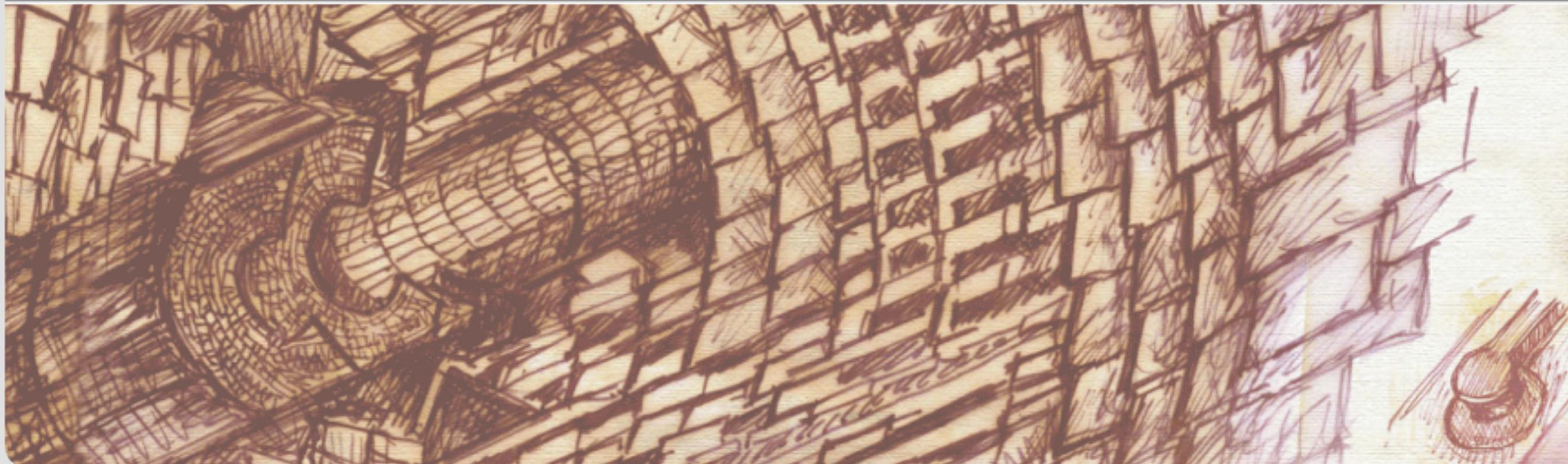


Siliziumdetektoren: Herzstück moderne Teilchenphysikexperimente

Schülervorlesung
10. April 2014

Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik



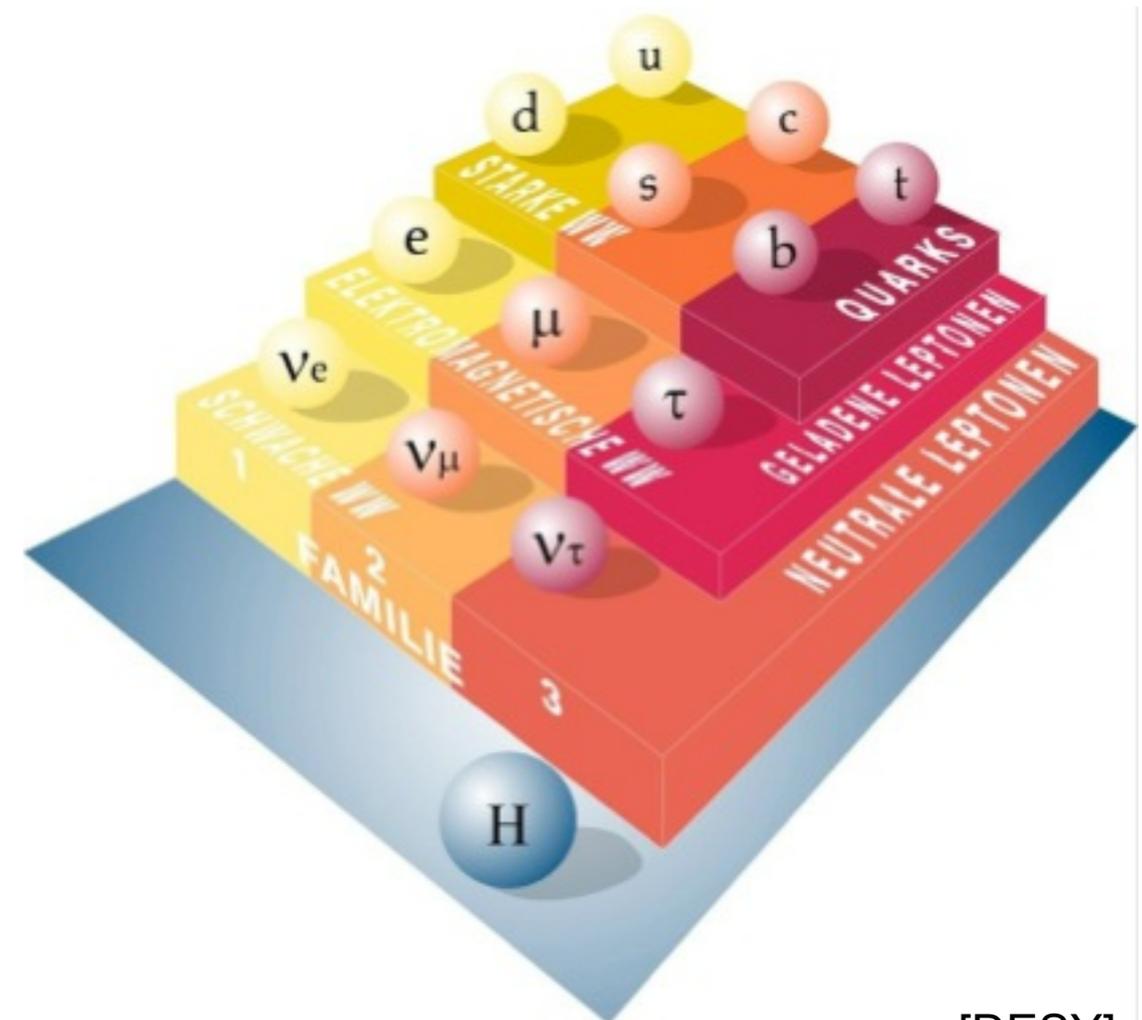
- Motivation: Teilchendetektoren am Large Hadron Collider
- Elektronen als Quantenobjekte
- Elektronen in Festkörpern
- Dotierte Halbleiter
- Spurdetektoren aus Halbleitermaterialien

Teilchendetektoren am Large Hadron Collider

Was ist Teilchenphysik?

- Wir haben physikalische Theorien vom **allerkleinsten** und vom **allergrößten**
 - Standardmodell der Teilchenphysik: 6 Quarks und 6 Leptonen
 - Standardmodell der Kosmologie
- Physik heißt **experimentieren**
 - Experimente mit und ohne Teilchenbeschleuniger
 - Höchste Energien und/oder höchste Präzision

Elementarteilchen im Standardmodell der Teilchenphysik



[DESY]



Hunts Needle in a Haystack

HOW LONG does it take to find a needle in a haystack? Jim Moran, Washington, D. C., publicity man, recently dropped a needle into a convenient pile of hay, hopped in after it, and began an intensive search for (a) some publicity and (b) the needle. Having found the former, Moran abandoned the needle hunt.

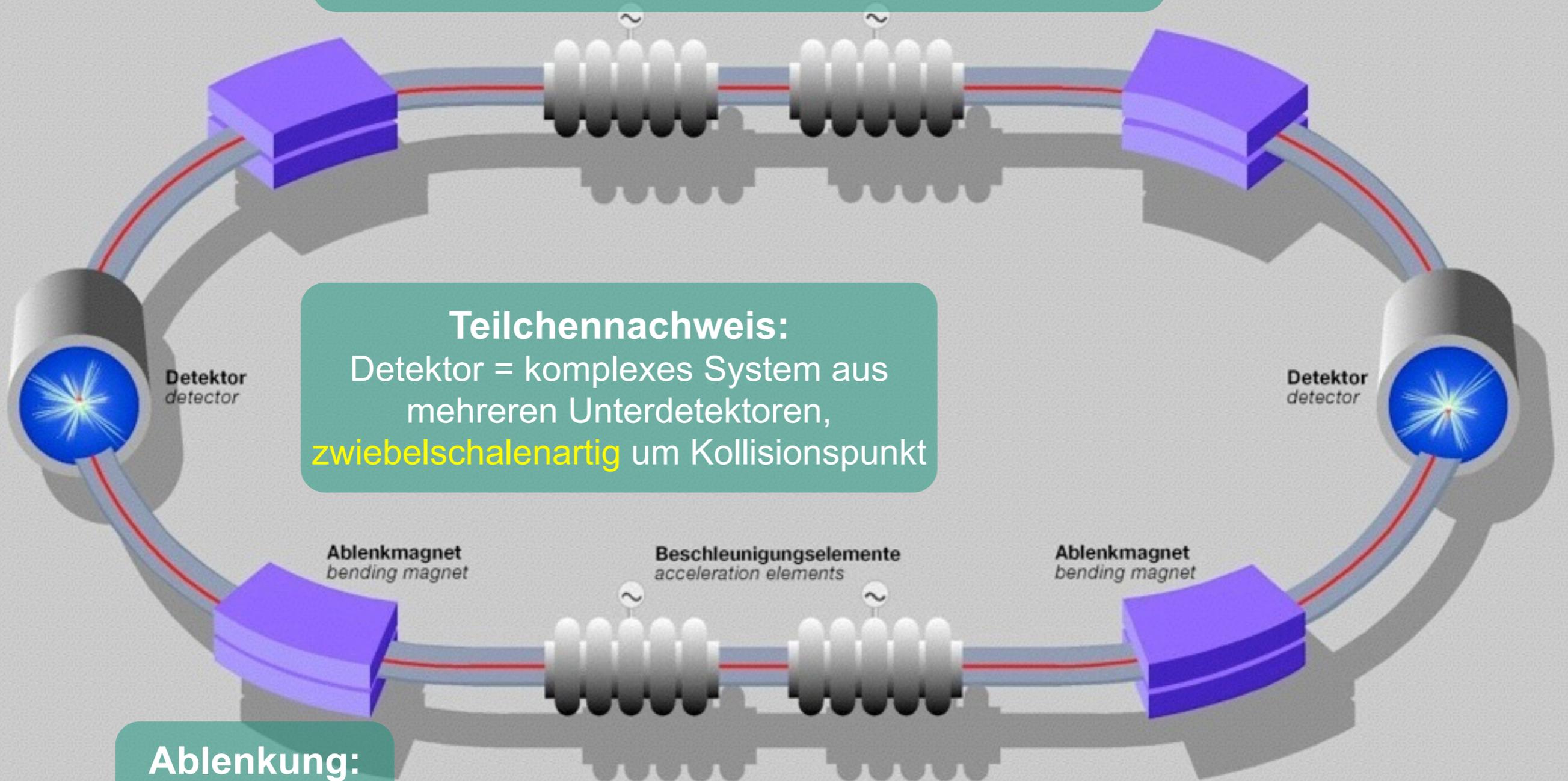
- Erzeugung und Nachweis von **Elementarteilchen** in Kollisionen bekannter Elementarteilchen „im Labor“
 - Interessante Elementarteilchen: oft **sehr schwer** und **sehr kurzlebig**
 - Prozesse mit interessanten Elementarteilchen **sehr selten**
- Lösung: Experimente an **Teilchenbeschleunigern**
 - Beschleuniger: höchste mögliche **Energie** (benutze $E = mc^2$) und **Kollisionsrate**
 - Experimente: **effizienter Filter** für Zerfallsprodukte der Teilchen

Prinzip des Teilchenbeschleunigers

Beschleunigung:
Elektrische Wechselfelder in **Hohlraumresonatoren**

Teilchennachweis:
Detektor = komplexes System aus mehreren Unterdetektoren, **zwiebelschalenartig** um Kollisionspunkt

Ablenkung:
Dipolmagnete

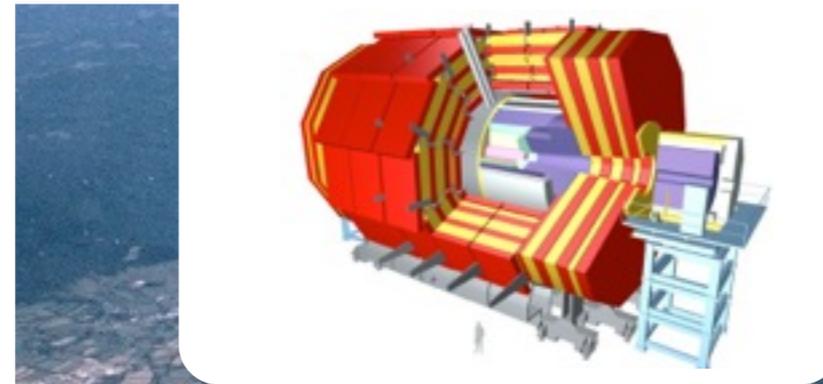


[DESY]

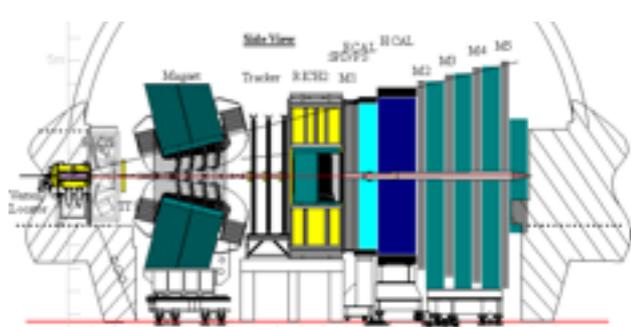
LHC-Beschleuniger:
Proton-Proton- und
Blei-Blei-Kollisionen



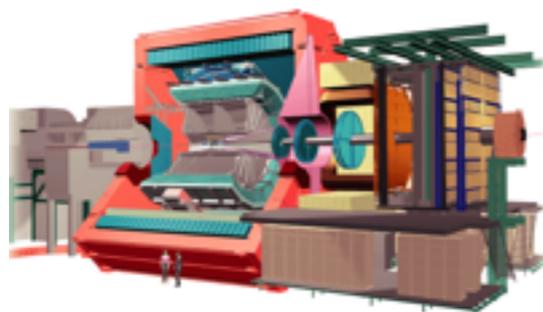
adr CMS-Experiment:
Vielzweckexperiment



LHCb-Experiment:
Symmetrie Materie/Antimaterie

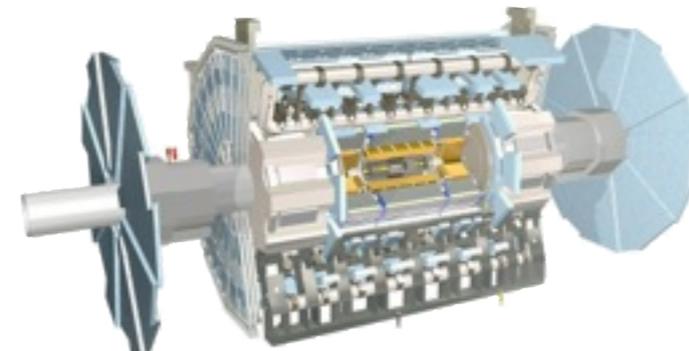



ALICE-Experiment:
Schwerionenphysik



Siliziumdetektoren

ATLAS-Experiment:
Vielzweckexperiment



Teilchennachweis

Impulsmessung

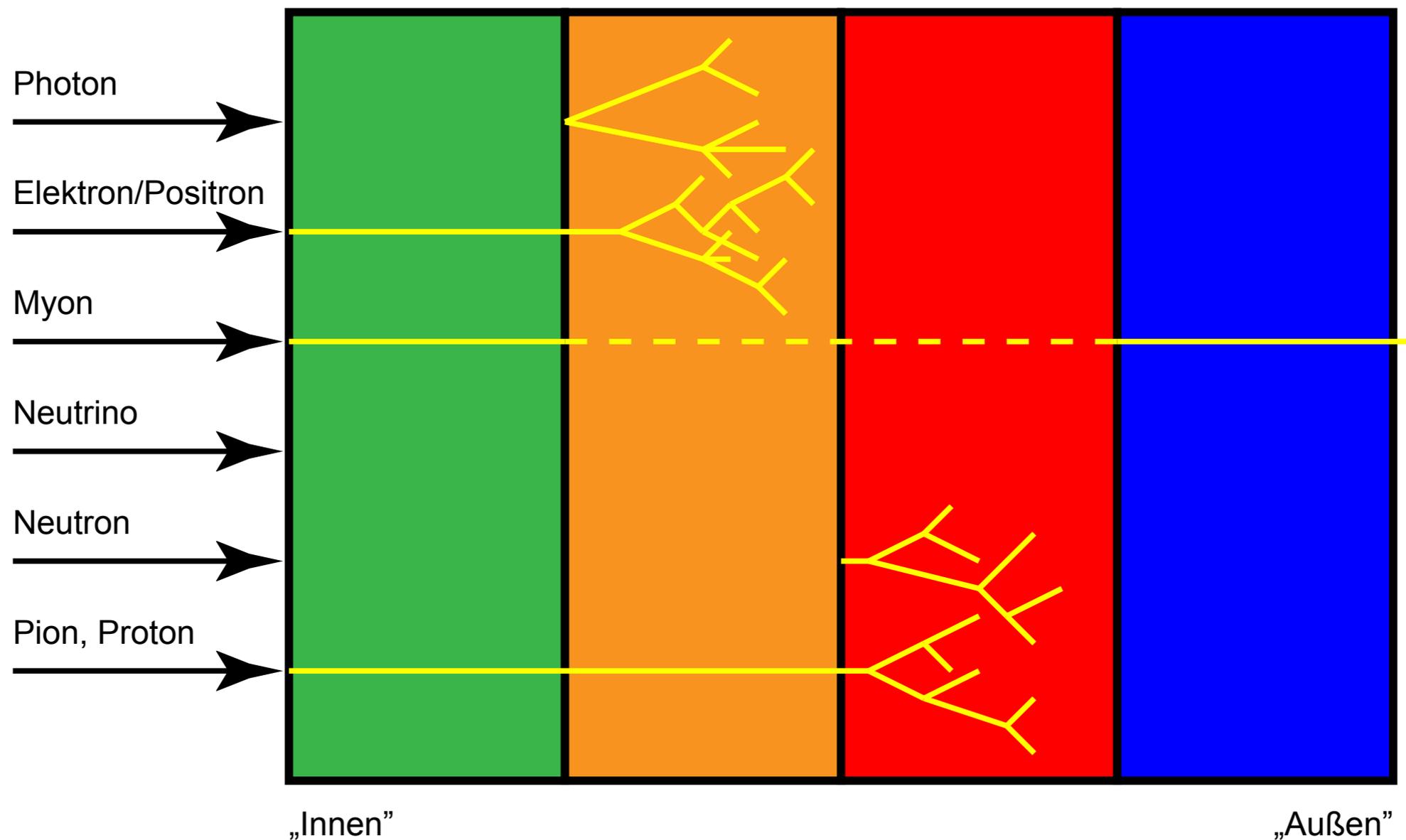
Energiemessung

Teilchenidentifikation

Spurdetektor
(„Tracking“)

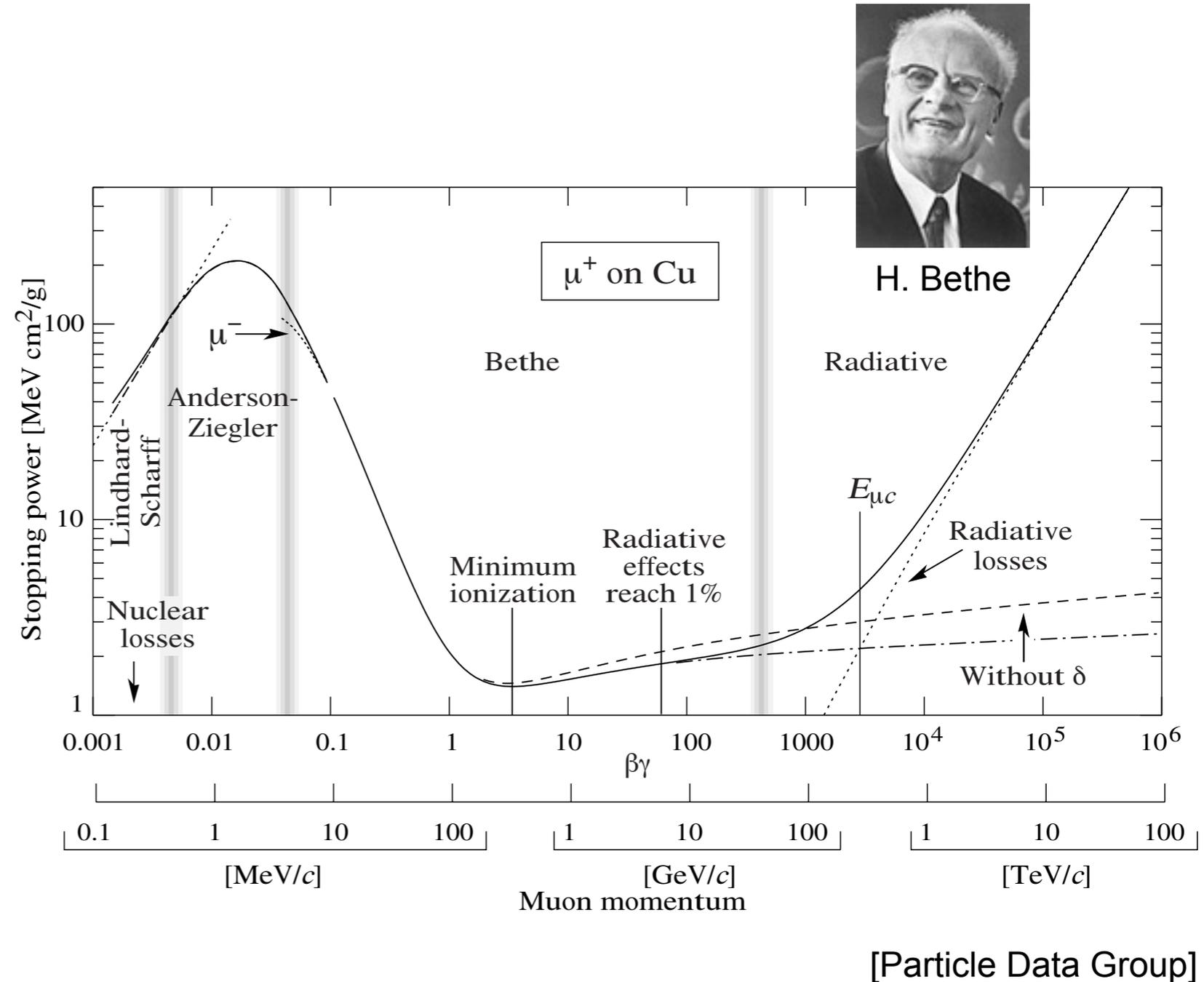
Kalorimeter
elektromagnetisch hadronisch

Myondetektor



Geladene Teilchen in Materie

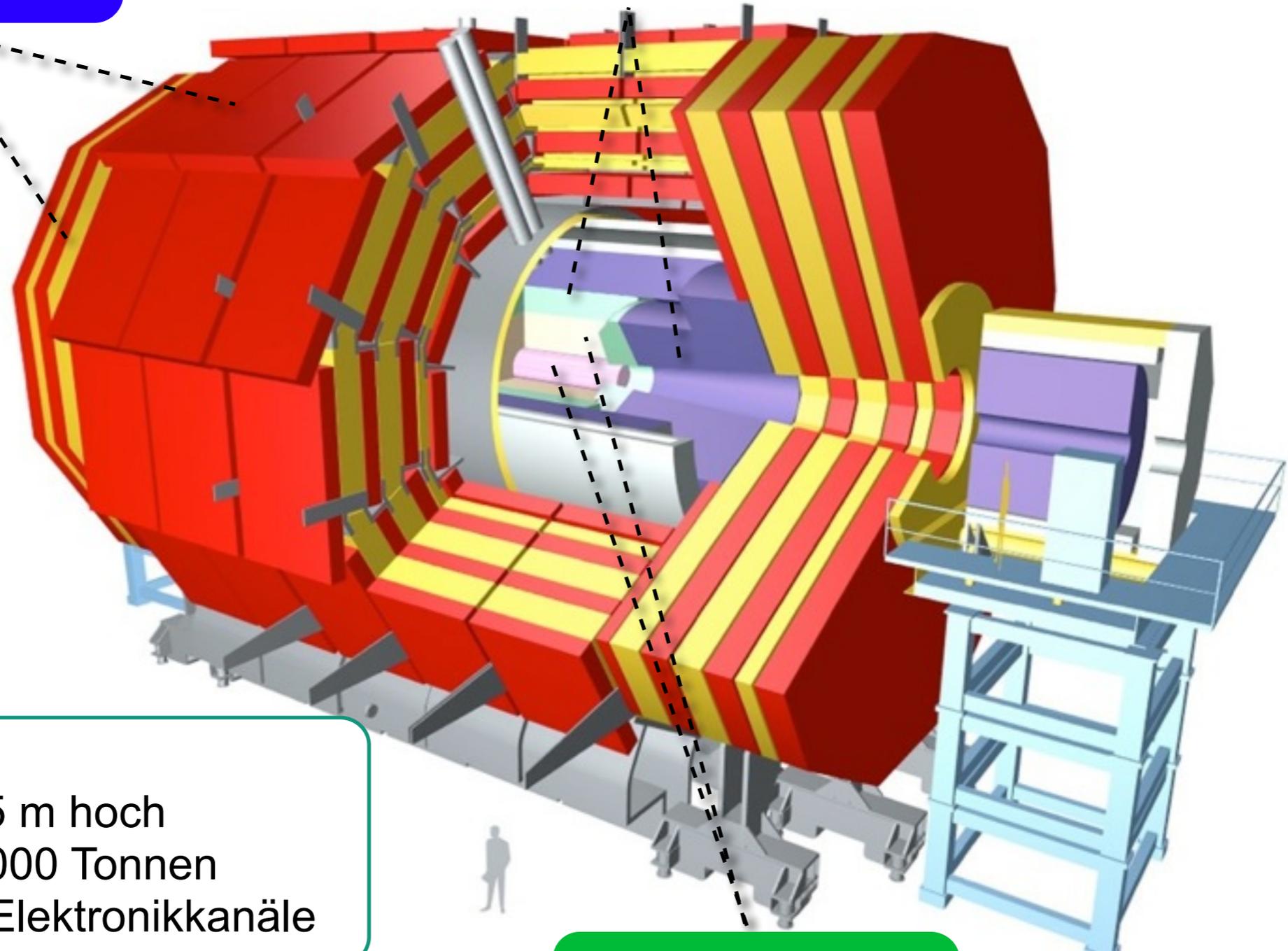
- Semiklassisches Modell („**Bethe-Formel**“): elektromagnetische Wechselwirkung der Teilchen mit Atomen
- Mittlerer **Energieverlust** pro Längeneinheit („stopping power“)
- Niedrige Energien: **Ionisation**
- Höhere Energien: **Abstrahlung** von Photonen



Der CMS-Detektor am LHC

Myon-Detektor

Kalorimeter



CMS-Fakten:

- * 21 m lang, 15 m hoch
- * Gewicht: 14.000 Tonnen
- * 80 Millionen Elektronikkanäle

Spurdetektoren

Siliziumdetektoren

Messung von Ort und Impuls

■ Geladene Teilchen im Magnetfeld:

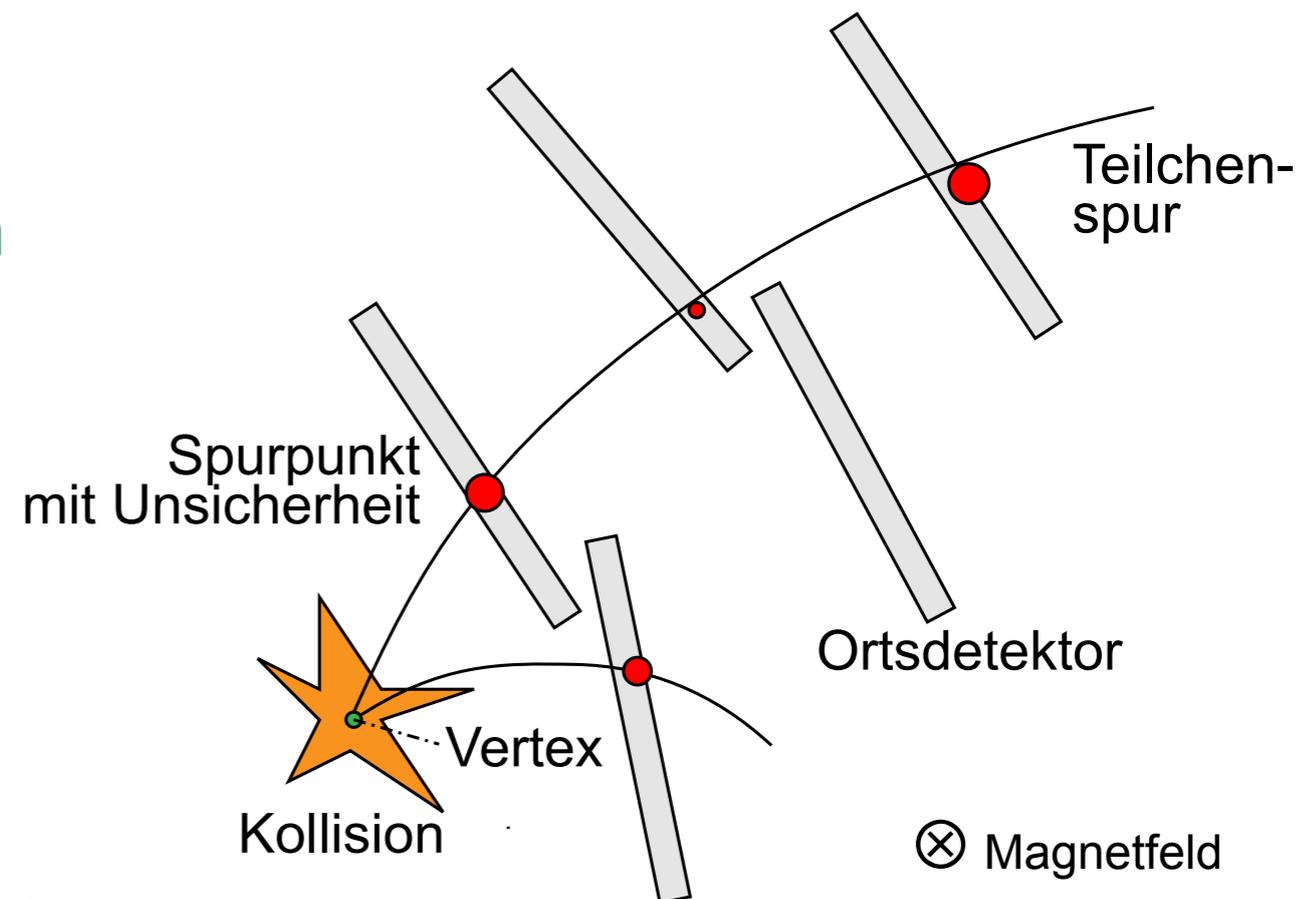
- Ablenkung durch **Lorentzkraft** (Dreifingerregel)
- CMS: homogenes Magnetfeld in Strahlrichtung
→ schraubenlinienförmige Bahn („Helix“)

■ Spurdetektoren am LHC

- Mehrere Lagen von **Ortsdetektoren**
- **Anpassung** einer Helixbahn an Spurpunkte

■ Messungen mit Spurdetektoren

- Krümmung der Teilchenbahnen („Spuren“) → **Impulsmessung**
- Zeigen ≥ 2 Spuren auf gemeinsamen **Ursprungsort** („Vertex“)?



Kurze Zusammenfassung

- Forschung mit Elementarteilchen an Beschleunigern
 - Strahlenergie umgesetzt in Produktion von Elementarteilchen ($E = mc^2$)
 - Schwere Elementarteilchen sehr kurzlebig
→ Nachweis der Zerfallsprodukte in aufwändigen Detektoren
- Detektoren:
 - Messung von Energie, Impuls und Teilchenart der Zerfallsprodukte
 - Zwiebelschalenartiger Aufbau: Spurdetektor – Kalorimeter – Myon-Detektor
- Funktionsprinzip von Spurdetektoren
 - Geladene Teilchen: Energieverlust in Materie primär durch Ionisation
 - Rekonstruktion von Spurpunkten mit Ortsdetektoren
→ Impuls durch Krümmung der Teilchenspur

Elektronen als Quantenobjekte

Aufbruch in die Quantenwelt

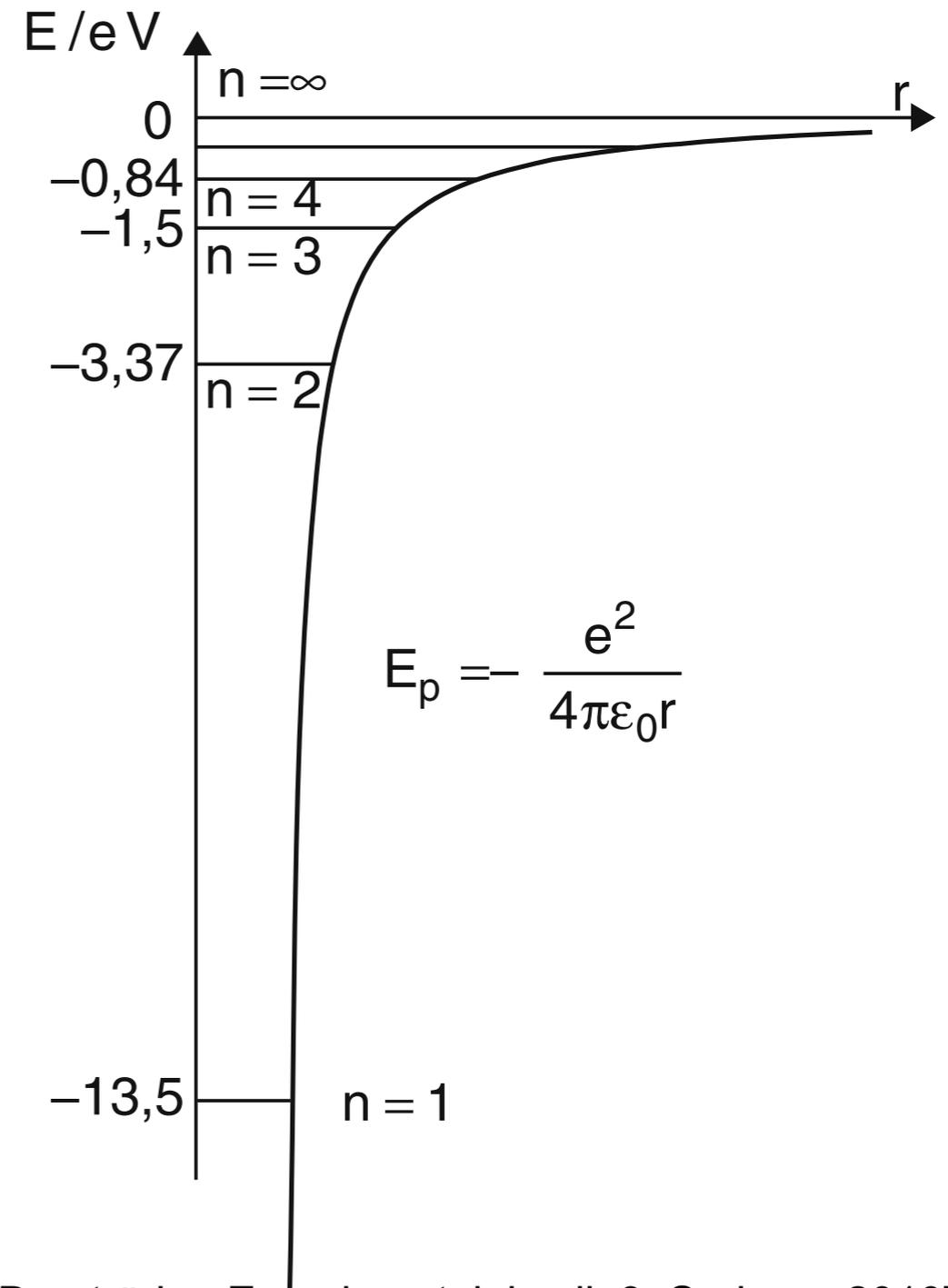
- Objekte der Quantenwelt: „seltsame“ Eigenschaften ohne klassische Entsprechung
 - Wellen- und Teilcheneigenschaften
 - Ununterscheidbarkeit von Quantenobjekten
- Grundlagen der Quantenmechanik
 - Jedem (System von) Teilchen ist eine Wellenfunktion ψ zugeordnet (komplexe Funktion von Ort und Zeit)
 - Gängigste physikalische Interpretation: Quadrat der Wellenfunktion $|\psi|^2 =$ Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Objekts
 - Schrödingergleichung = Gleichung, die Ausbreitung der Wellenfunktion beschreibt

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H}\psi$$

Gebundene Zustände

- Quantenobjekte können untereinander wechselwirken → **gebundene** Zustände
- Beispiel Wasserstoffatom:
 - Elektron (Ladung $-e$) gebunden durch **Coulombpotenzial** des Protons (Ladung $+e$)
 - Lösung der Schrödingergleichung: Energien gebundener Zustände **quantisiert** → nur bestimmte Energieniveaus erlaubt

Stark vereinfachtes H-Termschema



[Demtröder, Experimentalphysik 3, Springer 2010]

Eigenschaften von Elektronen

- Elektronen nach heutigem Verständnis **elementar**
→ **punktförmige** Elementarteilchen ohne Substruktur
- **Ladung** des Elektrons:
 - Ladungen treten in der Natur **quantisiert** auf
 - **Elementarladung** $e \approx 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$
→ kleinste Ladungseinheit freier Teilchen in der Natur
 - Ladung des Elektrons: $-e$
- Neue Quanteneigenschaft **Spin**: Elektron = **Spin-1/2-Teilchen**

- Formal wie **Drehimpuls**
- Elektronen: zwei mögliche Spinzustände relativ zu gegebener „Quantisierungsachse“

parallel („spin up“ = $+1/2 \hbar$)



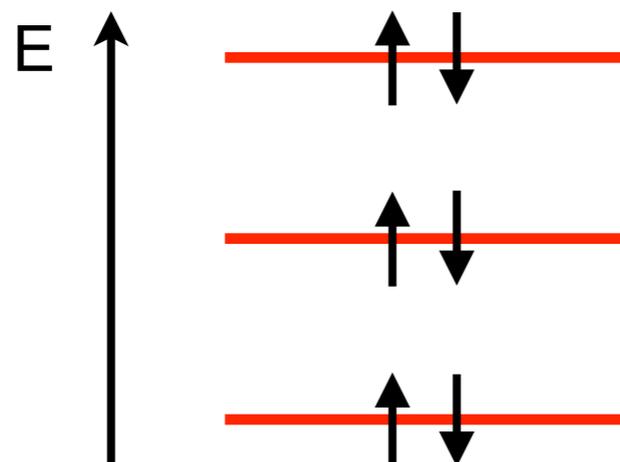
antiparallel („spin down“ = $-1/2 \hbar$)



Quantisierungsachse

Das Pauli-Prinzip

- **Fermionen** = Teilchen mit **halbzahligem Spin** ($1/2 \hbar$, $3/2 \hbar$ usw.), z. B. Elektronen
- **Pauli-Prinzip**
 - Zwei identische Fermionen können nicht gleichzeitig **denselben Quantenzustand** besetzen
 - Physikalischer Grund: **Symmetrie** der Wellenfunktion ψ für Fermionen
 - Fermionen in gebundenen Zuständen (z. B. Atome): sukzessives **Auffüllen** der erlaubten Energieniveaus



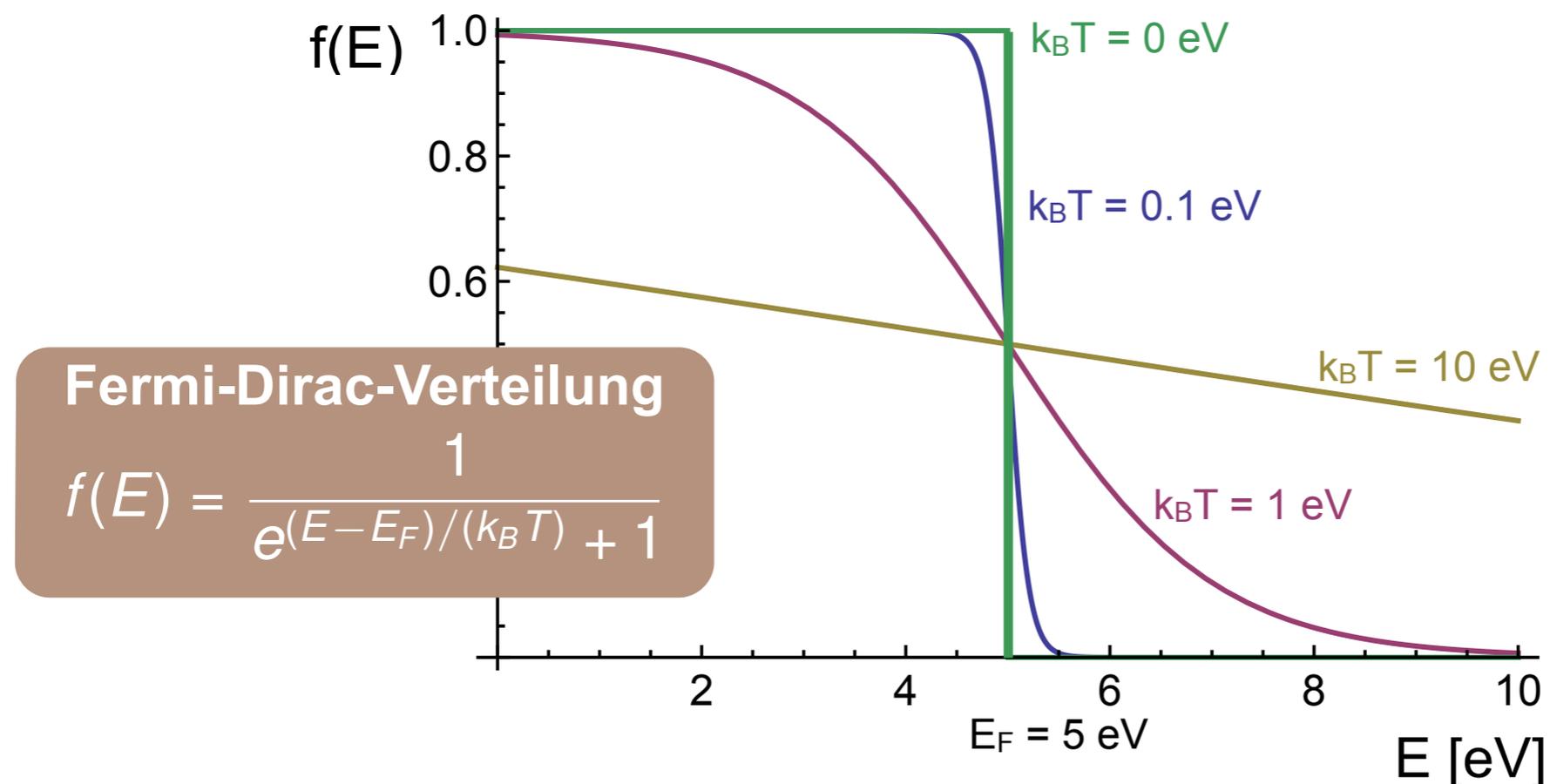
Enrico Fermi



Wolfgang Pauli

Fermi-Dirac-Verteilung

- Temperatur am absoluten Nullpunkt ($T = 0 \text{ K}$):
 - Auffüllen der Energieniveaus nach **Pauli-Prinzip**
 - Energie des höchsten belegten Niveaus bei $T = 0 \text{ K}$: **Fermienergie E_F**
- Äußere Anregungen (Licht, Wärme, ...): Elektronen können Energieniveaus **wechseln** („Quantensprung“) → Energieverteilung:



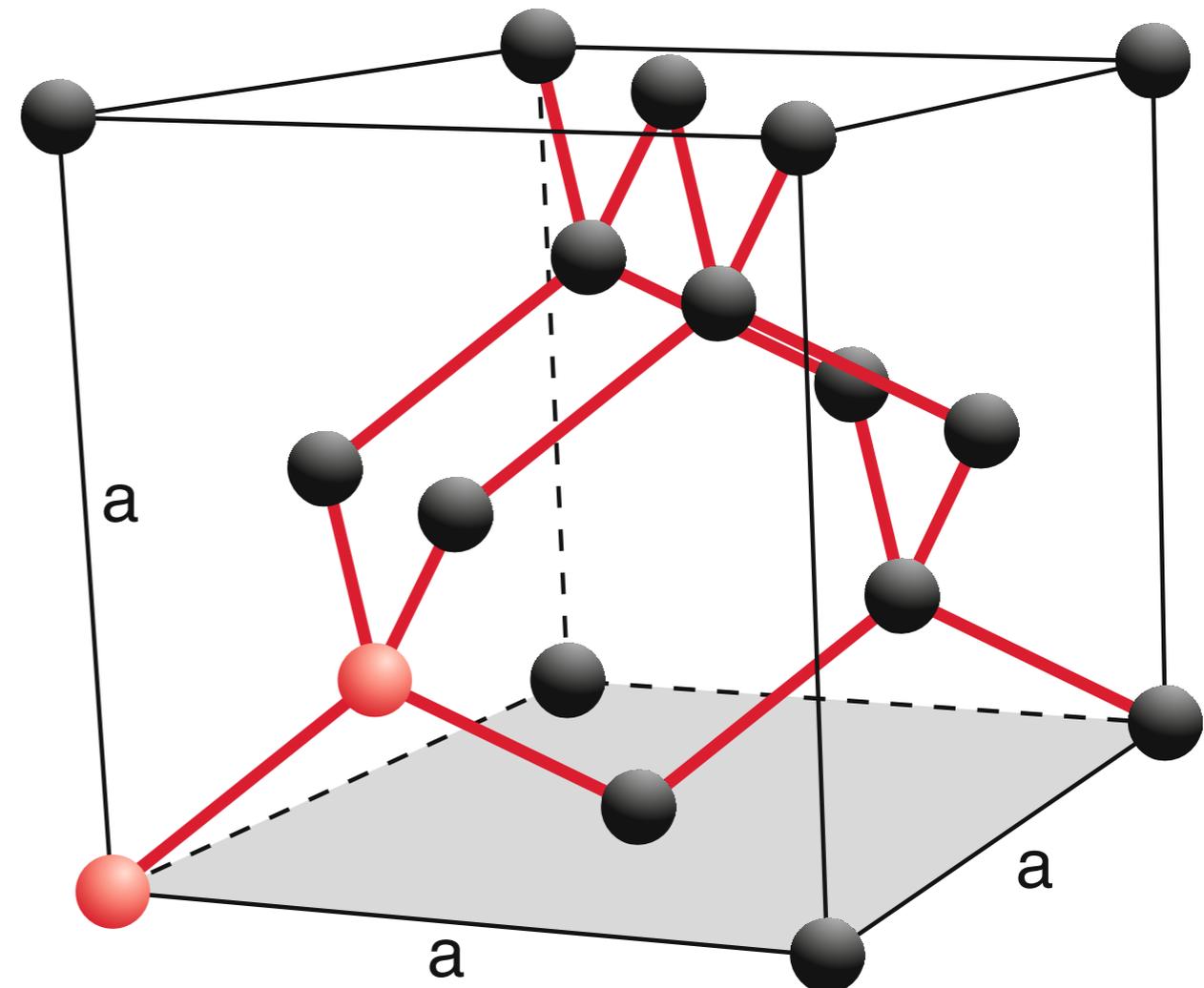
Kurze Zusammenfassung

- Quantenobjekte: Beschreibung über **Wellenfunktion**, Quadrat der Wellenfunktion = Aufenthaltswahrscheinlichkeit
- Gebundene Zustände: nur **bestimmte Energieniveaus** erlaubt
- Elektronen:
 - Elementare Fermionen (Spin $1/2 \hbar$), punktförmig
 - Pauli-Prinzip: keine zwei Elektronen im exakt gleichen Zustand
 - Gebundene Elektronen: Auffüllen der Energieniveaus bis zur Fermienergie

Elektronen in Festkörpern

Kristalline Festkörper

- Kristallgitter: **periodische** Anordnung von Atomen
- Relevantes Beispiel: Silizium
 - Jedes Si-Atom: **vier** kovalente Bindungen an Nachbaratome → Tetraeder
 - Kristall als **Würfel** mit Kantenlänge a
 - Positionen der Si-Atome: Würfelkanten, Mittelpunkte der Würfelflächen → **kubisch flächenzentriertes** Gitter
 - Zu jedem Si-Atom: weiteres Si-Atom um $1/4$ der Raumdiagonale verschoben



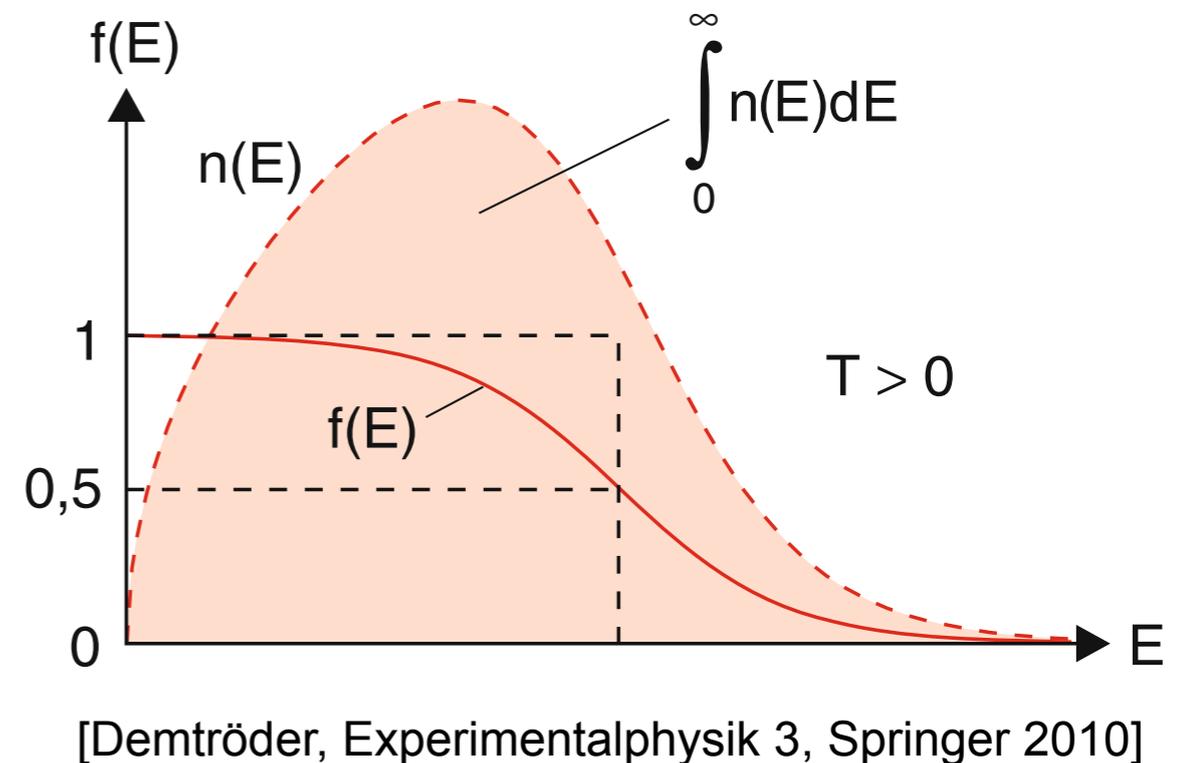
[Demtröder, Experimentalphysik 3, Springer 2010]

- Vollständige Beschreibung sehr kompliziert
 - Quantenmechanik: **gemeinsame** Wellenfunktion für **alle Elektronen** eines Quantensystems
 - Elektronen in Nähe der Atomkerne **stark gebunden** („lokalisiert“)
 - Weiter von Atomkernen entfernte Elektronen **sehr schwach gebunden** („delokalisiert“)
 - Kristalle nicht starr → **quantisierte** Schwingungen („Phononen“)
 - Endliche Ausdehnung von Kristallen → **Randeffekte**
- Typisches Vorgehen: physikalisch sinnvolle **Näherungsverfahren**

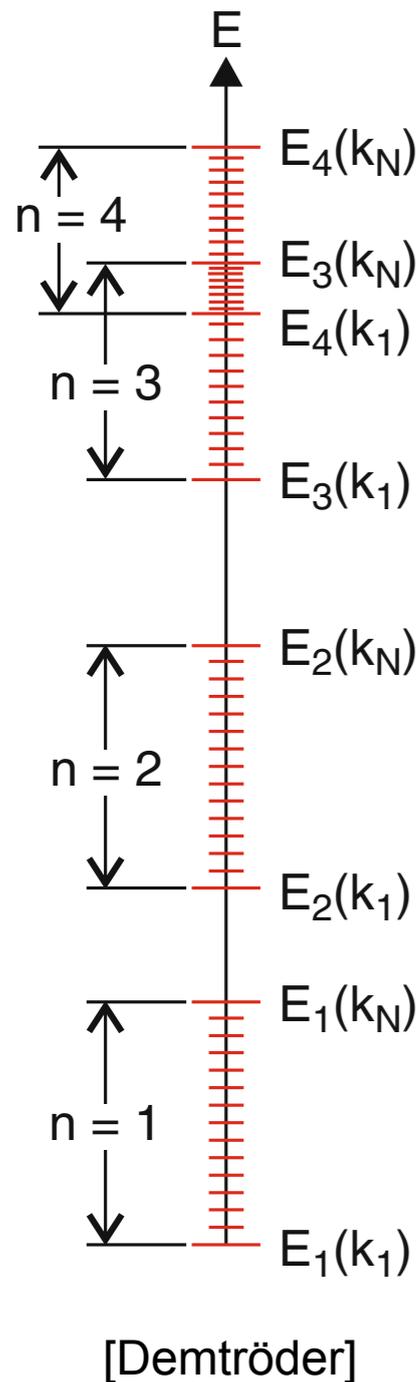
Freies Elektronengas

- Einfachster Ansatz:
freies Elektronengas
 - Jedes Elektron ist unabhängig
 - Keine Wechselwirkung mit anderen Elektronen oder Atomrümpfen (z. B. durch Coulombkraft)
 - Elektronen unterliegen Pauli-Prinzip: Energieniveaus unterhalb der Fermi-Energie gefüllt

Elektronen-Anzahldichte



- Gute Näherung zur Beschreibung einiger Festkörpereigenschaften
 - Elektrische Leitfähigkeit
 - Teil der Wärmeleitfähigkeit (zusammen mit Phononen)
 - Metallischer Glanz



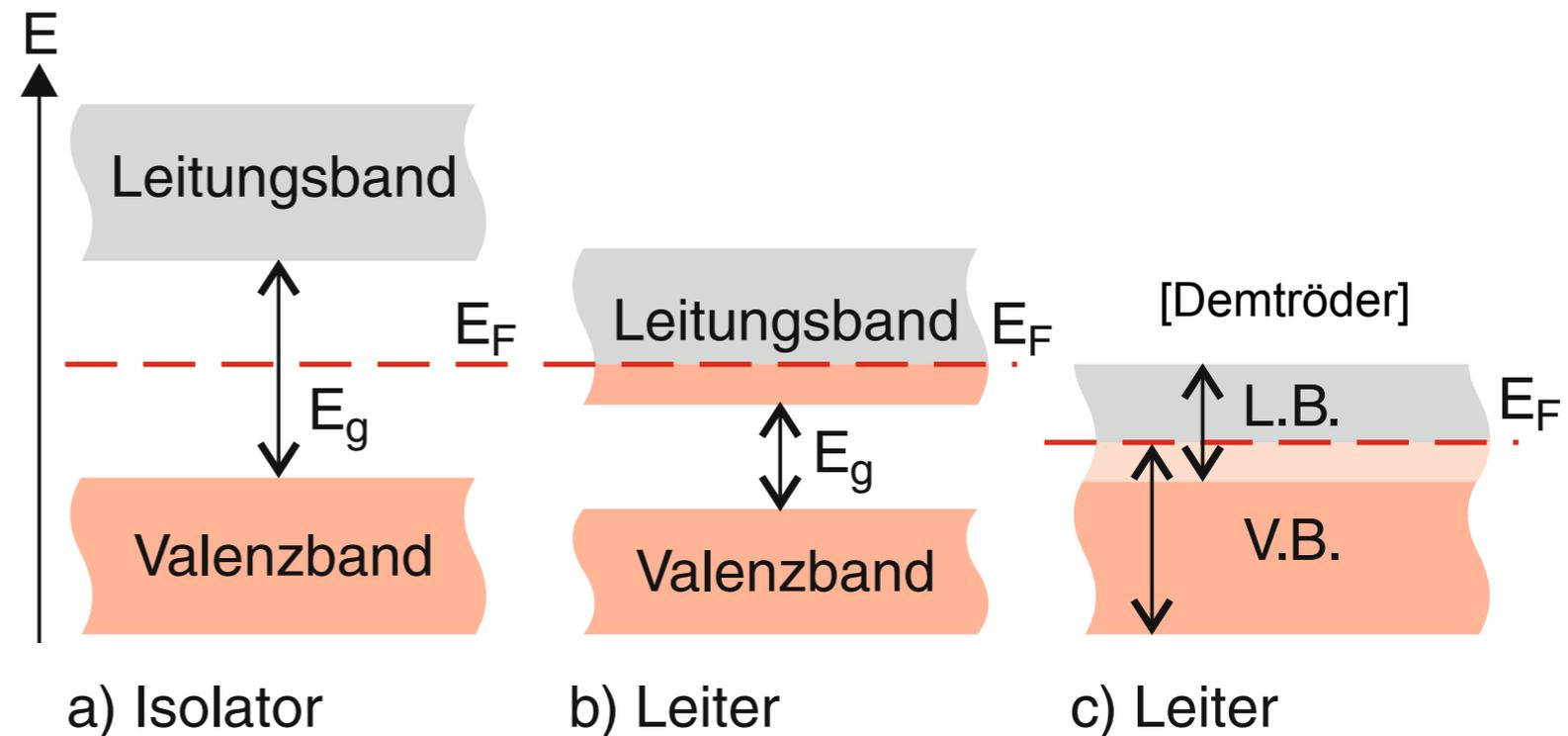
- Verbesserter Ansatz: **Bändermodell**
 - Wie bei Elektronengas: unabhängige Elektronen, keine Wechselwirkung mit anderen Elektronen
 - Atomrümpfe auf Kristallgitter: **periodisches Potenzial**
- Konsequenz für erlaubte Energieniveaus der Elektronen
 - Sehr viele Elektronen: überlappende Energieniveaus → **Energiebänder**
 - Periodisches Potenzial: Reflexionen der Elektronenwellen
 - Resultat: stehende Elektronenwellen → **Bandlücken** (= Lücken zwischen Energiebändern) möglich

Bändermodell und Leitfähigkeit

- Besetzung der Bänder nach Pauli-Prinzip

- Höchstes vollständig gefülltes Energieband: Valenzband

- Nächsthöheres Energieband: Leitungsband



- Klassifikation: Isolatoren – Leiter

- **Isolatoren:** große Bandlücke E_g zwischen Valenzband und Leitungsband
→ thermische Anregung nicht ausreichend, um Elektronen in Leitungsband zu heben

- **Leiter:** Fermienergie E_F liegt in nicht vollständig gefülltem Band oder Valenzband und Leitungsband überlappen

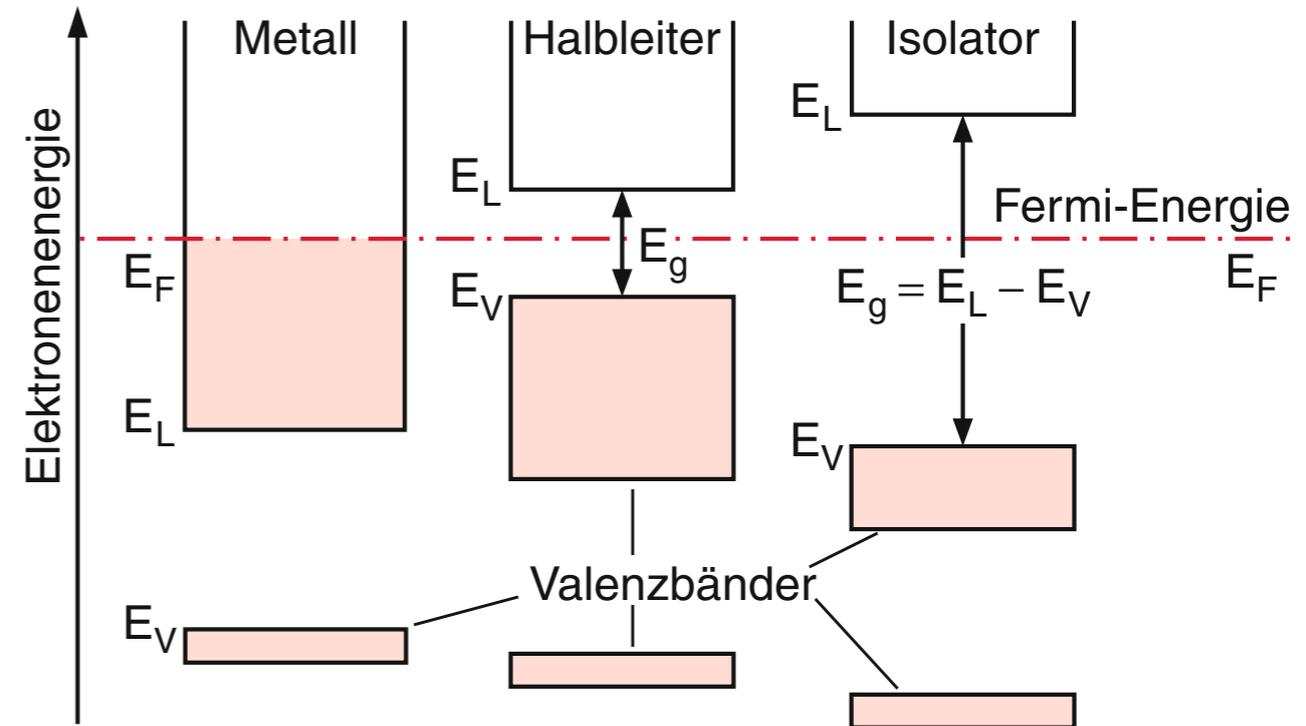
Kurze Zusammenfassung

- Modelle für Elektronen in Festkörpern
 - Freies **Elektronengas**: nur Pauli-Prinzip
 - **Bändermodell**: Elektronen in periodischem Potenzial
- **Bändermodell**:
 - Erlaubte Energieniveaus überlappen → **Energiebänder**
 - Valenz- und Leitungsband, ggf. **Bandlücke**
 - Erklärung für unterschiedliche **Leitfähigkeit**: Isolatoren – Leiter – Halbleiter

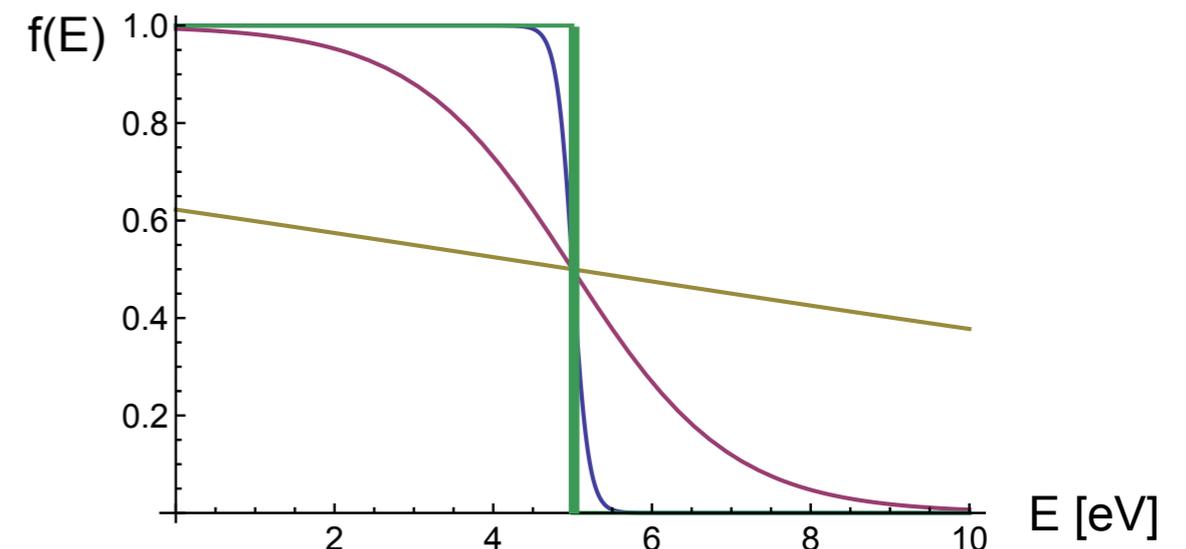
Dotierte Halbleiter

Halbleiter im Bändermodell

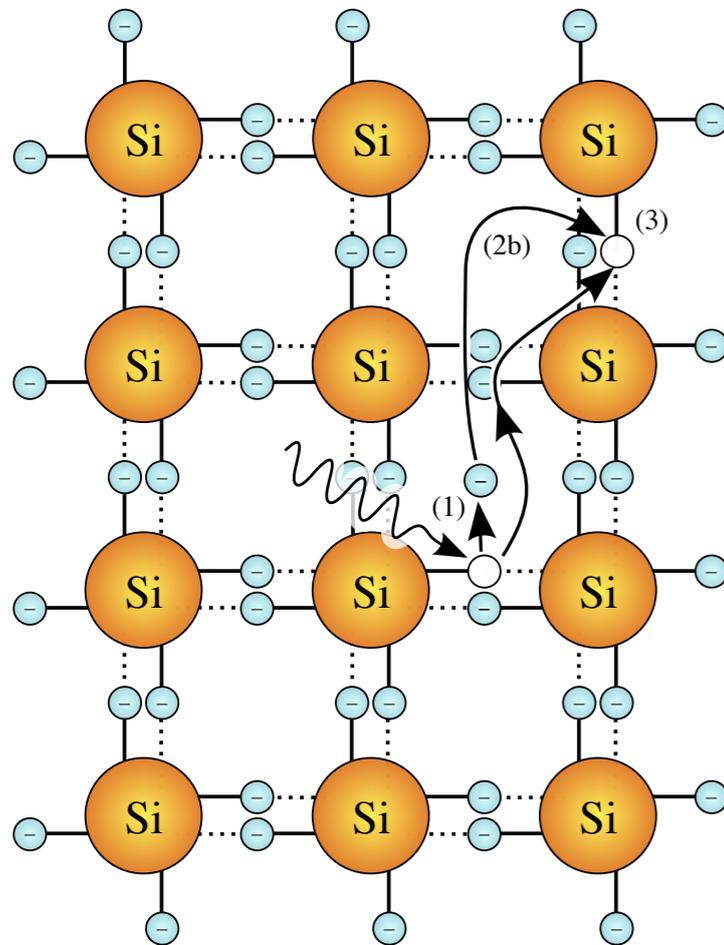
- Halbleiter, z. B. Silizium
 - Tiefe Temperaturen: **sehr geringe** Leitfähigkeit
 - Anstieg der Leitfähigkeit mit Temperatur
- Erklärung im Bändermodell
 - **Bandlücke** E_g in Halbleitern **kleiner** als bei Isolatoren
 - Einige Elektronen können durch **thermische Anregung** Bandlücke überwinden (vgl. Fermi-Dirac-Verteilung)



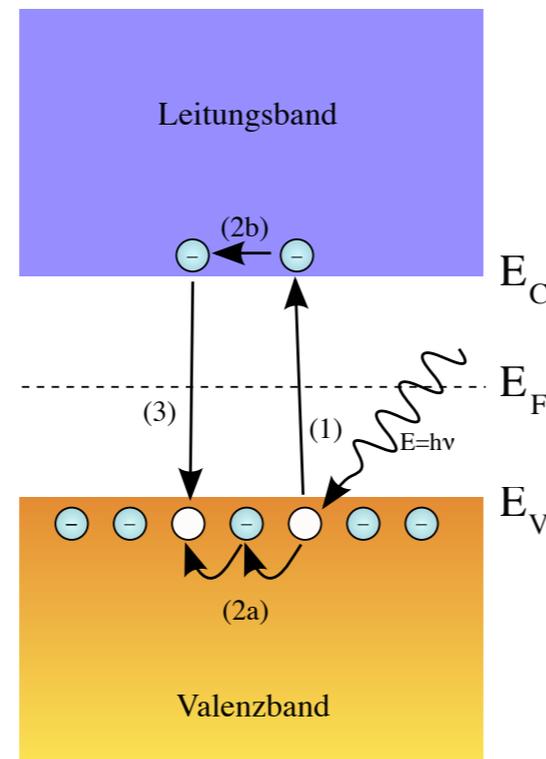
[Demtröder, Experimentalphysik 3, Springer 2010]



Elektronen und Löcher



Kristallgitter



- 1) Generation durch Absorption eines Photons
- 2a) Lochbewegung über Platzwechsel von Elektronen im VB
- 2b) Elektronenbewegung im LB
- 3) Rekombination

Banddiagramm

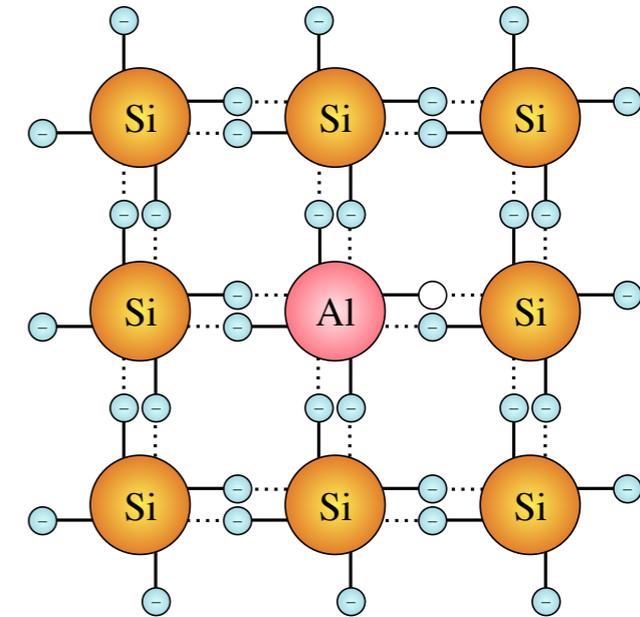
[de.wikipedia.org]

- Elektronen von Valenzband ins Leitungsband gehoben
→ „Loch“ im Valenzband
- Löcherleitung:
 - Elektronen können Plätze im Valenzband wechseln
→ Bewegung des Lochs
 - Beschreibung als eigenständiger positiver Ladungsträger
- Konsequenz: in Halbleiter tragen zwei Arten von Ladungsträgern zur Leitfähigkeit bei, Elektronen und Löcher

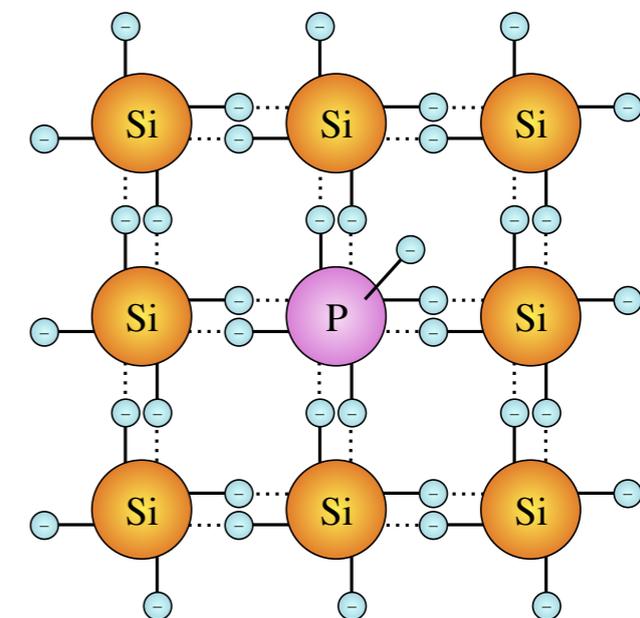
Dotierte Halbleiter

- Dotierung = gezielte Veränderung der elektronischen Eigenschaften von Halbleitern durch **Einbau von Fremdatomen** in Kristallgitter
- Wichtigstes Beispiel: Silizium
 - 4 Valenzelektronen pro Atom
 - p-Dotierung: Atome mit 3 Valenzelektronen → zusätzliche Löcher: „**Akzeptoren**“
 - n-Dotierung: Atome mit 5 Valenzelektronen → zusätzliche Elektronen: „**Donatoren**“

p-Dotierung: zusätzliches Loch

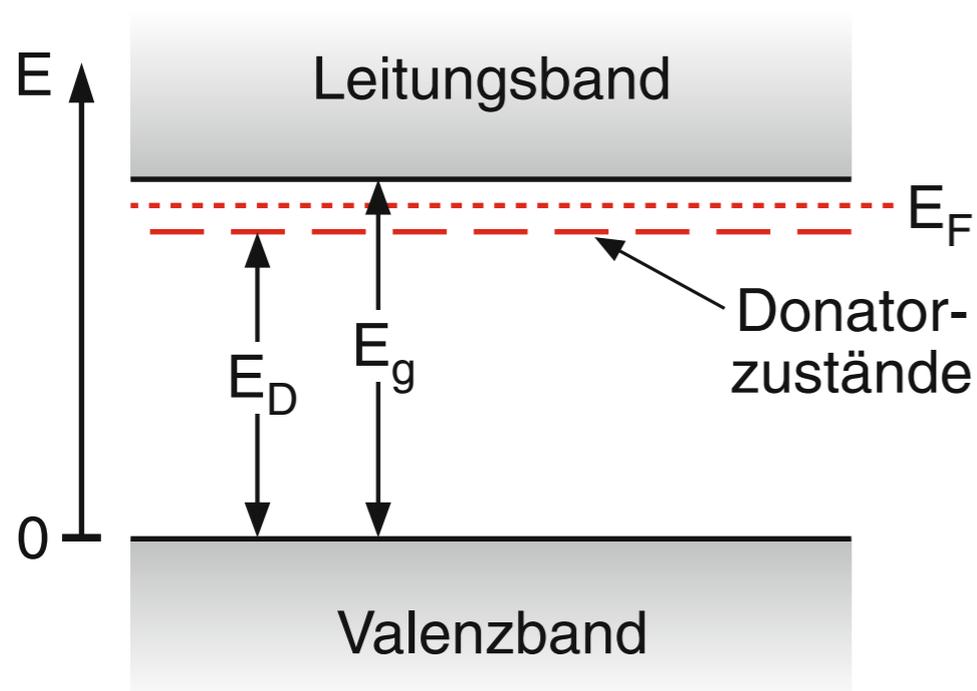


n-Dotierung: zusätzliches Elektron



[de.wikipedia.org]

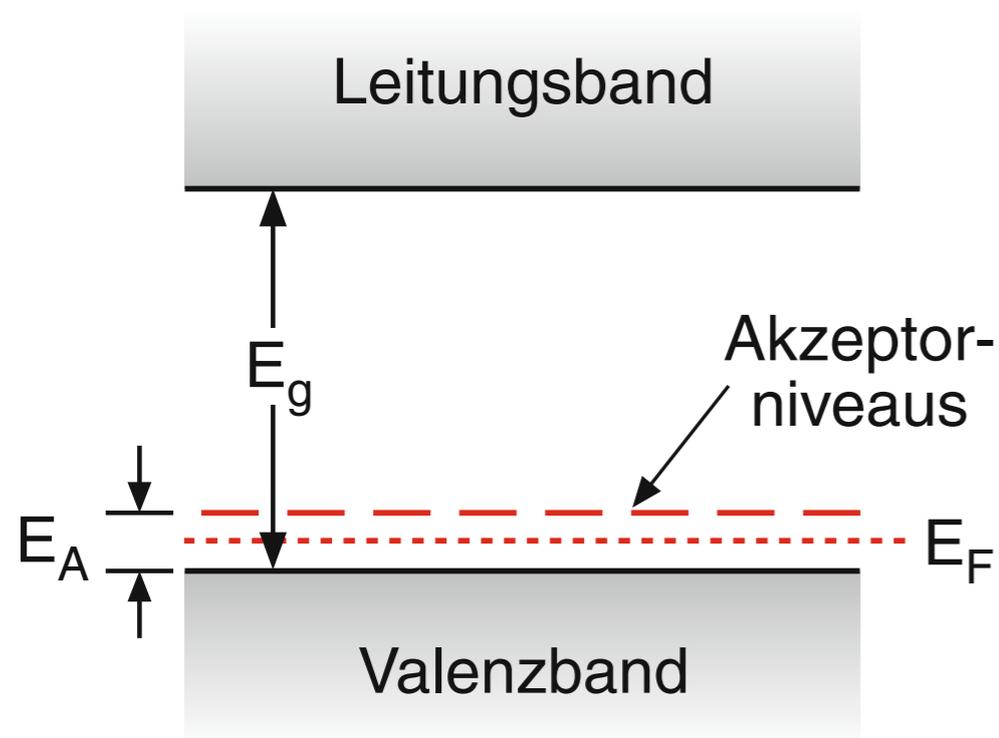
Dotierung im Bändermodell



■ n-Halbleiter:

- Zusätzliche Elektronen → neues Energieniveau dicht unterhalb des Leitungsbandes: „Donatorniveau“
- Fermienergie zwischen Donatorniveau und Leitungsband
- Thermische Anregung: Elektronen auf Donatorniveau gelangen leicht ins Leitungsband
- Majoritätsladungsträger: **Elektronen**

Dotierung im Bändermodell

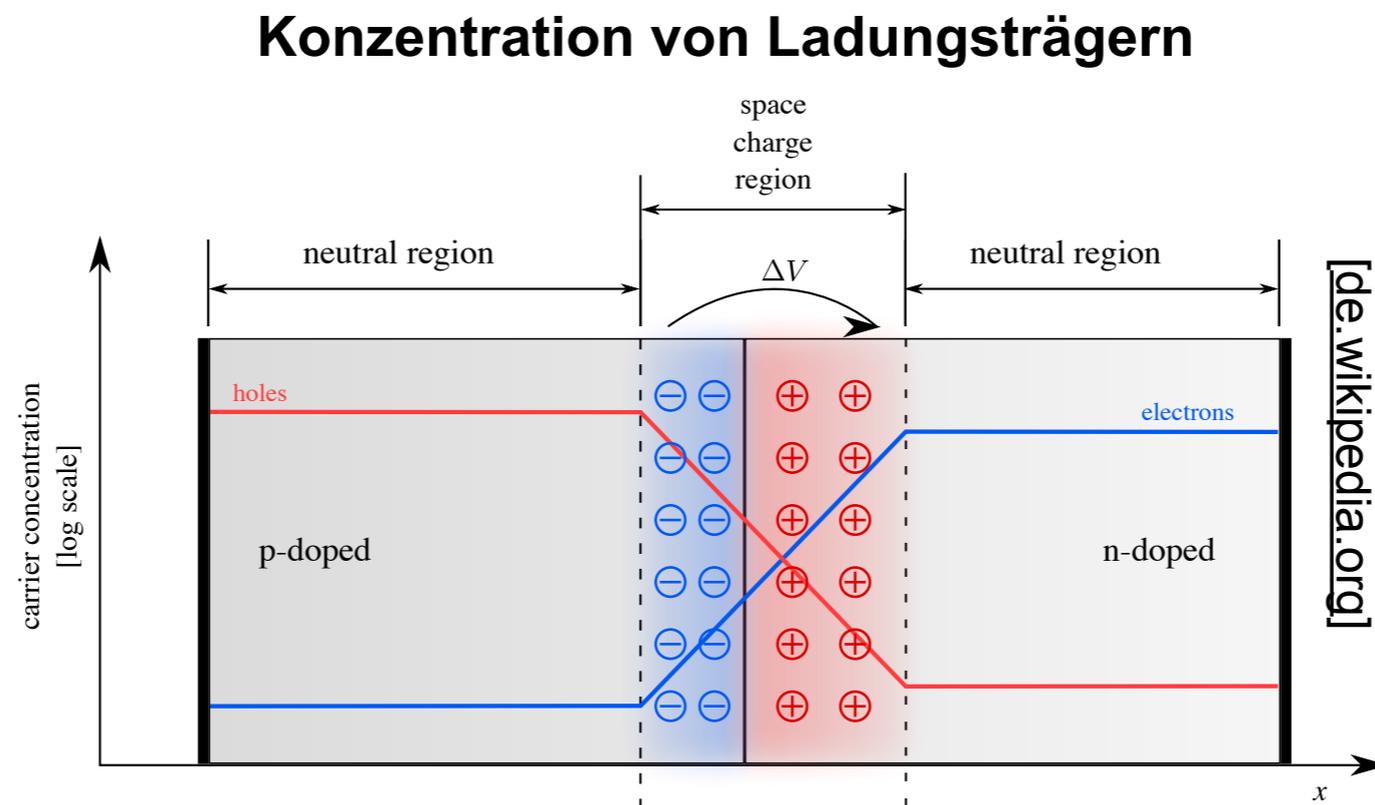


■ p-Halbleiter:

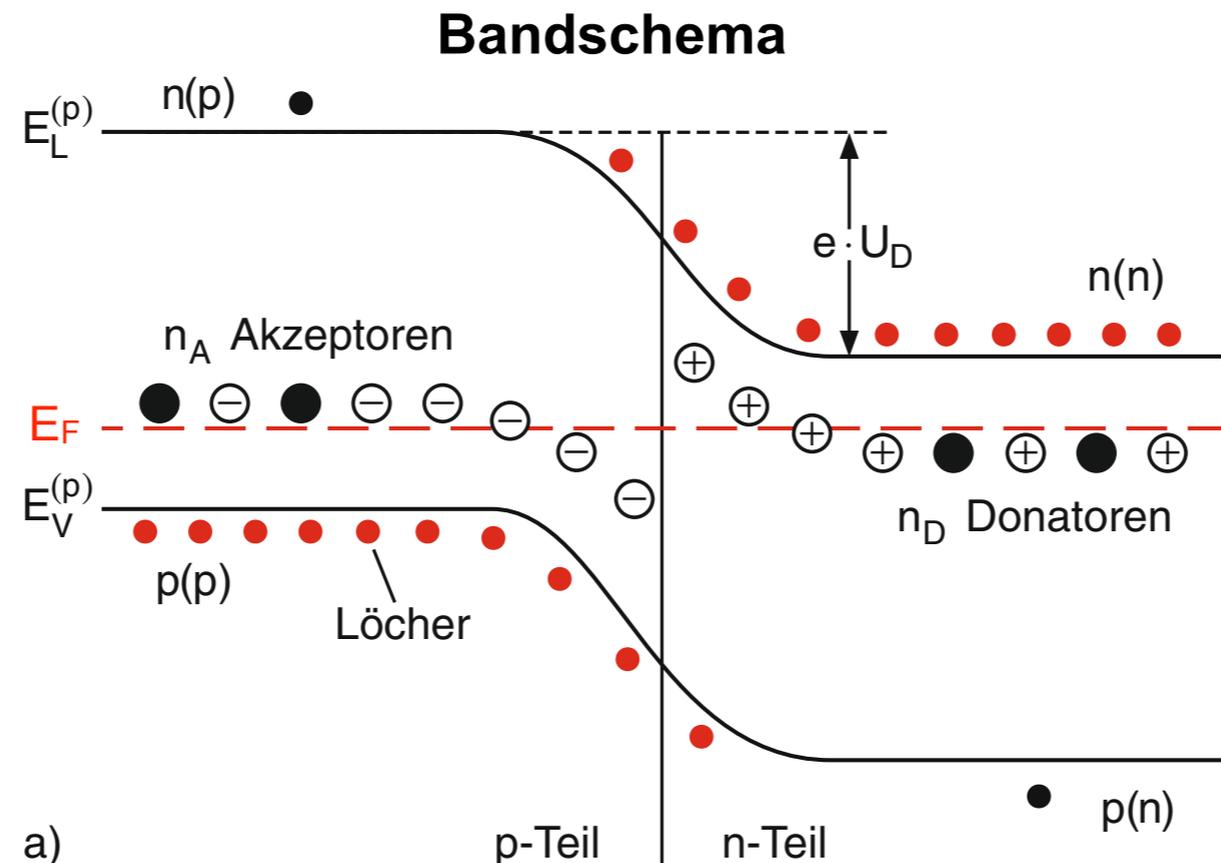
- Zusätzliche Löcher → neues Energieniveau dicht oberhalb des Valenzbandes: „Akzeptorniveau“
- Fermienergie zwischen Valenzband und Akzeptorniveau
- Thermische Anregung: Elektronen aus Valenzband auf Akzeptorniveau gehoben → Löcher
- Majoritätsladungsträger: Löcher

pn-Übergang

- Zusammenfügen von p- und n-Halbleitern: interessante Physik
 - Starker **Konzentrationsunterschied**: viele Elektronen im n-Halbleiter, viele Löcher im p-Halbleiter
 - Diffusion der Elektronen in p-Halbleiter → **Rekombination** mit Löchern
 - Diffusion der Löcher in n-Halbleiter → **Rekombination** mit Elektronen
 - Konsequenz: „**Verarmungszone**“ ohne freie Ladungsträger



pn-Übergang im Bändermodell



[Demtröder, Experimentalphysik 3]

■ Bändermodell:

- Grenzfläche zwischen n- und p-Halbleiter: „**verbogenes**“ Valenz- und Leitungsband, **dieselbe Fermienergie E_F**
- **Diffusionsspannung U_D** aufgrund unterschiedlicher Elektronen- und Löcherkonzentration in n- und p-Halbleiter

pn-Übergang als Diode

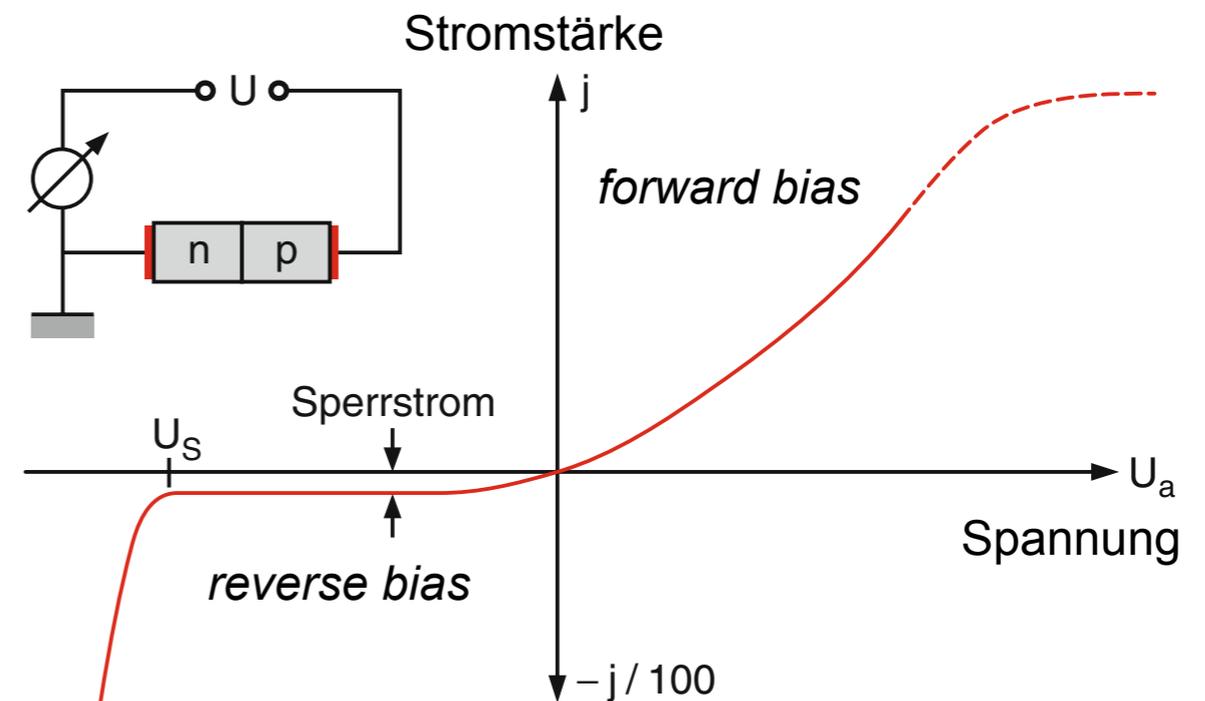
■ Biasspannung

- Positiver Pol am p-Halbleiter (engl.: „**forward bias**”)
 - geringere Diffusionsspannung
 - schmalere Verarmungszone
- Negativer Pol am p-Halbleiter (engl.: „**reverse bias**”)
 - größere Diffusionsspannung
 - breitere Verarmungszone

■ Strom-Spannungs-Charakteristik

- Forward bias: Strom steigt exponentiell mit Spannung bis zu Sättigung
- Reverse bias: sehr kleiner Sperrstrom, Durchbruch

Strom-Spannungs-Charakteristik



[Demtröder, Experimentalphysik 3]

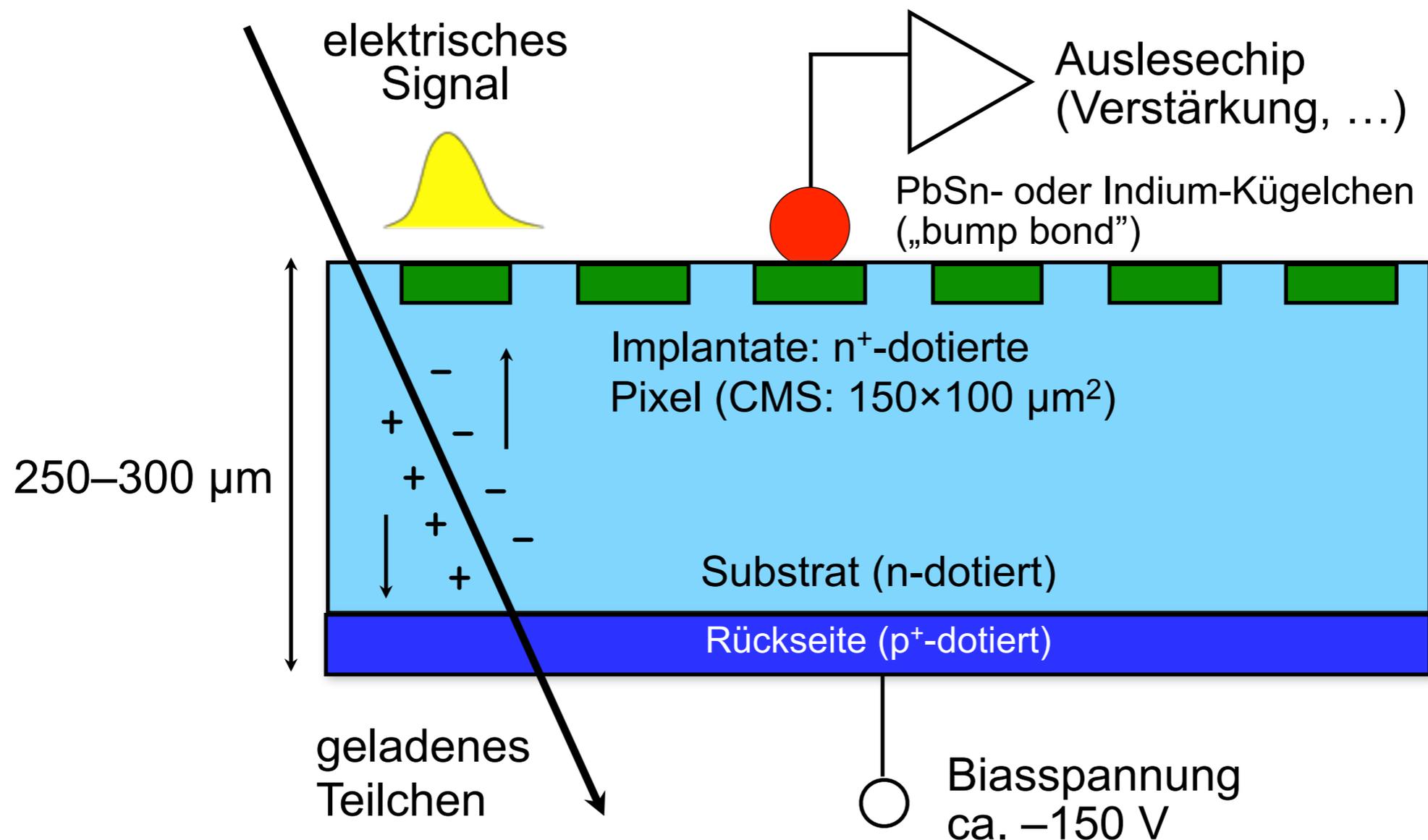
Kurze Zusammenfassung

- Halbleiter:
 - Leitfähigkeit: Isolatoren bei $T = 0 \text{ K}$, Leitfähigkeit durch thermische Anregung (kleine Bandlücke)
 - Ladungsträger: **Elektronen** (−) und **Löcher** (= fehlende Elektronen, +)
- Veränderte Halbleiter-Eigenschaften durch **Dotierung**:
 - n-Dotierung → **Donatoren**, p-Dotierung → **Akzeptoren**
 - pn-Übergang: **Verarmungszone** in Grenzschicht
 - Äußere negative Spannung → Ausdehnung der Verarmungszone

Spurdetektoren aus Halbleitermaterialien

Siliziumdetektor: Funktionsweise

- Detektor: Halbleiterdiode mit pn-Übergang in Sperrrichtung
- Ionisierung des Detektormaterials: Elektron-/Loch-Paare



Ein paar Zahlen

■ Abschätzung der Signalstärke

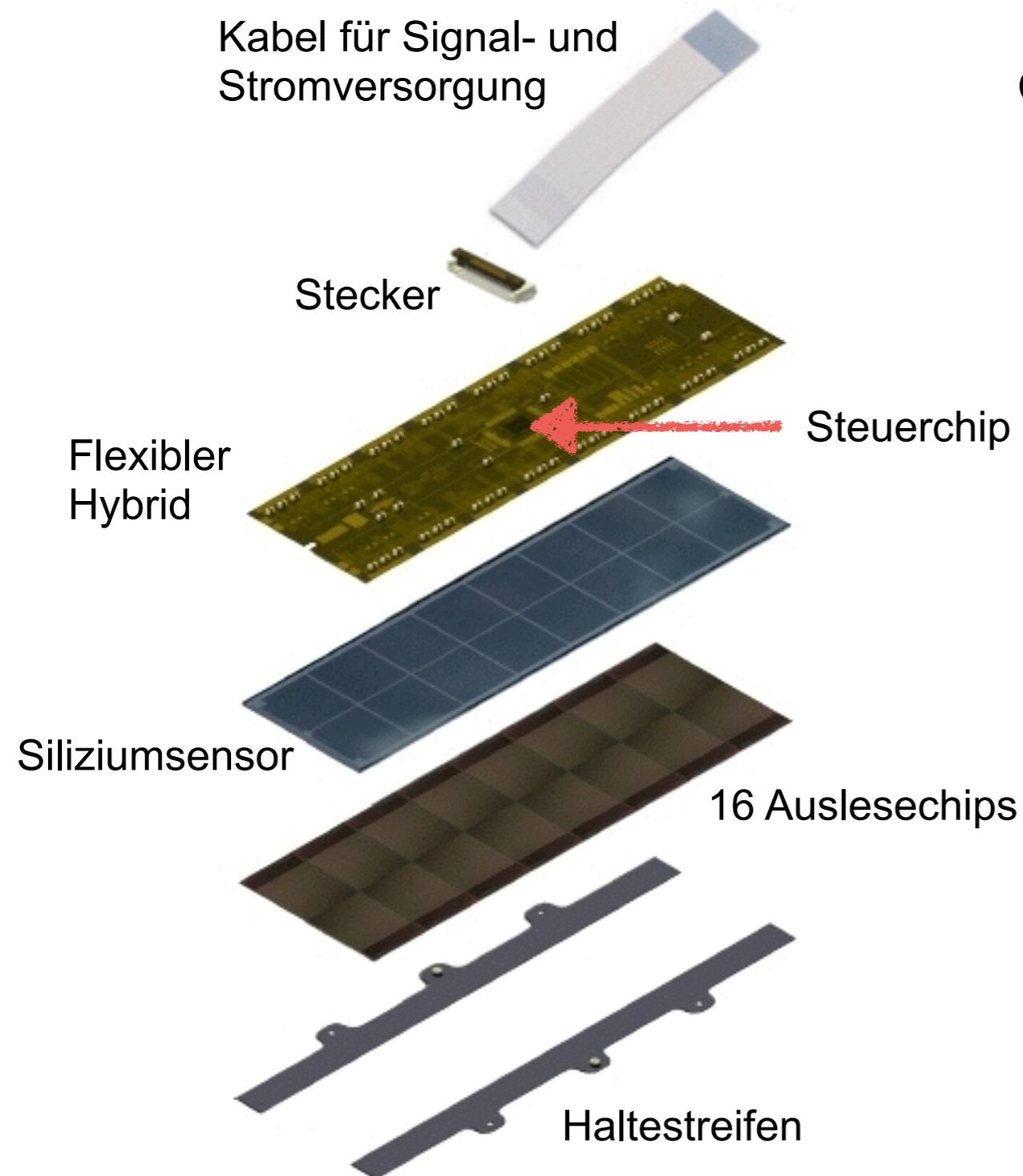
- Signal proportional zu Dicke d der Verarmungszone, typisch $d = 300 \mu\text{m}$
- Energiedeposition geladenes Teilchen (vgl. Bethe-Formel):
 $(dE/dx)_{\min} = 1,6 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$
- Dichte von Silizium: $\rho = 2,3 \text{ g/cm}^3$
- Ionisationsenergie in Silizium: $E_{\text{ion}} = 3,6 \text{ eV}$ pro Elektron-Loch-Paar
- Zahl der Elektronen:

$$N_e = \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\min} \cdot \rho \cdot d \approx 30000$$

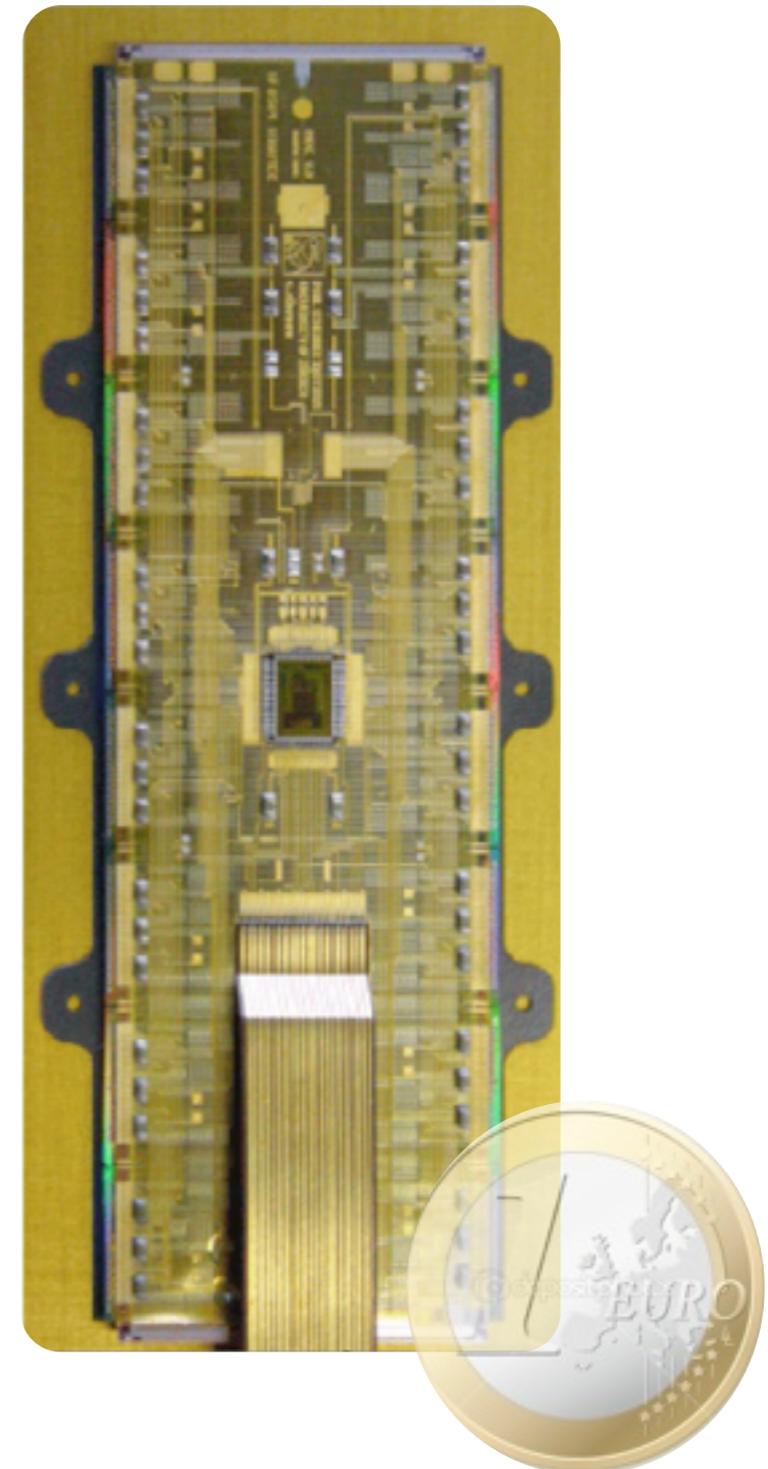
■ Signale durch Ionisation klein

- Freie Ladungsträger vorhanden → Signal überdeckt
- Nur Verarmungszone als Detektor nutzbar

CMS-Pixeldetektormodul

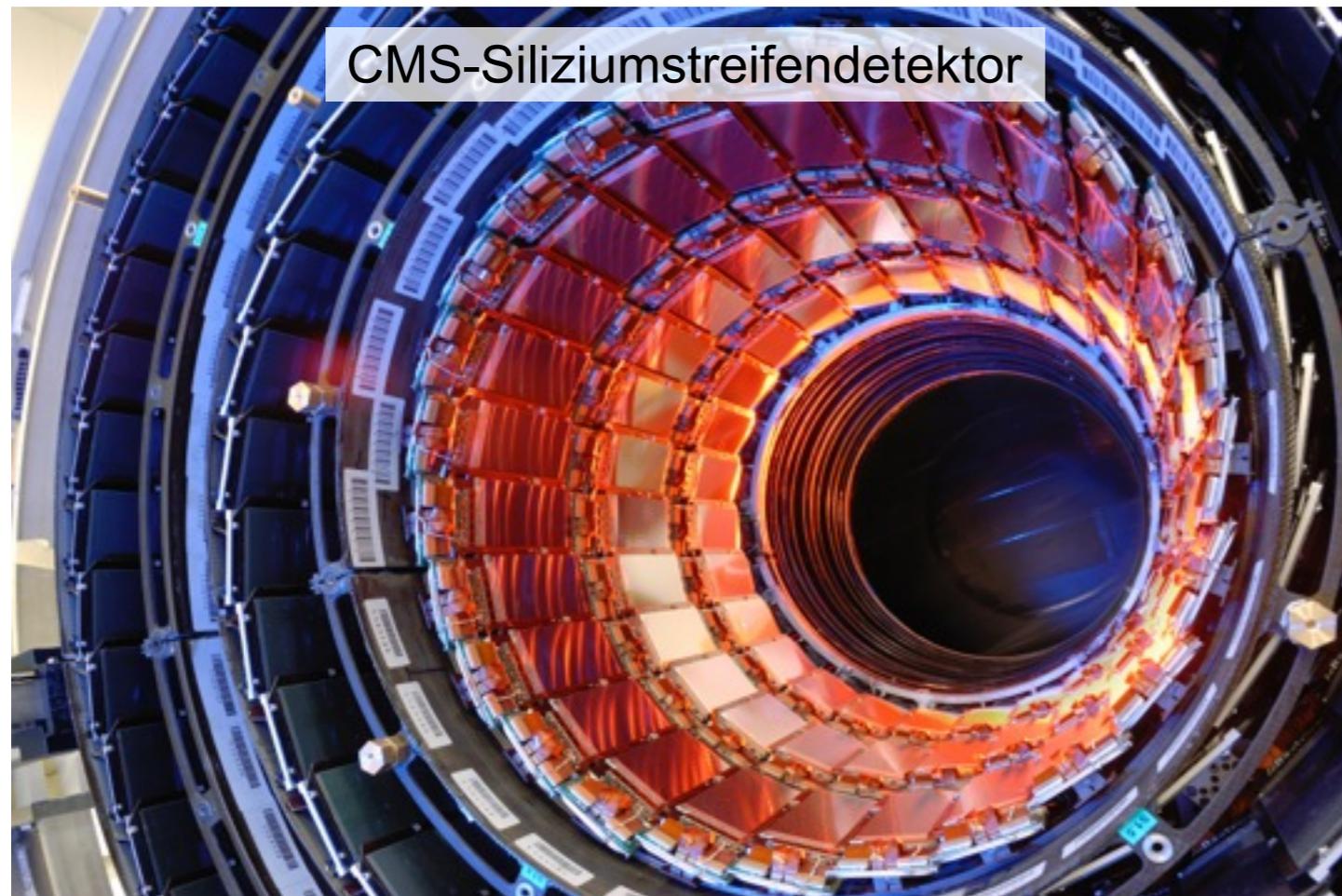


Fertiges Modul des
CMS-Pixeldetektors
(ca. 64000 Pixel)



Siliziumdetektoren bei CMS

- 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



KIT: signifikante Beteiligung
an Forschung und
Entwicklung sowie Bau
des CMS-Spurdetektors

Zusammenfassung & Ausblick

- Siliziumdetektoren: wichtiger Bestandteil moderner Teilchenphysikexperimente
- Physikalische Grundlagen:
 - Geladene Teilchen in Materie: Ionisation
 - Ionisation in Halbleitern: Elektronen und Löcher
 - pn-Übergang mit „reverse bias“: Teilchendetektor
- Jetzt: Versuche mit Siliziumdetektoren (Robert Eber, Andreas Nürnberg)