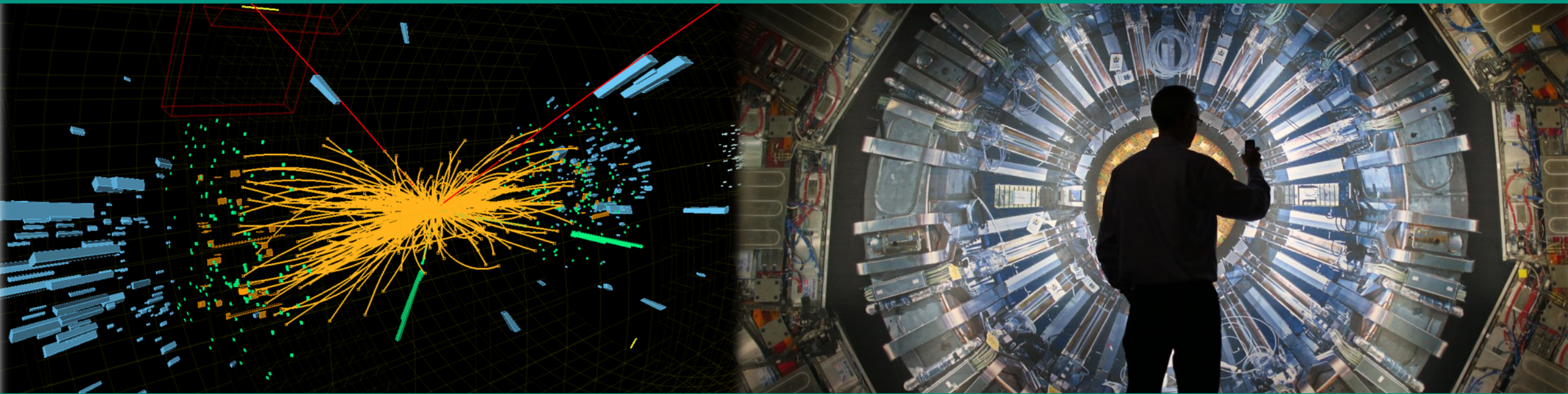


Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Vorlesung 7

9.5.2023

Guido Drexlin & Markus Klute



Recap: Wechselwirkungen von e^- , e^+ , γ

- dE/dx von leichten geladenen Teilchen: e^- , e^+
 - dominante Energieverluste durch radiative Prozesse: **Bremsstrahlung**
 - Strahlungslänge X_0 : $E(X) = E_0 \cdot e^{-X/X_0}$ (Abfall auf $(1/e)$ -tel)
def. räumliche Entwicklung eines elektromagn. Schauers
 - Cherenkov-Strahlung: Öffnungswinkel $\cos\theta = 1/(\beta \cdot n)$
- Wechselwirkungen von Gamma-Quanten, elektromagnetische Schauer
 - Photoeffekt: großes Z , kleines $E_\gamma \Rightarrow$ Anwendung: **PMT**
 - Comptoneffekt: mittleres Z , mittleres E_γ , Paarbildung: $E_{thres} = 1,02 \text{ MeV}$
 - elektromagn. Schauer: Abfolge von Paarbildung $\Leftrightarrow$ Bremsstrahlung bis E_C

Konzept Frage

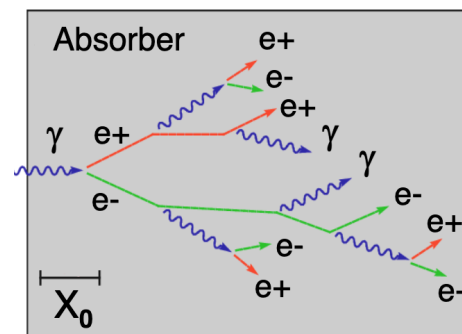
■ Ein Photon aus einem Higgs Boson Zerfall erzeugt in einem Bleikristall einen elektromagnetischen Schauer. Warum entwickelt sich ein Schauer? Und wie misst man letztendlich die Energie des Photons?

Konzept Frage

■ Ein Photon aus einem Higgs Boson Zerfall erzeugt in einem Bleikristall einen elektromagnetischen Schauer. Warum entwickelt sich ein Schauer? Und wie misst man letztendlich die Energie des Photons?

■ Initiierung durch hochenergetische Gammas / Elektronen

- primäres hochenergetisches Photon: $e^+ e^-$ Paarbildung
- primäres hochenergetisches Elektron: Bremsstrahlung
- Kaskadenprozess: **Paarbildung** $\leftrightarrow$ **Bremsstrahlung**



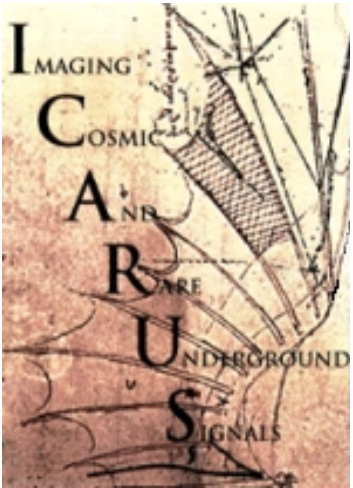
Q: nach aanda.org

Heitler-Modell:

- Anwachsen der Teilchenzahl (Generation)
- mittlere Energie pro Teilchen nimmt ab
- Erzeugung zahlreicher Sekundärteilchen: niederenergetische e^- , e^+ und Photonen
- Schauer stirbt aus sobald $E < E_c$

Elektromagnetische Schauer: Beispiele

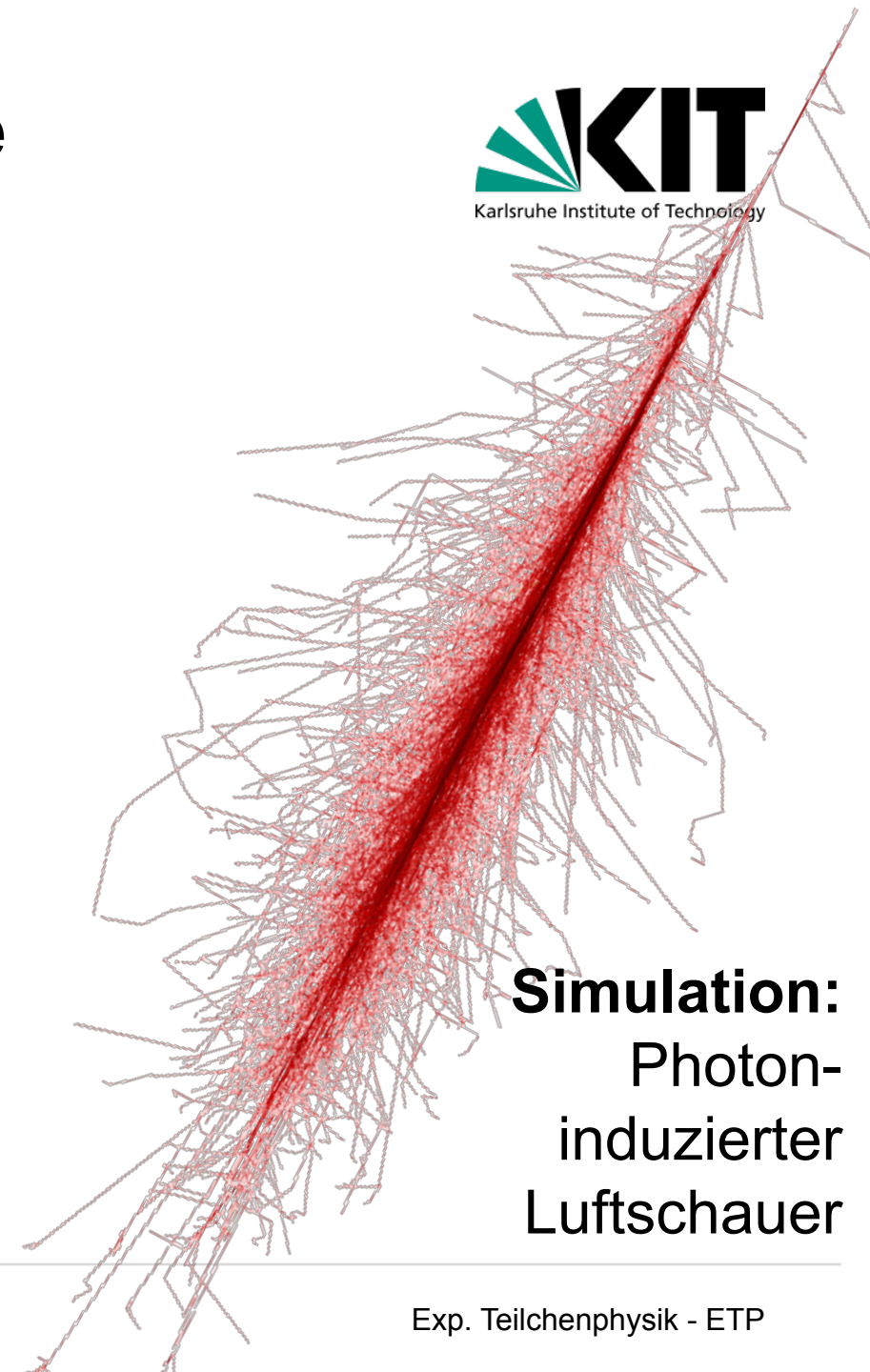
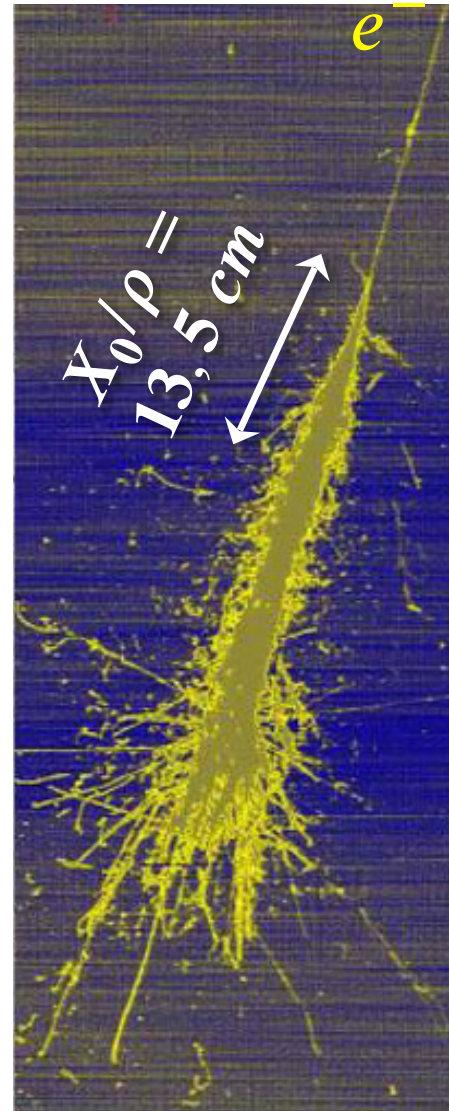
- Schauer im Experiment & in *MC*–Simulationen



ICARUS–Experiment:

ν –induzierter Teilchenschauer in einem *Flüssig-Argon Kalorimeter* – Wechselwirkung eines primären e^-

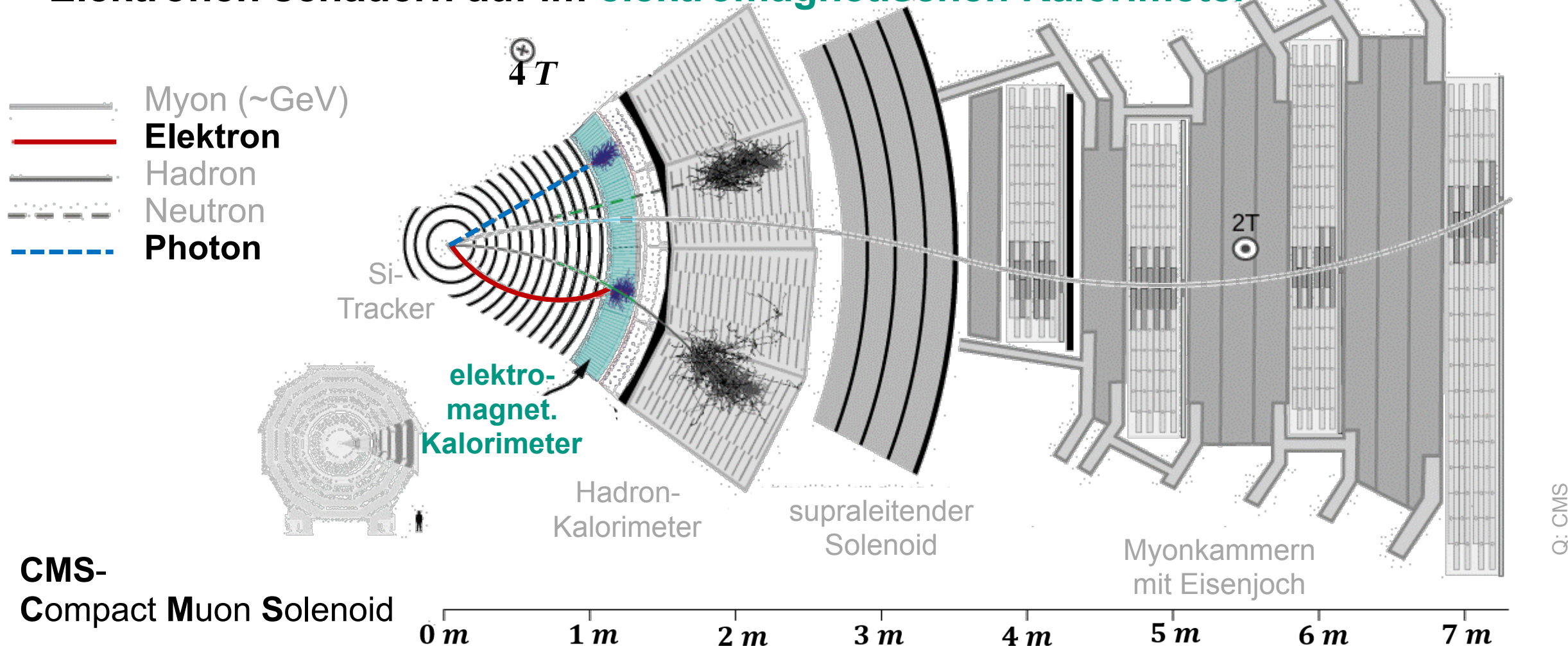
Q: ICARUS



Simulation:
Photon-
induzierter
Luftschauer

Elektronen in großen Detektorsystemen

- Elektronen schauen auf im **elektromagnetischen Kalorimeter***



CMS-
Compact Muon Solenoid



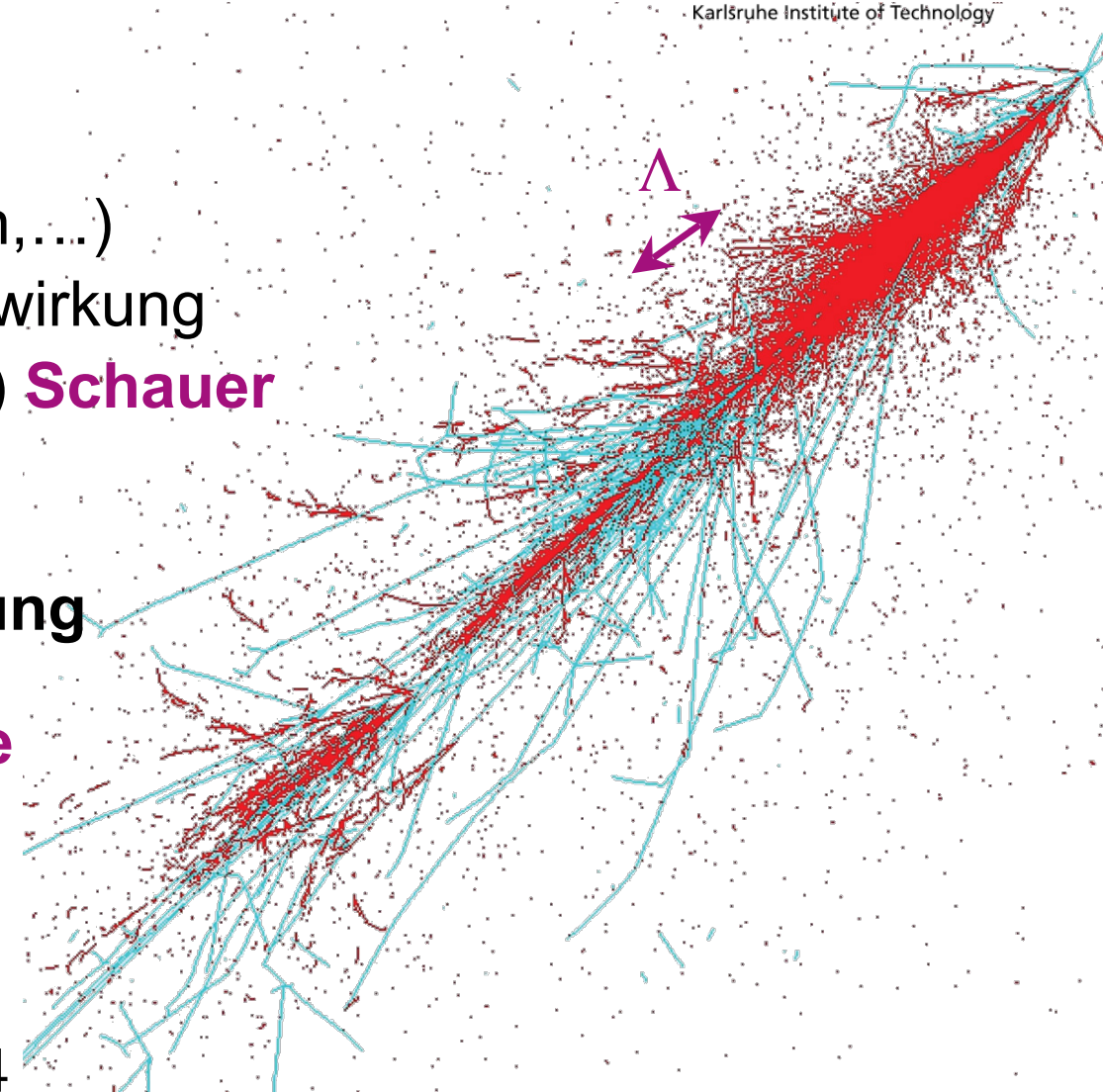
KAPITEL 3.5 – HADRONISCHE WECHSELWIRKUNG

Hadronische Wechselwirkung

■ Wechselwirkung von Hadronen in Materie

- **alle** Hadronen (Protonen, Neutronen, Pionen,...) unterliegen Prozessen der **starken** Wechselwirkung
→ **hadronische** (und elektromagnetische) **Schauer**
- geladene Hadronen (p , π^+ , π^- , K^+ , K^-):
→ **plus elektromagnetische Wechselwirkung**
- Hadronen charakterisiert durch **hadronische Wechselwirkungslänge Λ** in Einheiten (g/cm^2 bzw. cm)

komplexe hadronische Wechselwirkung eines
500 GeV Protons in **Cu**, modelliert in **GEANT4**



Hadronische Wechselwirkung

■ Wechselwirkung von Hadronen in Materie

hadronische Wechselwirkungslänge Λ

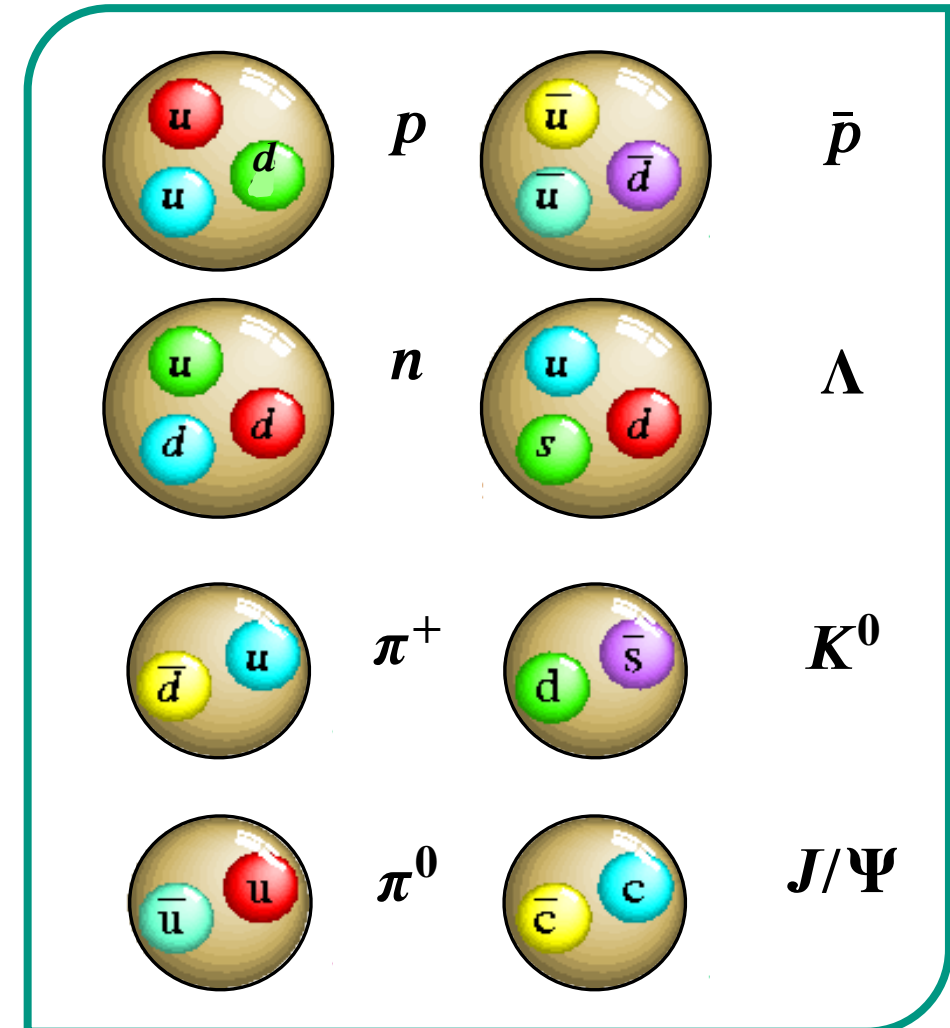
= mittlere Länge für inelastische Streuung

$$\Lambda = \frac{1}{\sigma \cdot n}$$

σ : Kern-Wirkungsquerschnitt

n : Anzahl der Streuzentren

mit $n = N_A / A$



Hadronische Reaktionen: sekundäre Teilchen

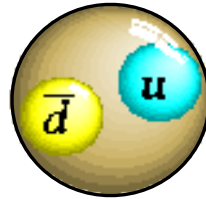
- Produktion **sekundärer Hadronen**, z.B. leichter Pionen:

$$m(\pi^+) \sim 140 \text{ MeV}$$

- Zerfallsreaktionen, z.B. von **Pionen**

Erzeugung von

geladenes Pion π^+
 $\tau = 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$



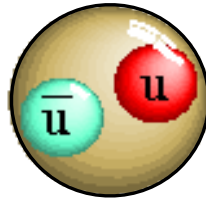
Myon μ^+

Myon-Neutrino ν_μ



m . i . p .

ungeladenes Pion π^0
 $\tau = 8,5 \cdot 10^{-17} \text{ s}$



2 Gammas ($\gamma + \gamma$)



elektromagnet.
sub-Kaskade

- **Kernreaktionen:** Anregung, Abregung, Spaltung, Spallation (*n*-Abdampfen),...

Hadronische Wechselwirkungslänge Λ

■ Intensitätsverlauf für **hadronische Absorption**

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-x/\Lambda}$$



charakteristische Länge: Λ

Charakteristikum hadronischer Prozesse:

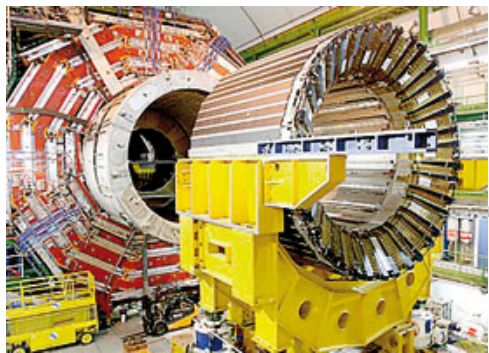
- **Λ (Hadronen)** ist wesentlich größer als $X_0(e^-, e^+, \gamma)$
- Beispiel: **Erdatmosphäre** entspricht: $\sim 25 X_0$
aber nur $\sim 11 \Lambda$
- starke Fluktuationen um Λ

Material			
(gasf.)			7
Wasser			
Argon (fl.)			
Eisen			
Blei			

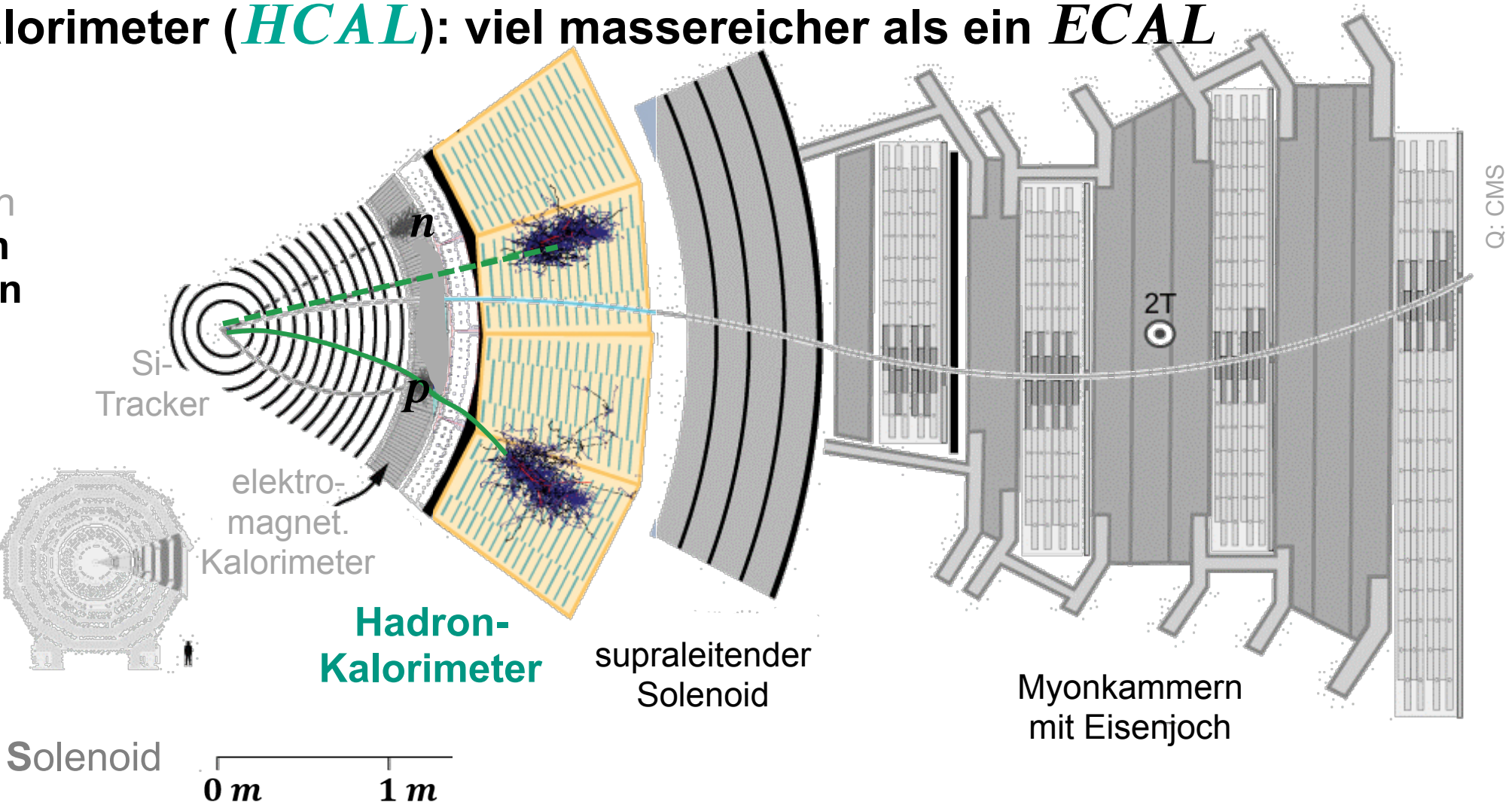
Hadron-Nachweis: Hadronische Kalorimeter

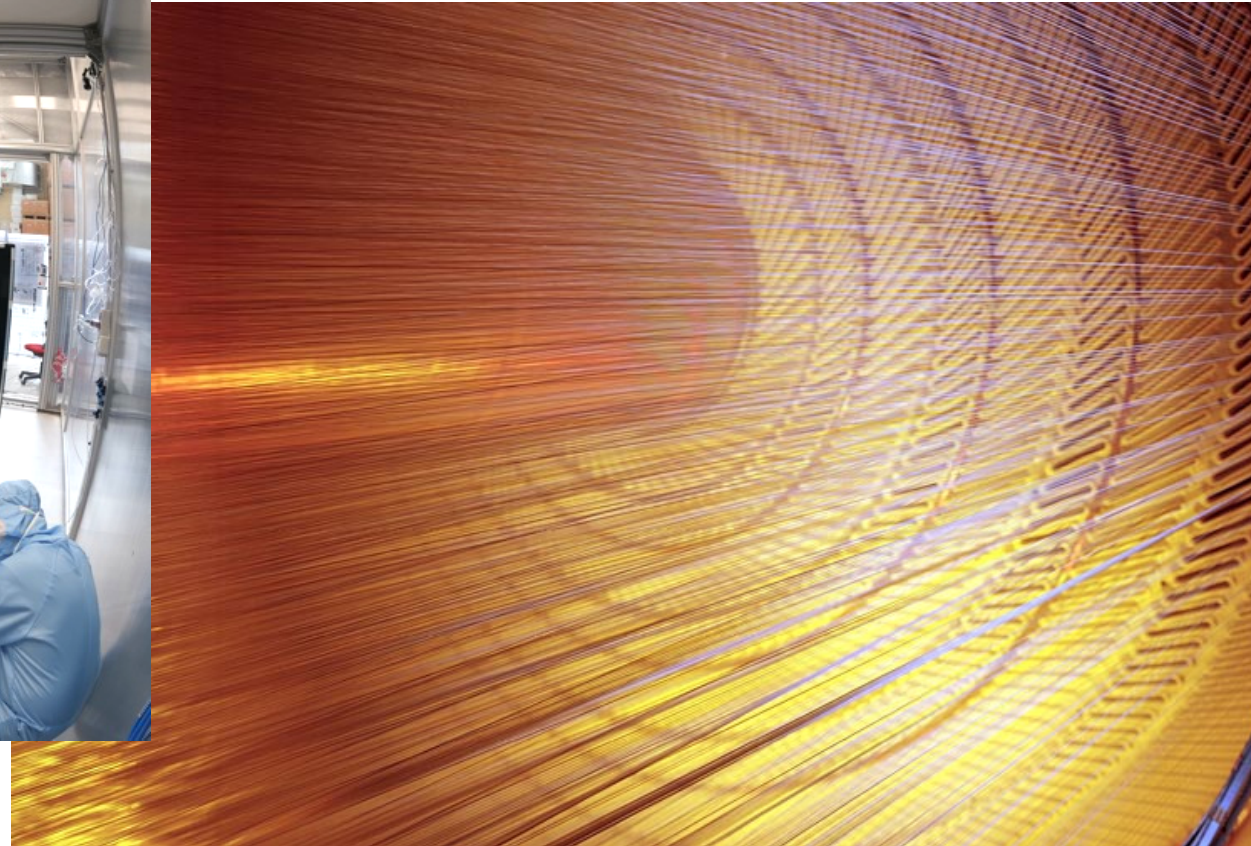
- Hadron-Kalorimeter (*H*CAL**): viel massereicher als ein *ECAL*

— Myon
— Elektron
— **Hadron**
- - - Neutron
... Photon



CMS-
Compact Muon Solenoid

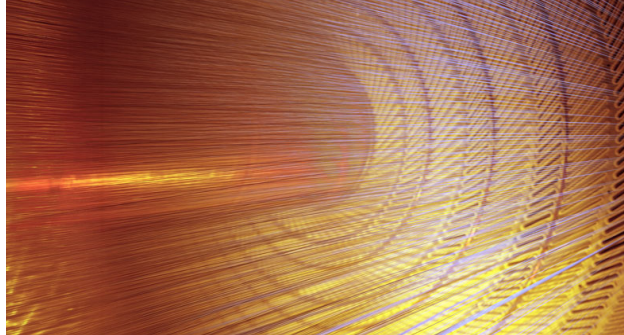




KAPITEL 3.6 – NACHWEISTECHNIKEN

Übersicht über verschiedene Techniken

Vieldrahtkammer, TPC

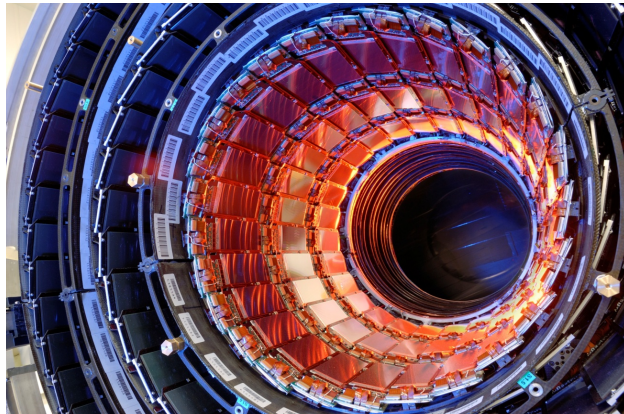


Szintillator

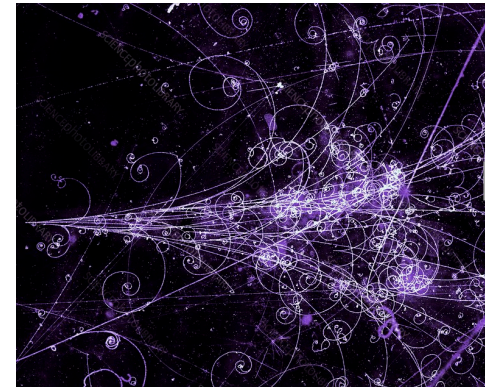
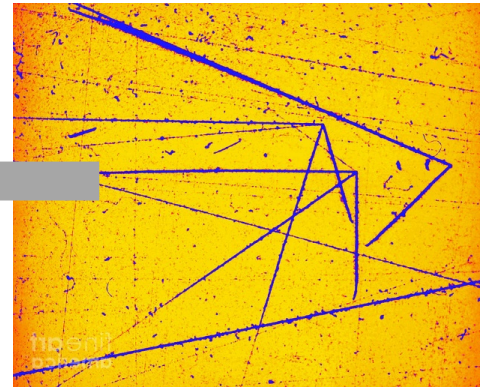


Nachweis

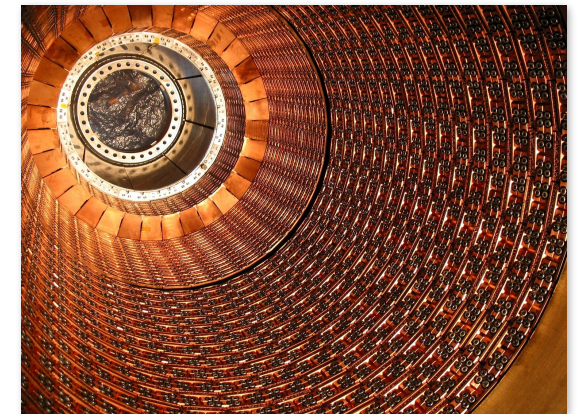
Ort x & Impuls p



Si-Pixel-Detektoren



Energie E



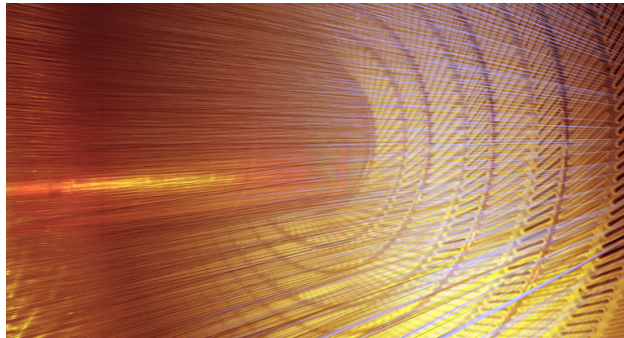
Kalorimeter

von Teilchen

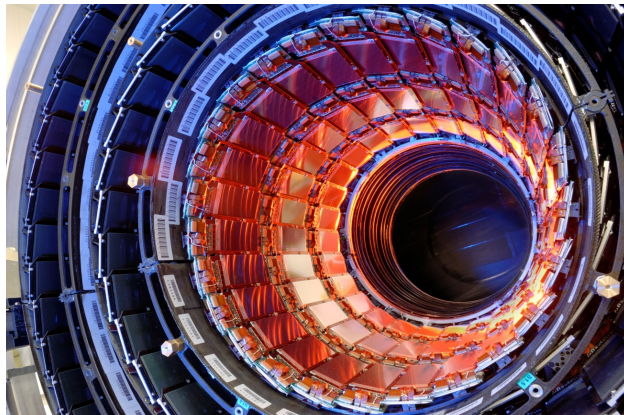
Q: CERN, Fermilab, LNGS, sciencephoto

Ortsmessung mit Drahtkammern & Si-Pixeln

Violdrahtkammer, TPC

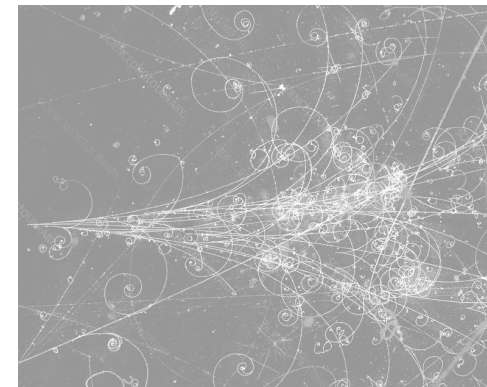
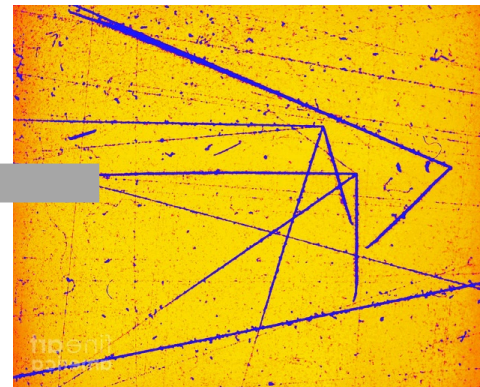


Ort x & Impuls p



Si-Pixel-Detektoren

Nachweis

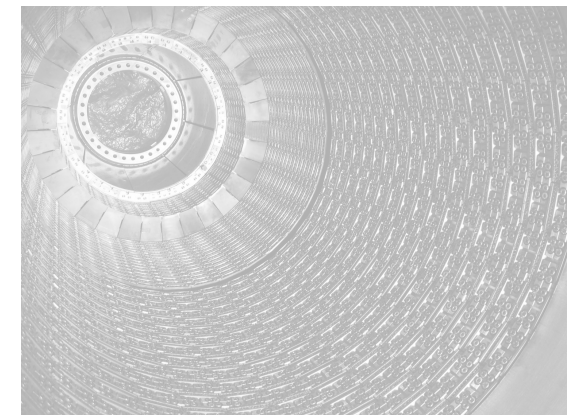


von Teilchen

Szintillator



Energie E

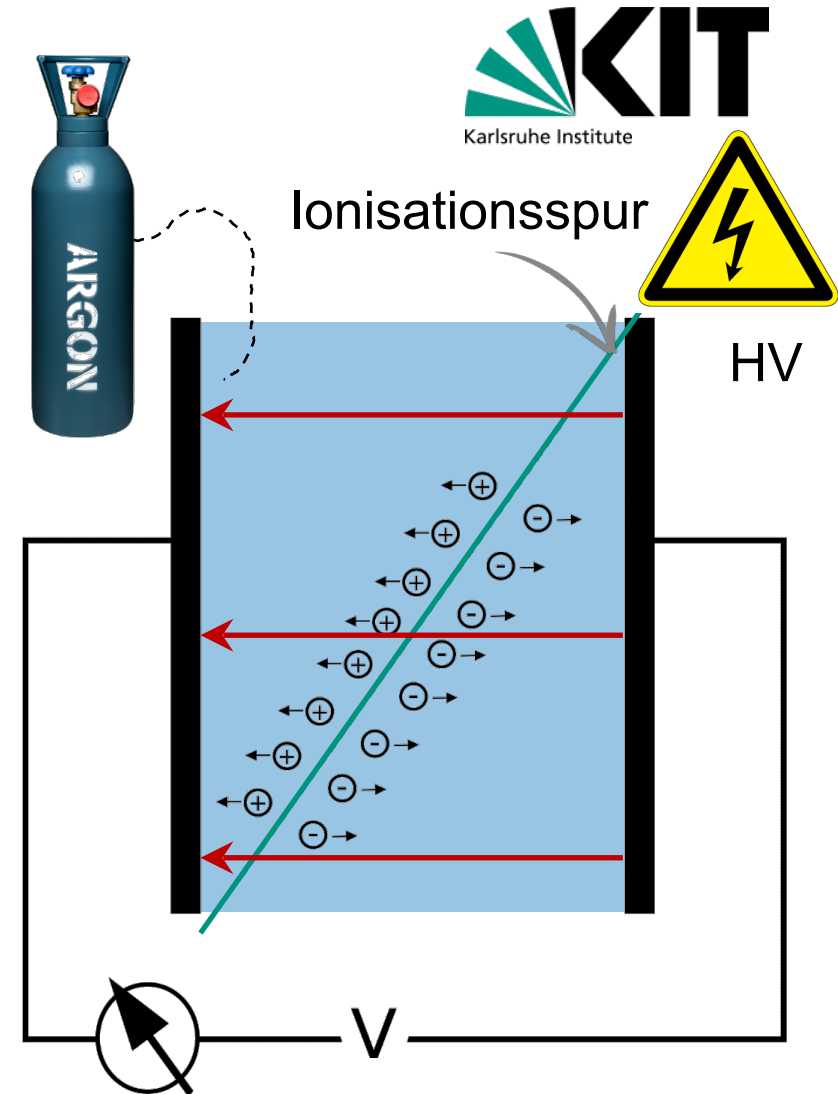


Kalorimeter

Q: CERN, Fermilab, LNGS, sciencephoto

Ionisationskammer

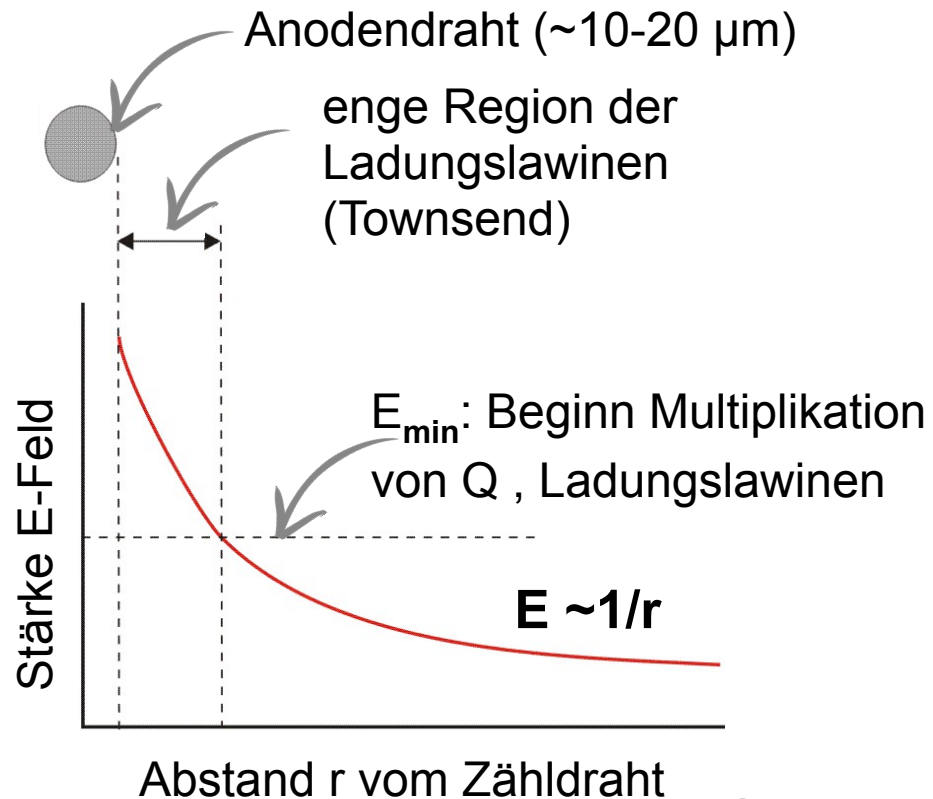
- **Kammer mit Zählgas (Ar) / Zählflüssigkeit (LAr)**
 - **Medium**: Edelgas (**Argon**, Krypton, Xenon)
 - **Prinzip**: geladenes Teilchen ionisiert Medium
 - **Auslese**: homogenes, konstantes elektrisches **Driftfeld** - Drift der Ladungsträger zu Elektroden (parallele Platten), Anode & Kathode, HV
 - **Aufgabe**: Sammlung aller Sekundärelektronen
Drift über lange Strecken - hohe Reinheit, keine elektronegativen Verunreinigungen im Medium



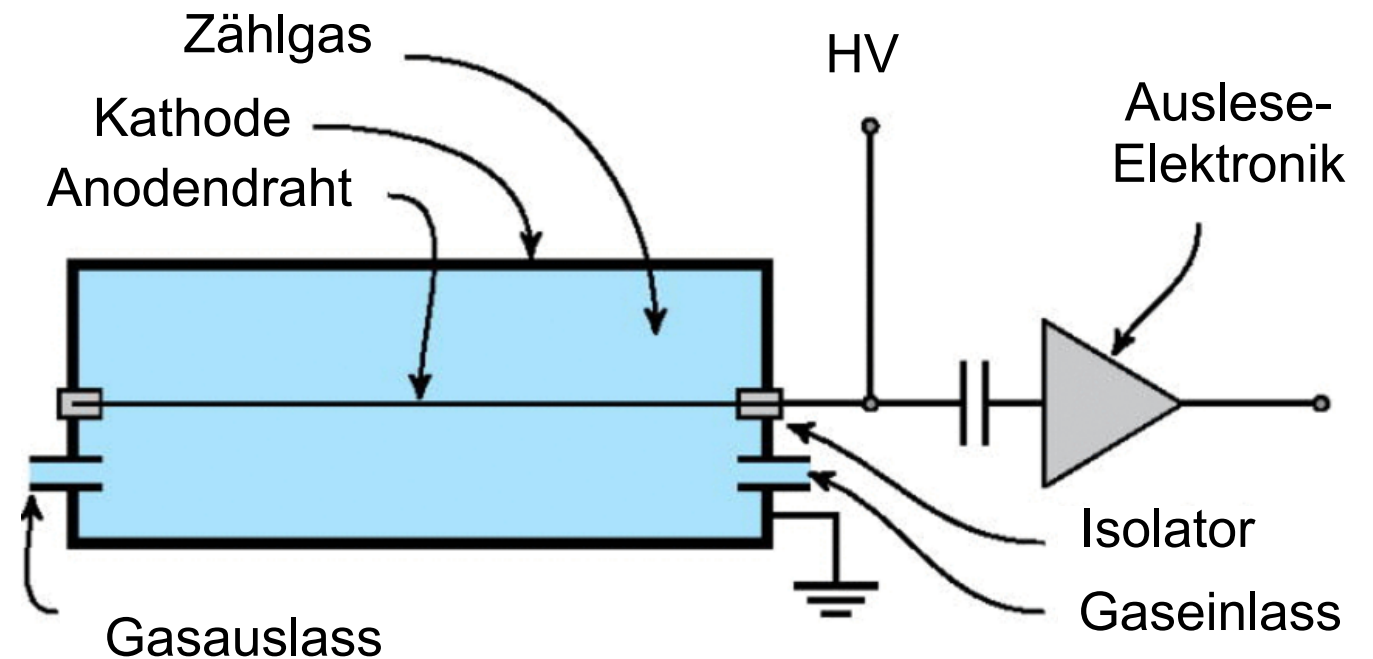
Q: wikipedia

Proportionalrohrzähler – Rohr mit Zähl draht

- **Pulshöhe des Zählers ist **proportional** zur absorbierten Energie**
 - Rohr mit Draht auf HV, Zählgas: 90% Argon & 10% Methan (CH_4)



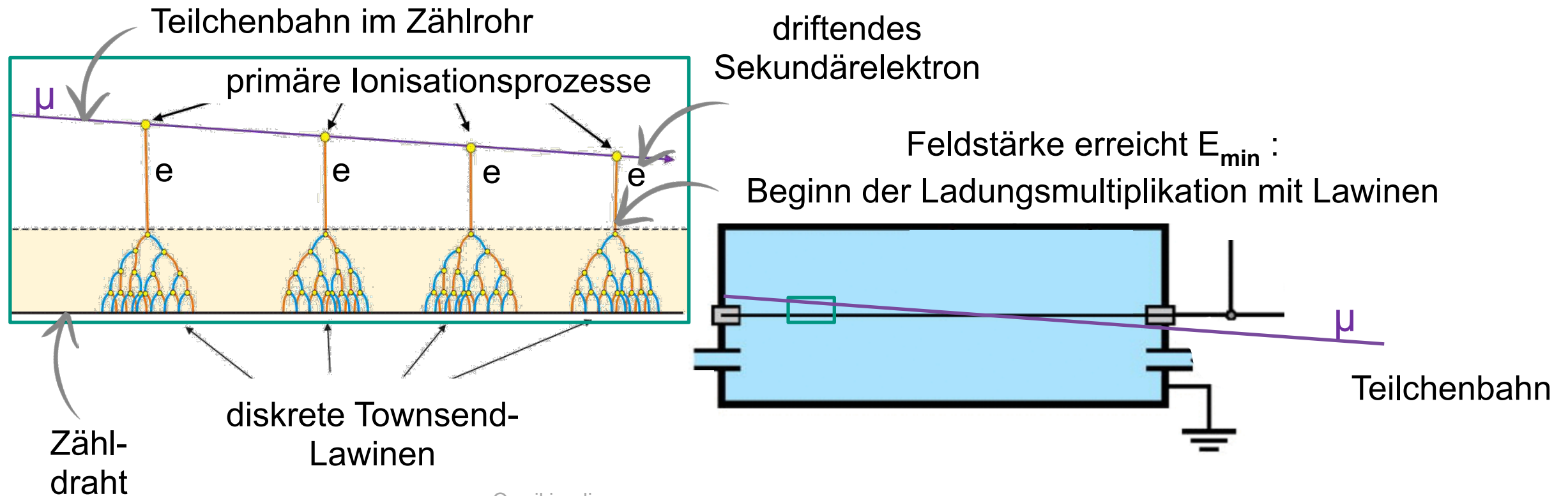
Q: wikipedia



Q: T. Hilden

Proportionalrohrzähler – Townsend-Lawine

- **Elektronenlawinen erzeugen Gasverstärkung bis Faktor $\sim 10^5$**
 - Lawinen entstehen nur in **engem Volumen** um Draht mit Feld: $E > E_{\min}$

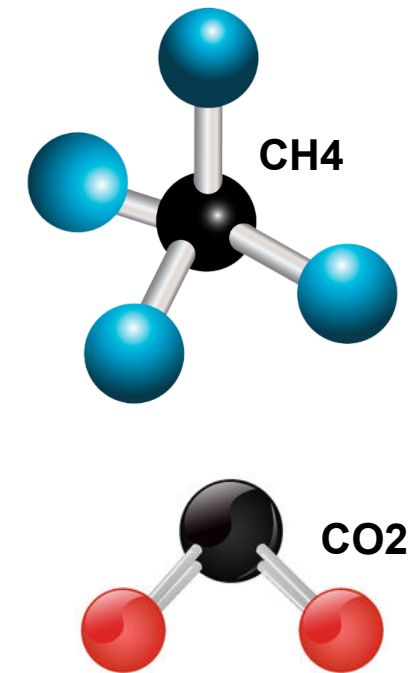
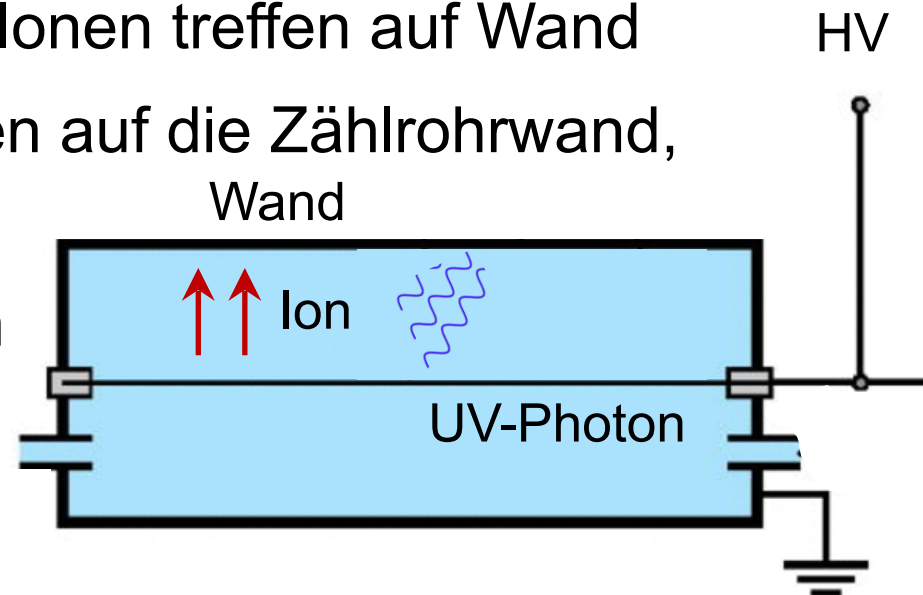


Q: wikipedia

Q: T. Hilden

Proportionalrohrzähler – Zusatz von Quenchgas

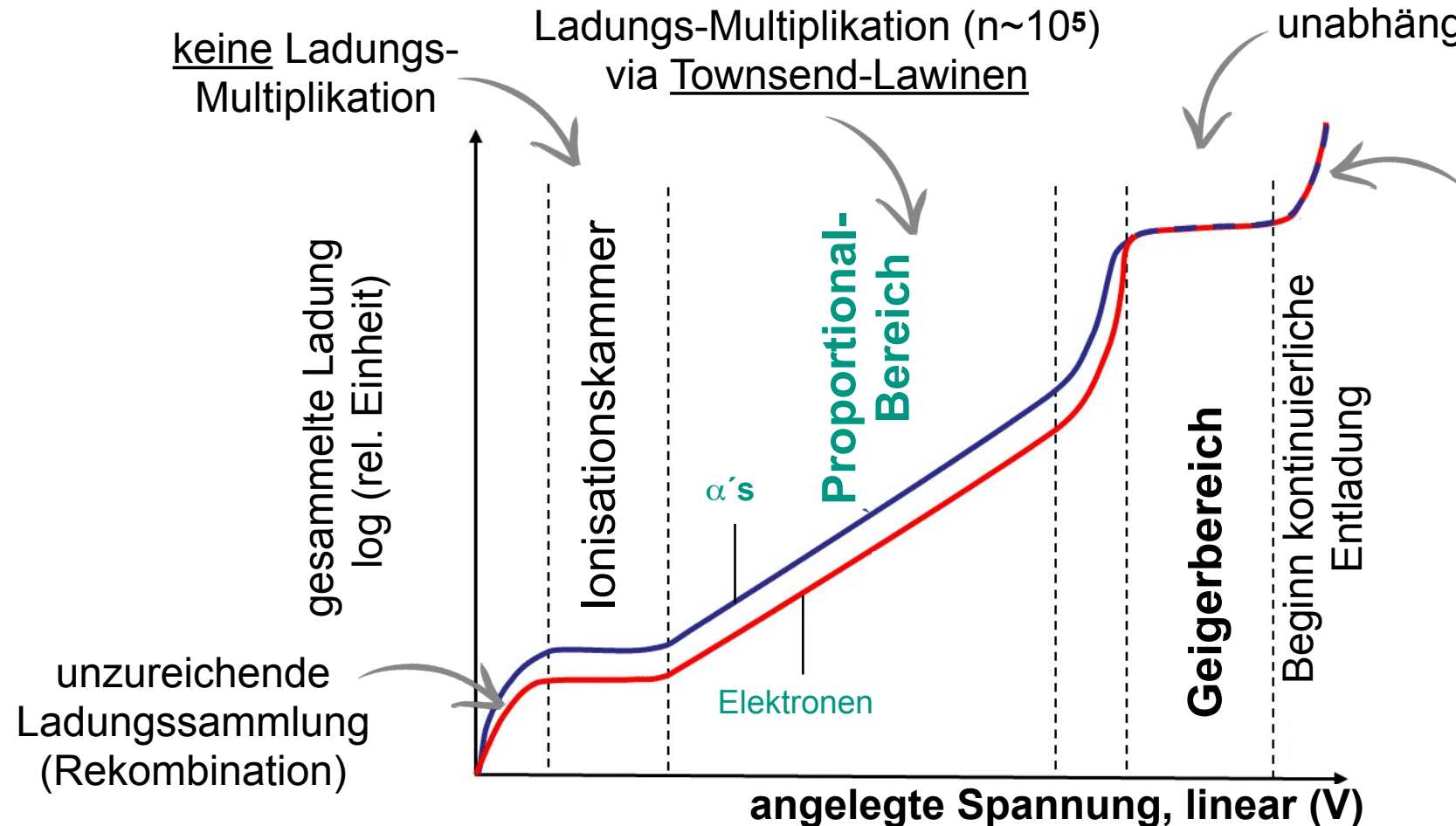
- **Zählrohrwand darf nicht Ausgangsort weiterer Lawinen sein!**
 - Rohr mit Draht auf HV, Zählgas: 90% Argon & 10% Methan (CH_4) oder CO_2
Löschgas (Quenchgas)
 - Zählgas wird nicht nur ionisiert sondern auch angeregt, UV-Photonen & Ionen treffen auf Wand
 - treffen Ionen / UV-Photonen auf die Zählrohrwand,
 - weitere Lawinen
 - CH_4 verhindert dass Ionen (UV-Photonen) auf die die Wände treffen,
 - „**Quenchen**“ weiterer Lawinenprozesse



Q: T. Hilden

Proportionalzähler - Betriebsmoden

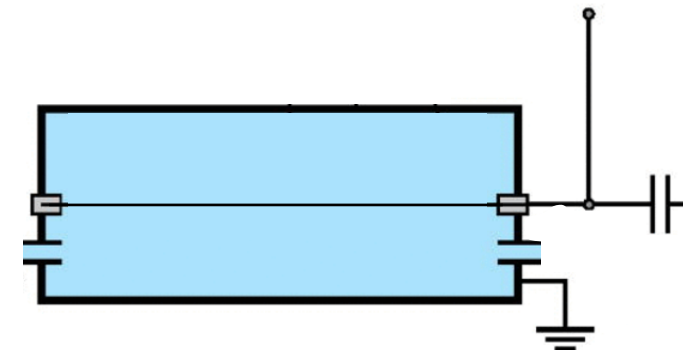
- **Charakteristik eines Zählrohres**



Gasentladung zündet
Gefahr der Zerstörung



HV

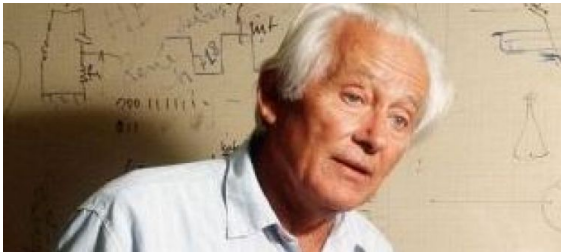


Q: nach wikipedia

Violdrahtkammern: parallele Anodendrähte auf HV

- **Multi-Wire Proportional Chamber – MWPC**

- Aufgabe: **Messung der räumlichen Koordinaten einer Teilchenspur**
- parallele Anodendrähte, $\varnothing = 100 \mu\text{m}$
- Erfinder: Georges Charpak (CERN)
ab 1968, ca. 10^6 mal schneller als
Blasenkommer

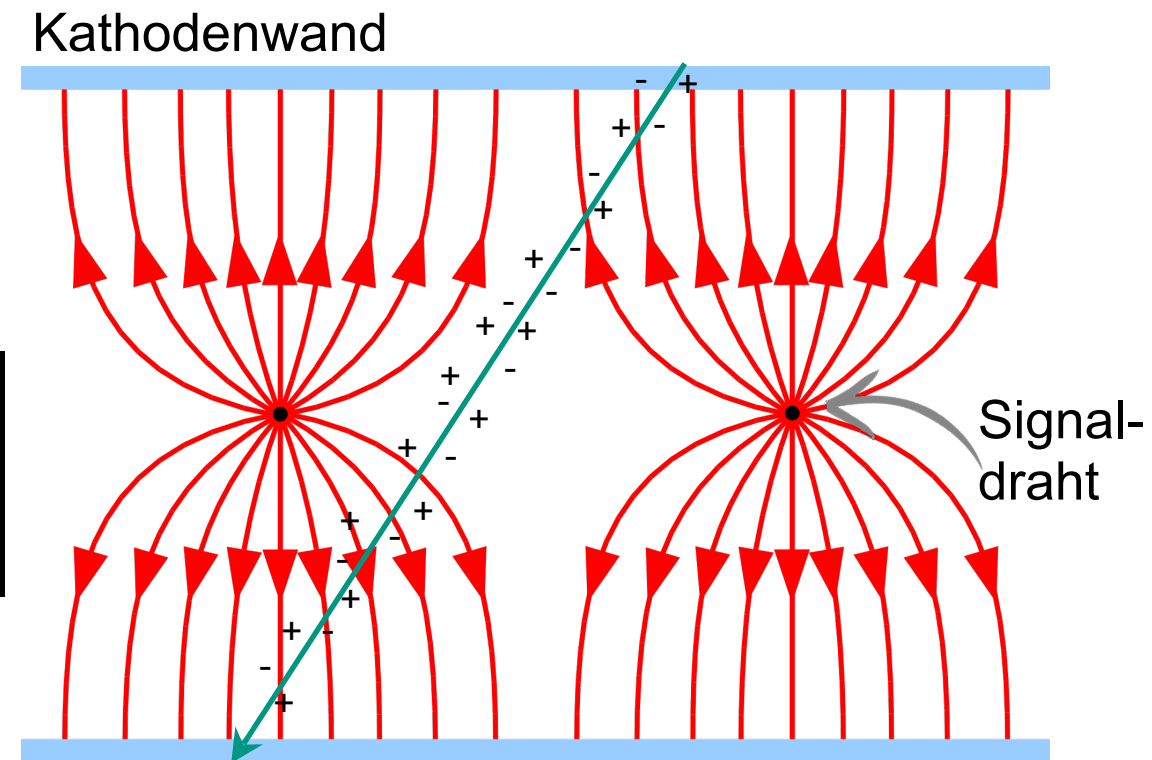


George Chapak

"for his invention and development of particle detectors,
in particular the multiwire proportional chamber."



Nobelpreis

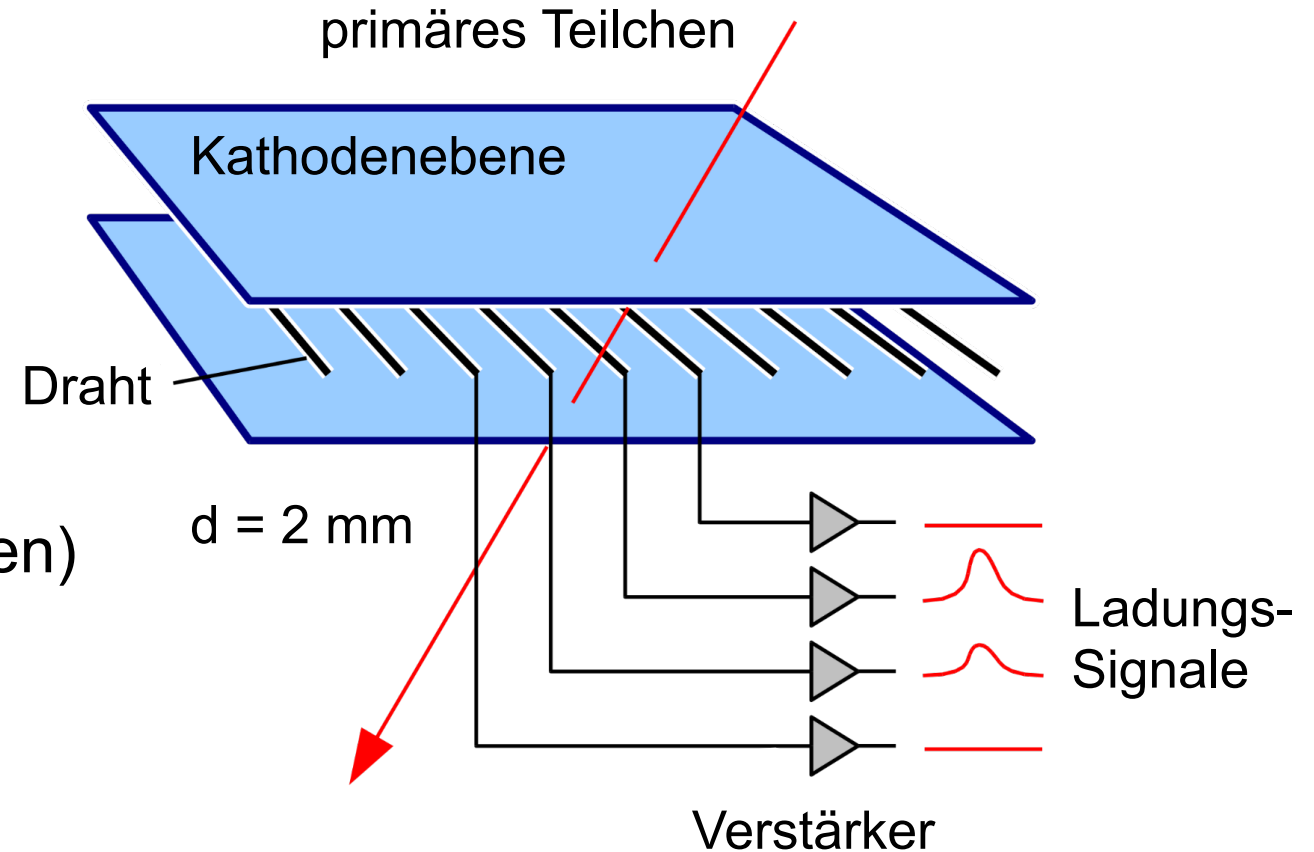


Q: nach wikipedia

Violdrahtkammern (MWPC)

- **Eigenschaften einer MWPC**

- jeder Anodendraht arbeitet als unabhängiger Proportionalzähler
- **Ortsauflösung:**
für Drahtabstand $d = 2 \text{ mm}$
 - $\sigma_x = 600 \text{ }\mu\text{m}$
(Gewichtung mit Ladungs-Signalen)
- **Zeitauflösung:**
schnelle Anodensignale
 - $t_{\text{rise}} \sim 0,1 \text{ ns}$

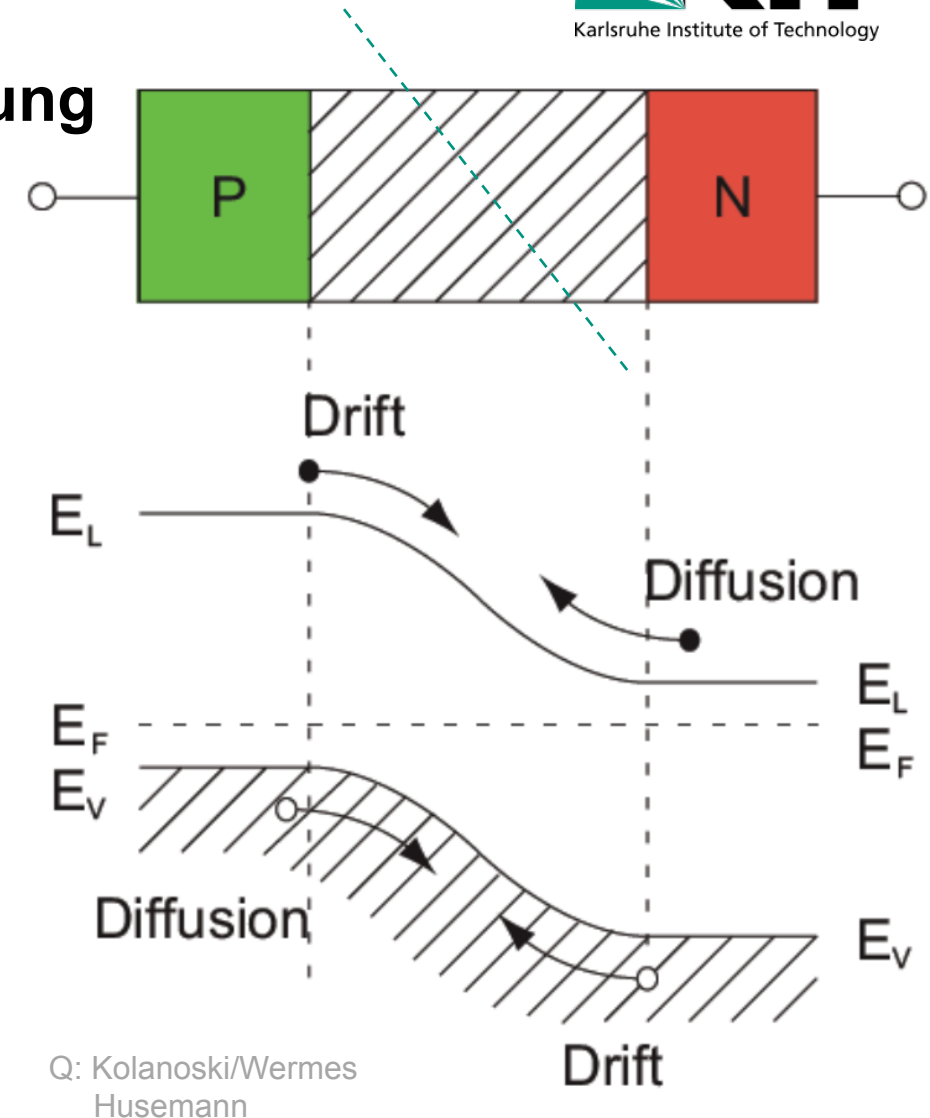


Q: wikipedia

Halbleiter-Detektoren zum Ortsnachweis

- **Halbleiter-Diode*** (p-n Übergang) in **Sperrrichtung**

- resultierende **Verarmungszone** frei von Ladungsträgern: Drift + Diffusion
- **Rekombination**
- Detektor mit umgekehrter Bias-Spannung (Minuspole an p-dotierten Bereich)
- Teilchendurchgang: **Elektron-Loch-Paare**
- **dünnere Si-Detektor**: Ortsmessung (Pixel)

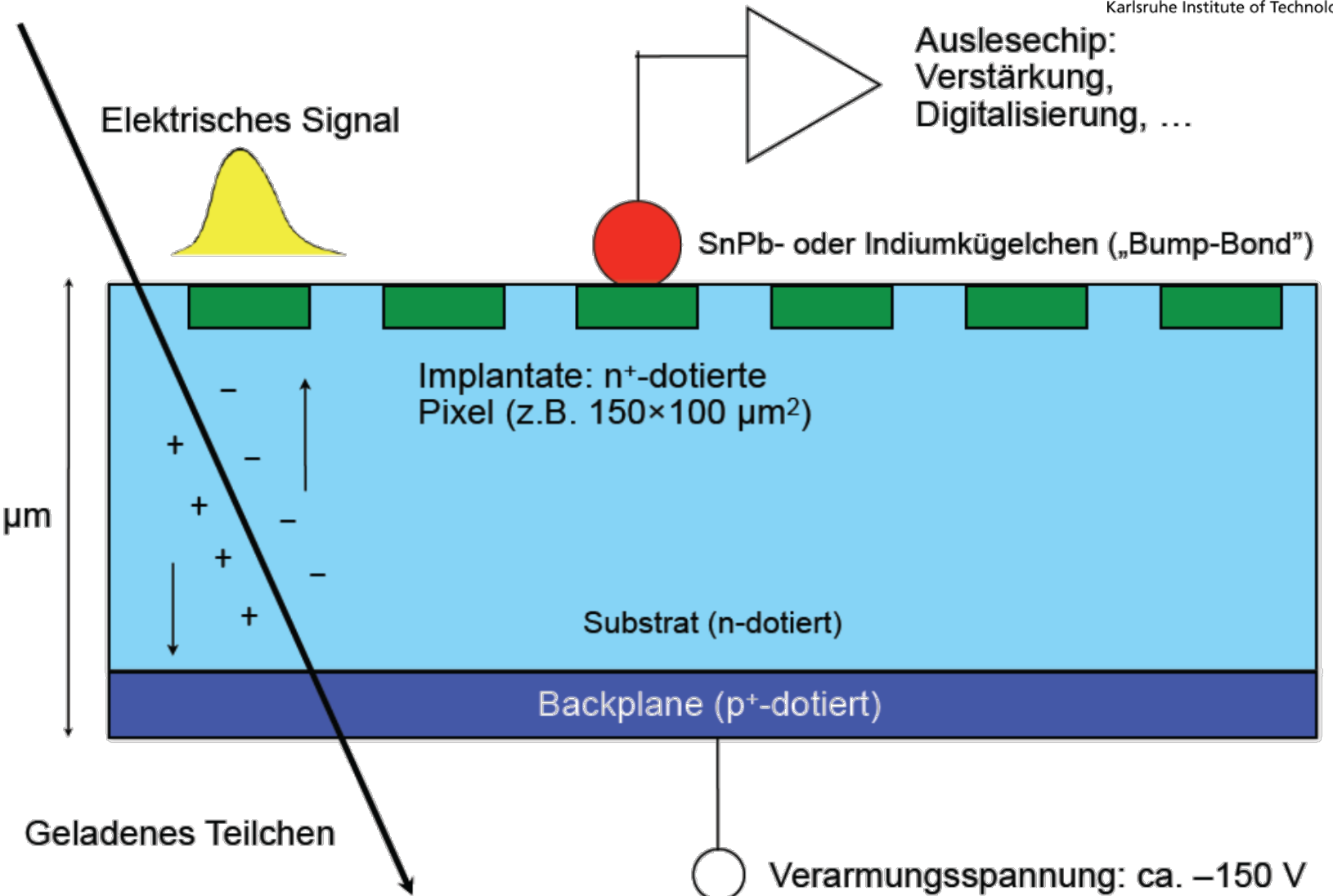


Beispiel: Silizium-Pixel-Detektor

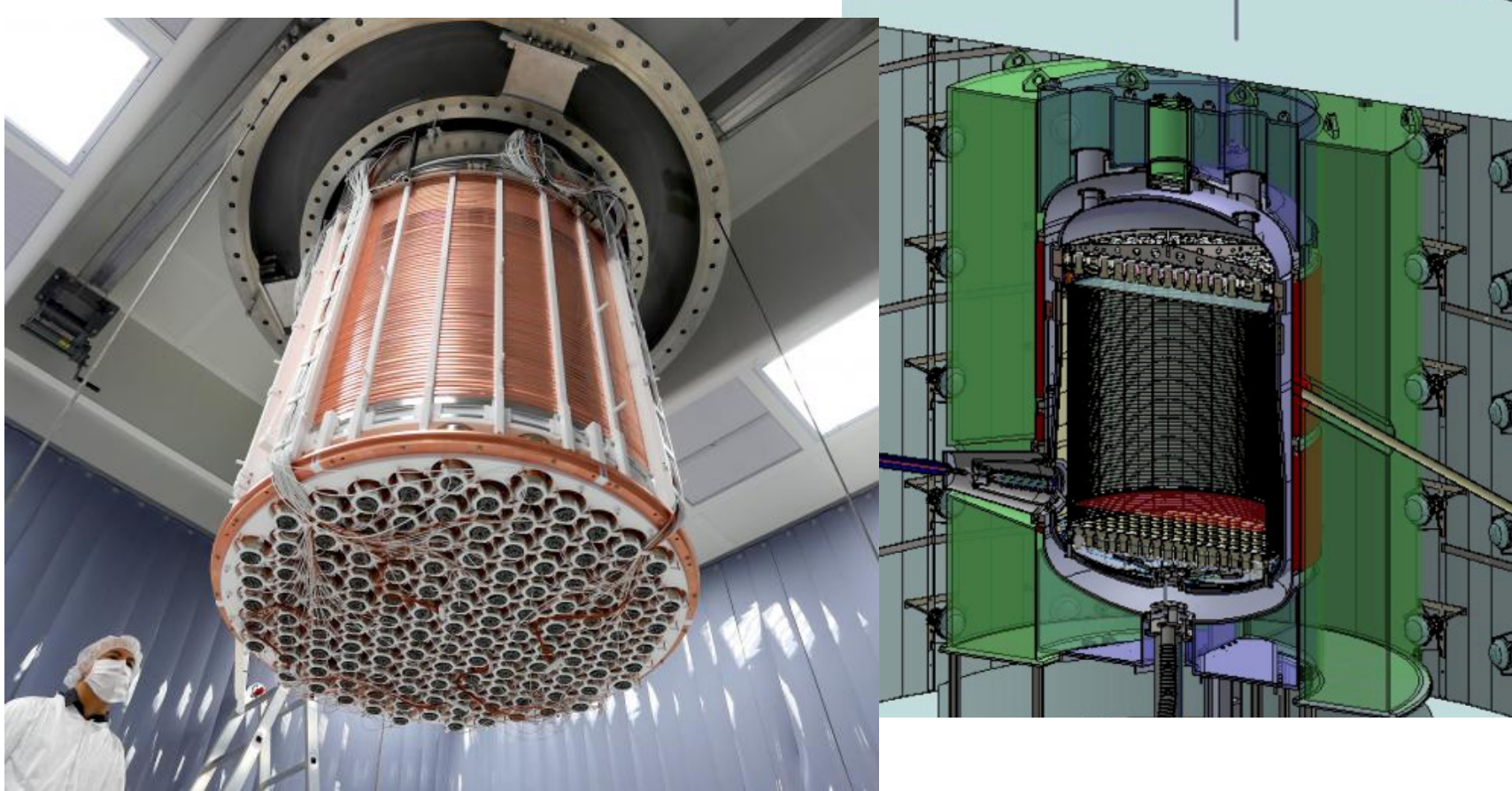
- **CMS Gruppe am KIT**

- 14 Lagen zur
Impulsbestimmung &
Vertexrekonstruktion

- Effizienz für Myonen
~ 100%



Q: U. Husemann



EINSCHUB: ZEITPROJEKTIONSKAMMERN

TIME PROJECTION CHAMBERS TPCs

Zeitprojektionskammern (TPCs)

- **Time Projection Chamber - TPC**

- Prinzip: Drift der Ladungsträger (Elektronen) in einem konstanten elektrischem Driftfeld E_D zwischen Anode und Kathode

- **typische Parameter:**

$$E_D \sim 0.5 - 1 \text{ kV/cm}$$

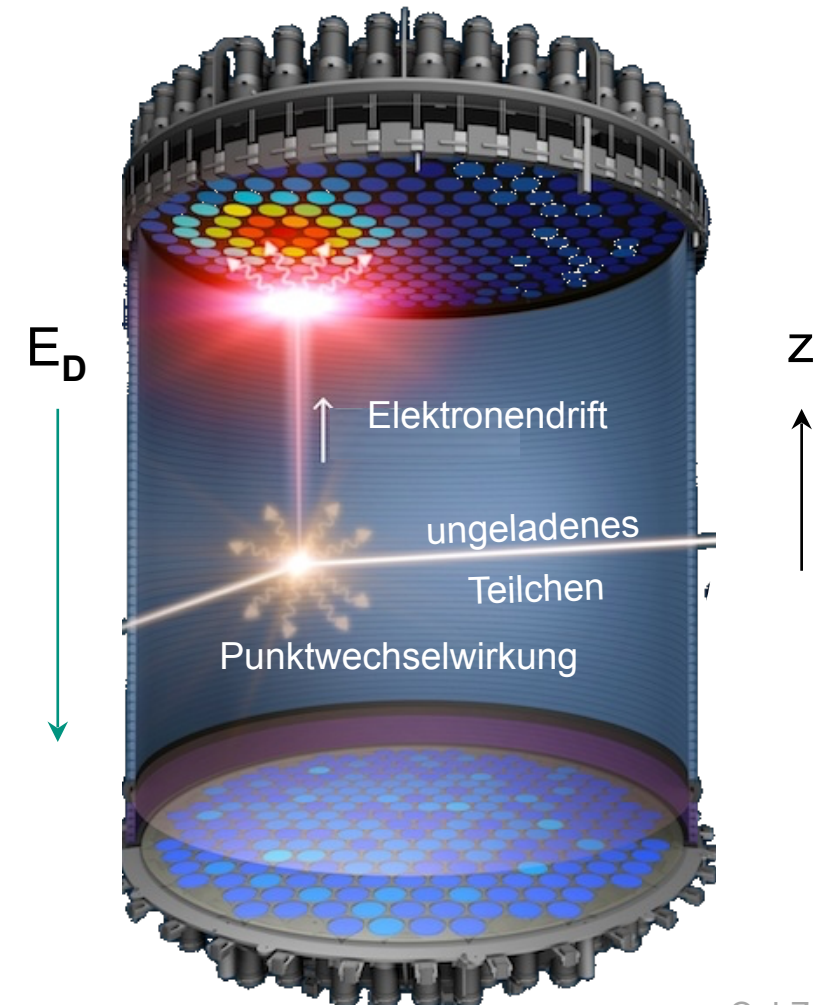
$$v_D \sim 1 - 4 \text{ cm} / \mu\text{s}$$

- **3D Abbildung der Wechselwirkung**

x,y Elektronen an segmentierter Elektrode

z Driftzeit t_D mit v_D ergibt z-Koordinate

TPC mit flüssig-Xe



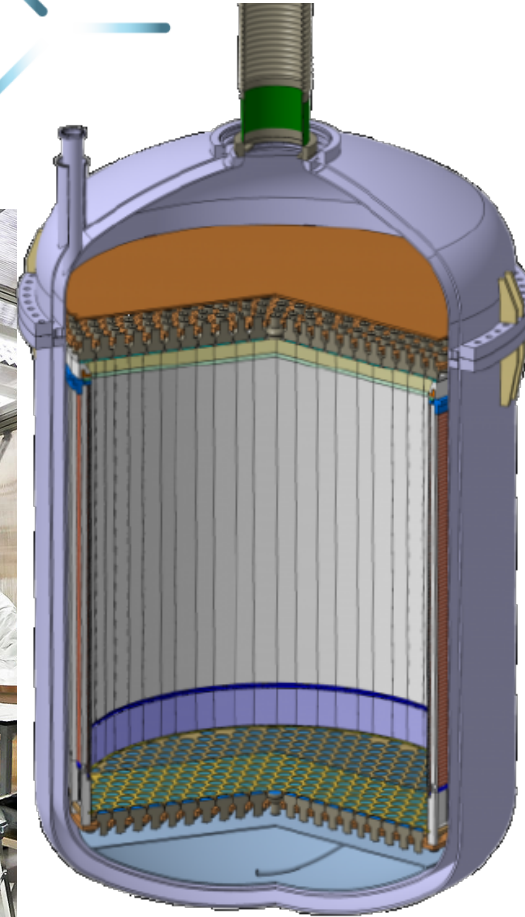
Q: LZ

Zeitprojektionskammern (TPCs)

- **Time Projection Chamber - TPC**
 - Detektormaterial: flüssiges Xenon
 - **Physikalisches Ziele:**
 - Suche nach Dunkler Materie
 - Physik jenseits des Standardmodells & neue Physik



DARWIN



Q: XENON, DARWIN

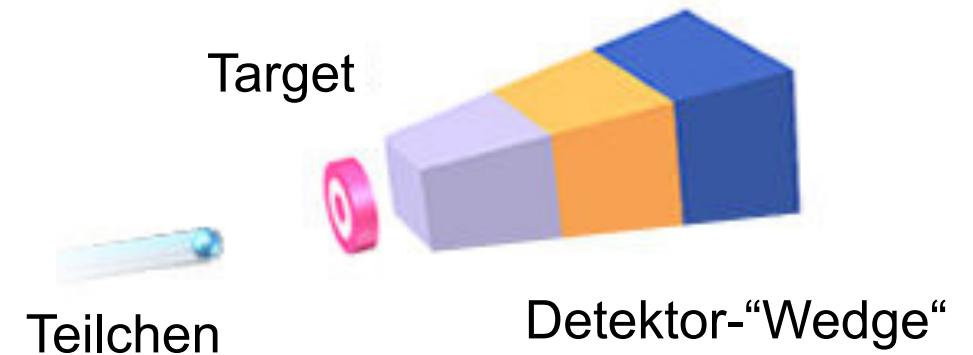
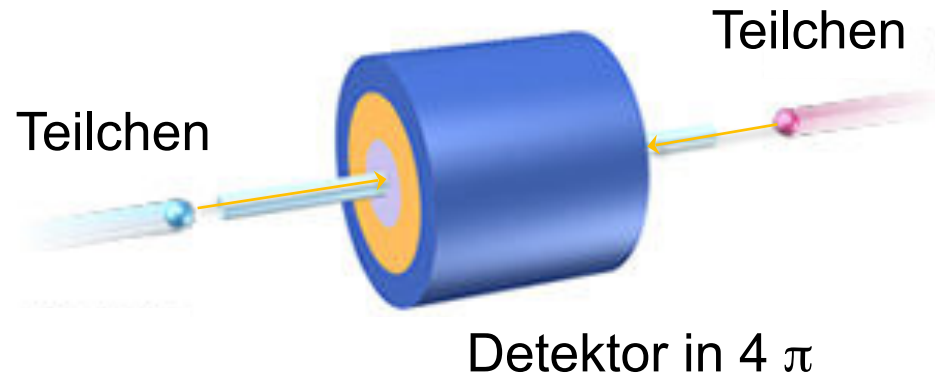
Q: CMS



KAPITEL 3.7 – DETEKTORSYSTEME IN DER TEILCHENPHYSIK

Detektorsysteme: Fixed-Target / Collider

- **Detektorsysteme sind an die Kinematik am Beschleuniger angepasst**



Collider-Experiment

kollidierende Teilchenstrahlen

Teilchennachweis in alle Richtungen

zylinderförmiger 4π Detektor

Fixed Target Experiment

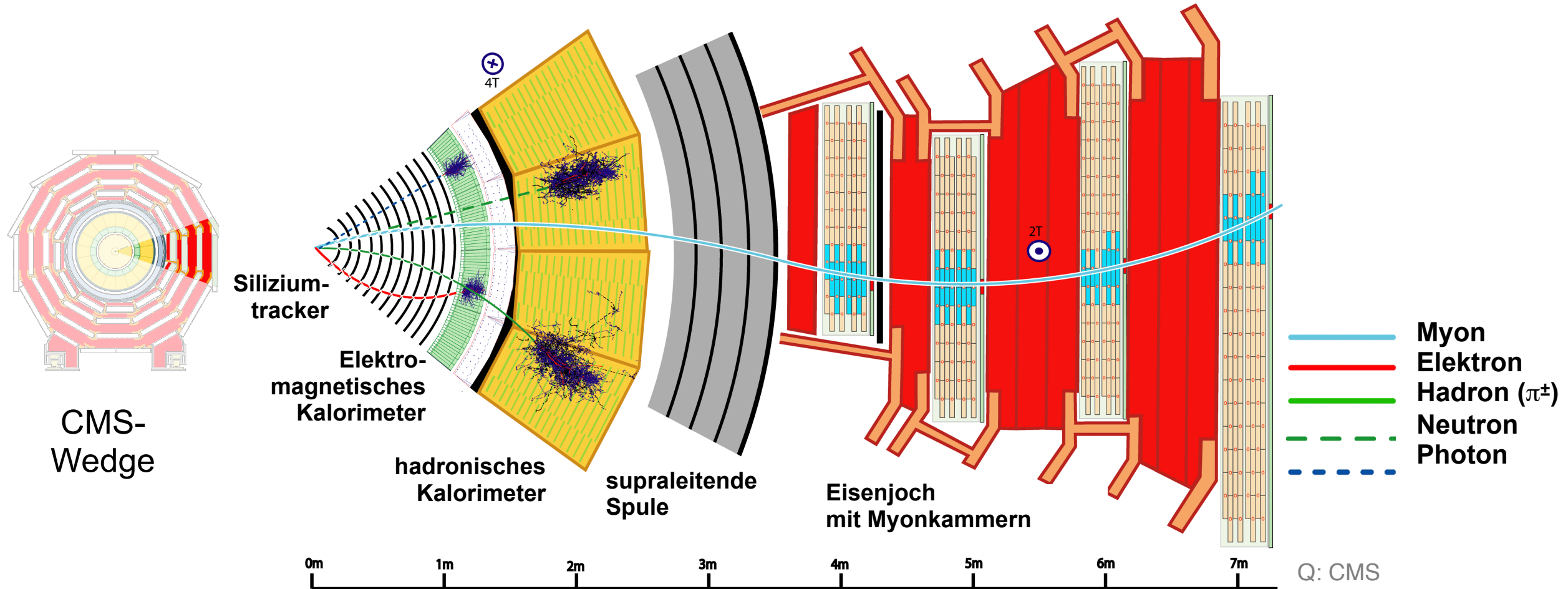
Teilchenstrahl trifft ruhendes Target

Teilchennachweis in Vorwärtsrichtung

Vorwärtsspektrometer

Aufbau eines Collider-Experiments: CMS

- **Aufgaben: Spurrekonstruktion (Impuls, Q), Energie, Ereignistopologie**

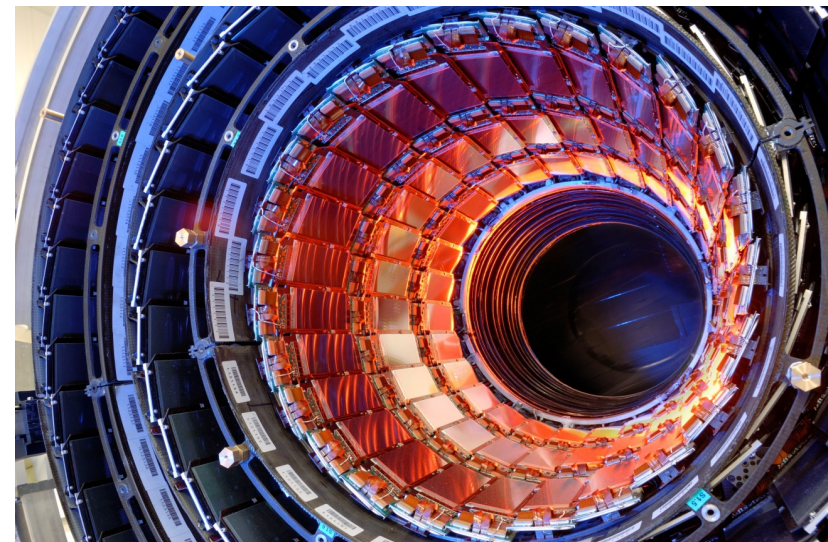
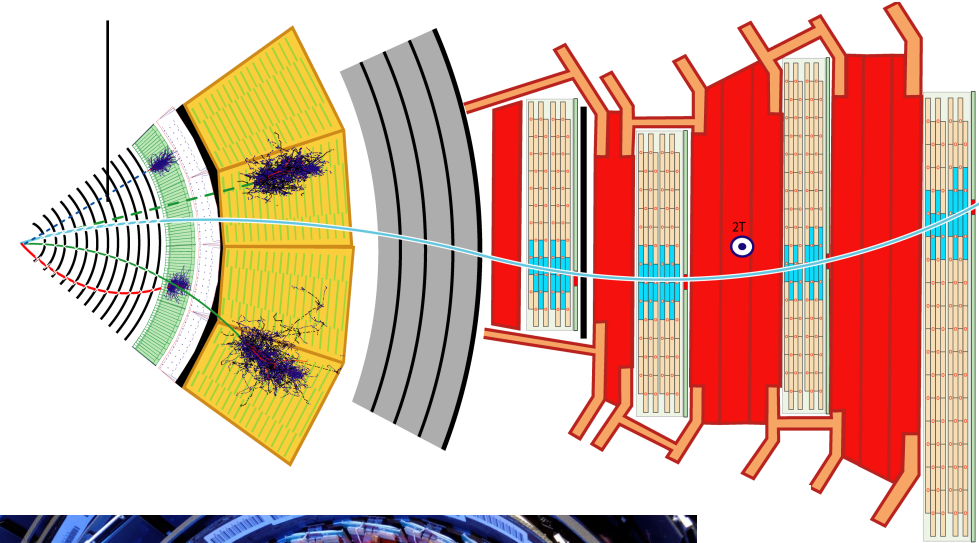


Inner Tracker: Spurrekonstruktion

- **Mehrlagiger Spurdetektor**

- Aufgabe: Rekonstruktion der Spuren von geladenen Teilchen nahe am primären Eventvertex
- Mustererkennung und χ^2 -Spurfit
- weltgrößter Si-Tracker $A = 206 \text{ m}^2$
- 125 Mio. Auslesekanäle **Si-Pixel**
2 D: $150 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$
- 10 Mio. Auslesekanäle **Si-Streifen**
1 D: $10 \text{ cm} \times 80 \mu\text{m}$

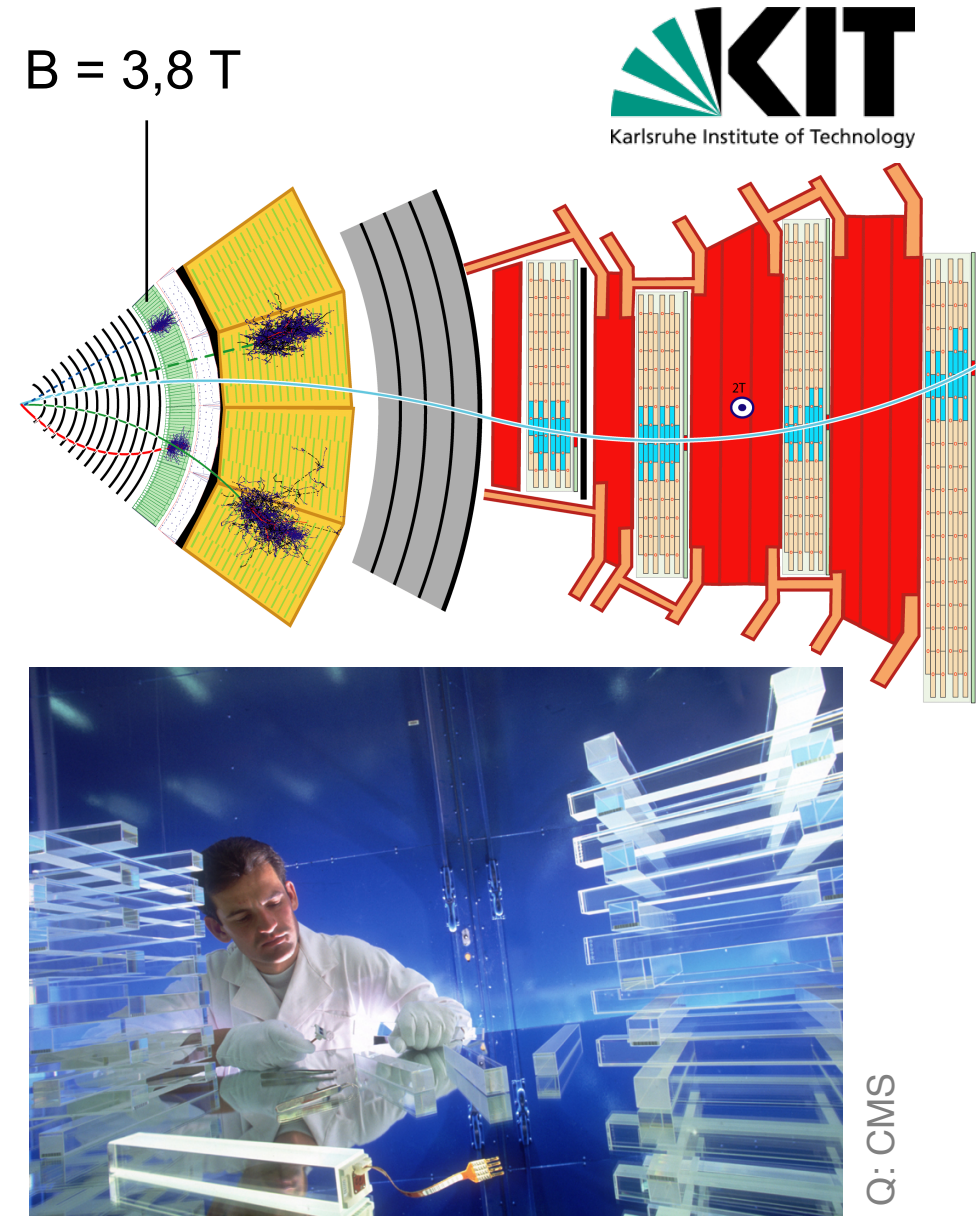
$B = 3,8 \text{ T}$



Q: CMS

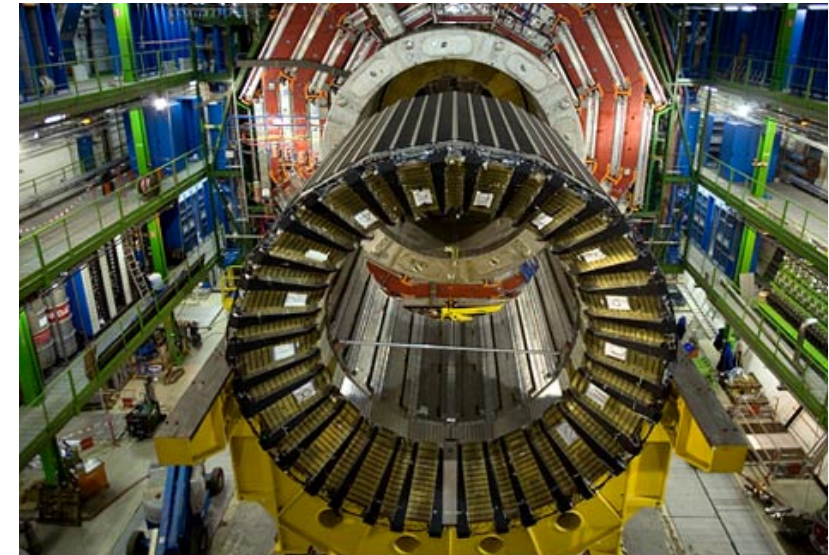
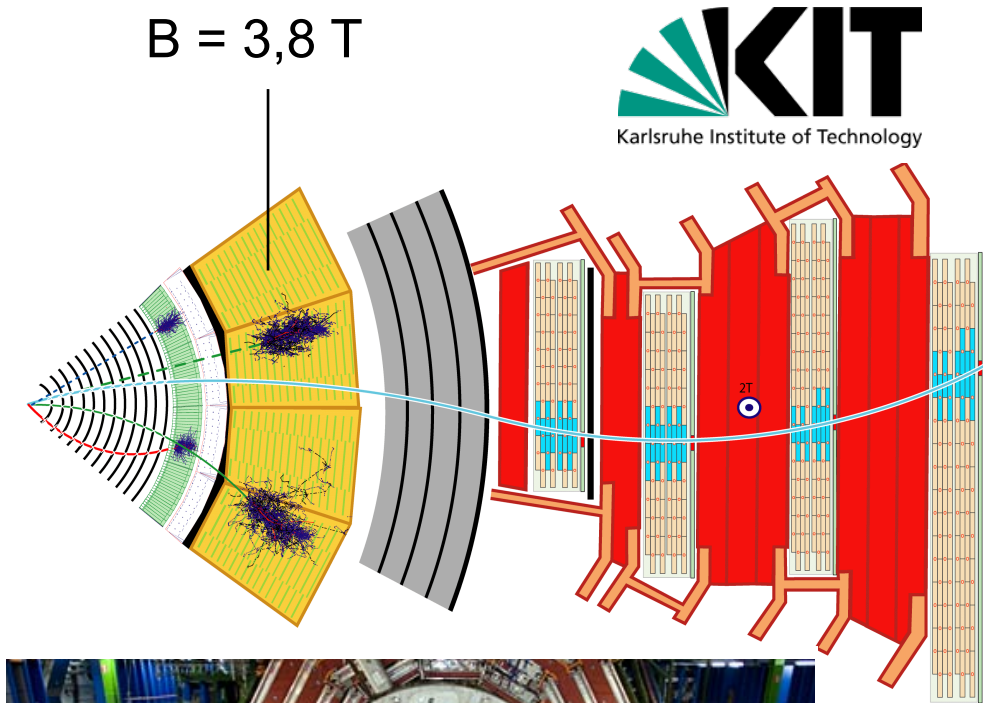
Elektromagnetisches Kalorimeter

- **ECAL = electromagnetic calorimeter**
 - **Aufgabe:** Bestimmung der elektromagnetischen Energie eines Ereignisses
Teilchen-Identifikation: e^- , e^+ , γ , π^0
 - **Aufbau:** kompaktes Kalorimeter innerhalb des Solenoiden (von $r = 1,1 \text{ m} \dots 1,77 \text{ m}$) mit hoher Dichte $\rho = 8,3 \text{ g / cm}^3$
 - 61200 PbWO_4 **Blei-Wolframat Kristalle**
 - kurze Strahlungslänge $X_0 = 0,89 \text{ cm}$
 - vollständige **Absorption** da **$25,8 X_0$**



Hadronisches Kalorimeter

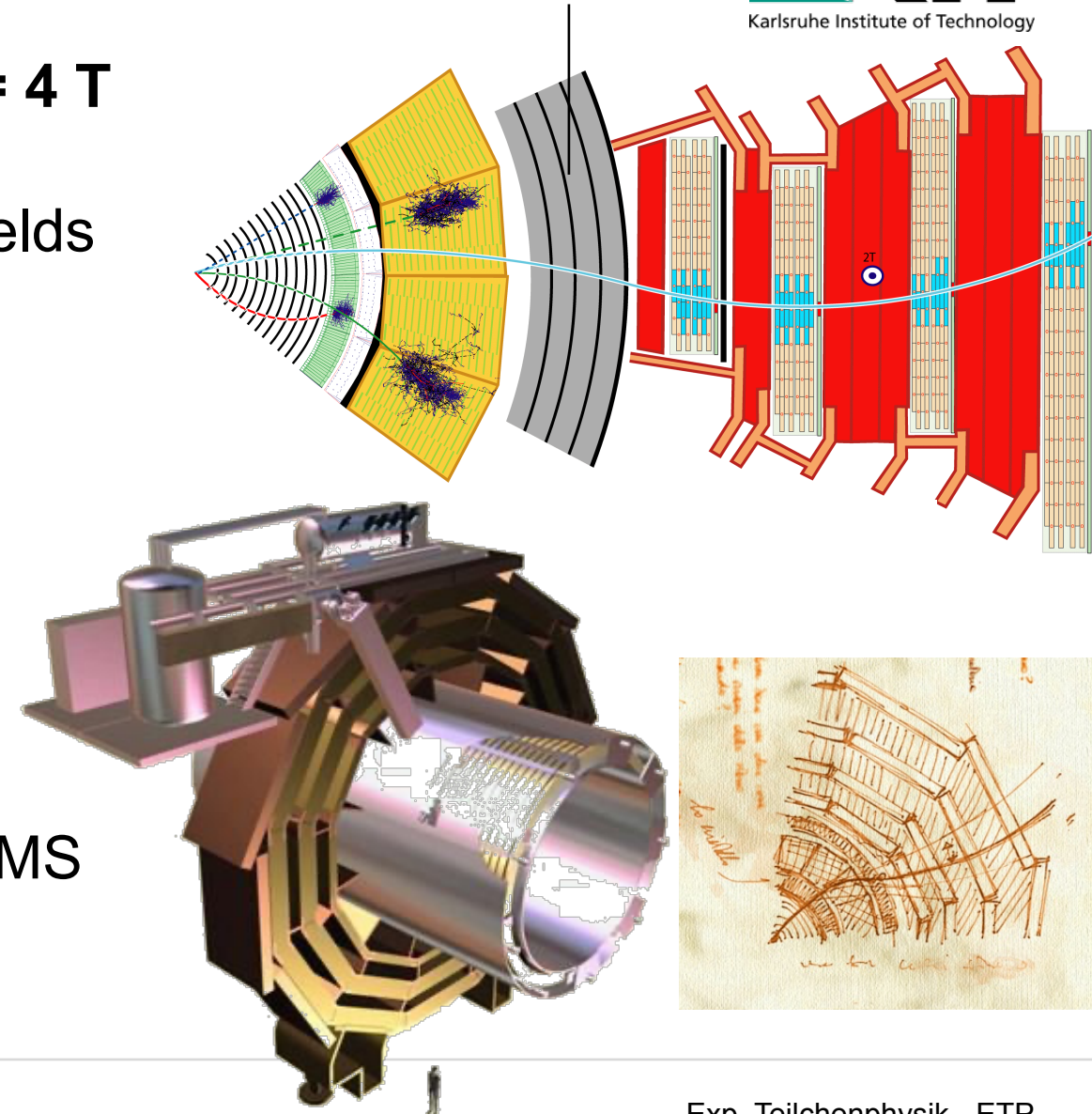
- **HCAL = hadronic calorimeter**
 - **Aufgabe:** Bestimmung der hadronischen Energie eines Ereignisses
Rekonstruktion von **Jets** (Hadronenbündel)
 - **Aufbau:** kompaktes Kalorimeter innerhalb des Solenoiden (von $r = 1,77 \text{ m} \dots 2,95 \text{ m}$)
 - **Sampling-Kalorimeter:**
alternierende Lagen eines passiven Absorbers (Messing) und eines aktiven Szintillators (Plastikszintillator mit Fasern)
 - hadronische Wechselwirkungslängen: **6 Λ**



Q: CMS

Supraleitender Solenoid

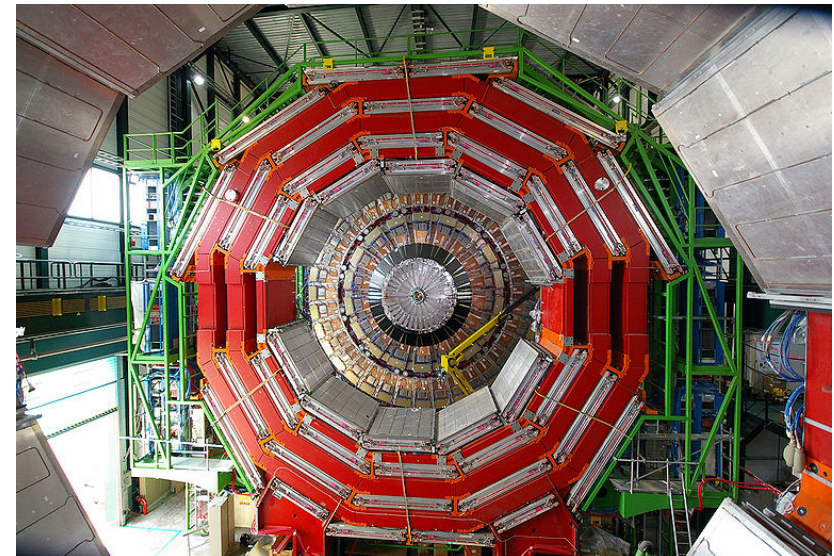
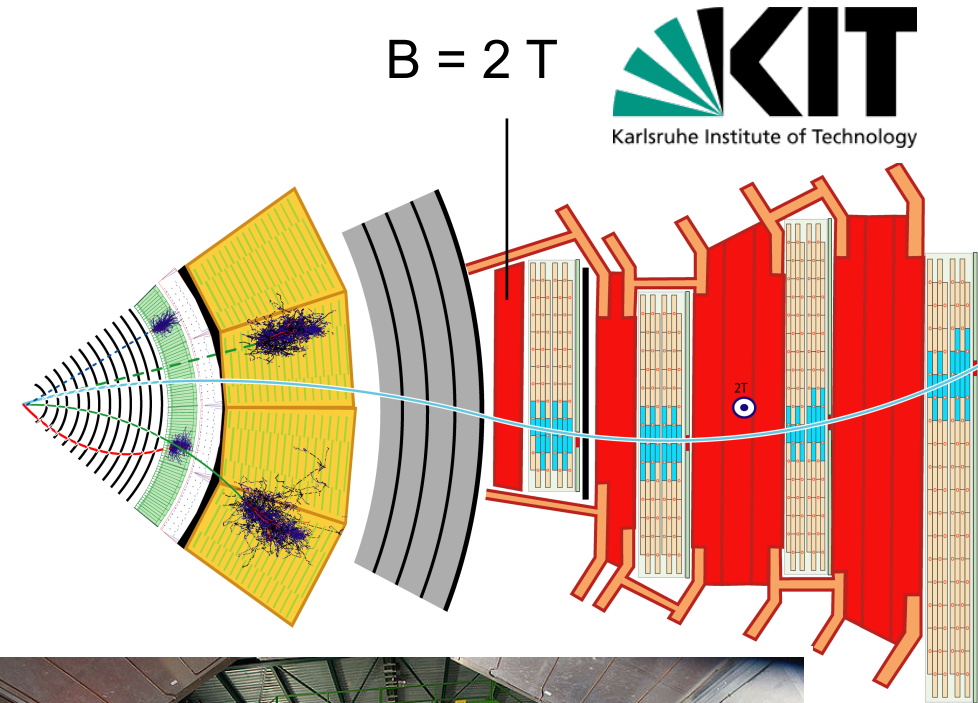
- **Weltgrößter Solenoid ($\varnothing = 6$ m) mit $B = 4$ T**
 - **Aufgabe:** Erzeugung eines axialen B-Felds mit 4 T bei $I = 19,5$ kA ($E_{\text{magn}} = 2,3$ GJ)
 - **Impulsauflösung** $\Delta p/p \sim 1/(B \cdot L^2)$
besser als 10% für 1 TeV Myonen
 - innen: $B \cdot L^2 = 36 \text{ Tm}^2$
 - außen: $B \cdot L^2 = 5 \text{ Tm}^2$
 - Kombination: s-förmige μ -Spuren in CMS

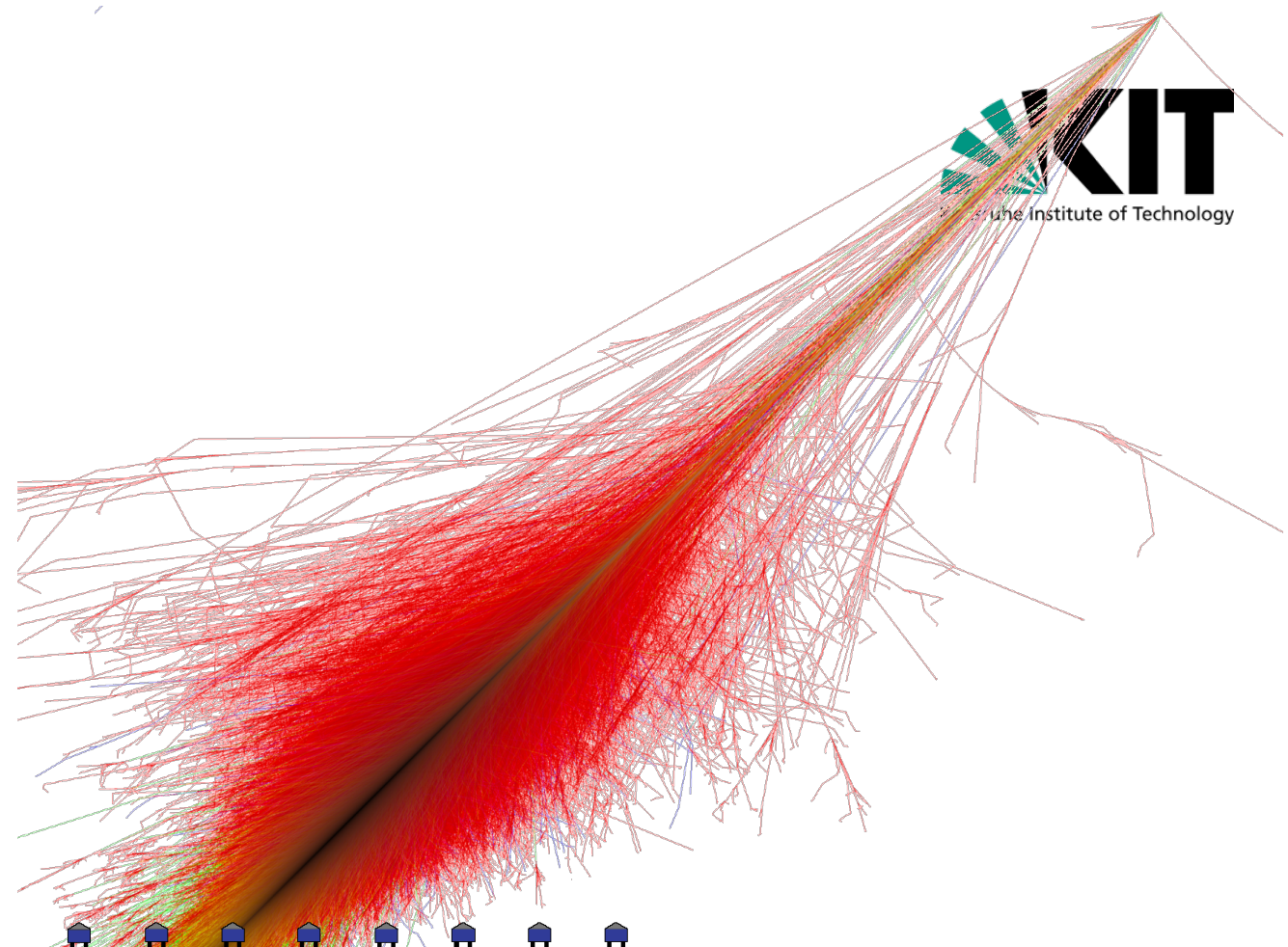
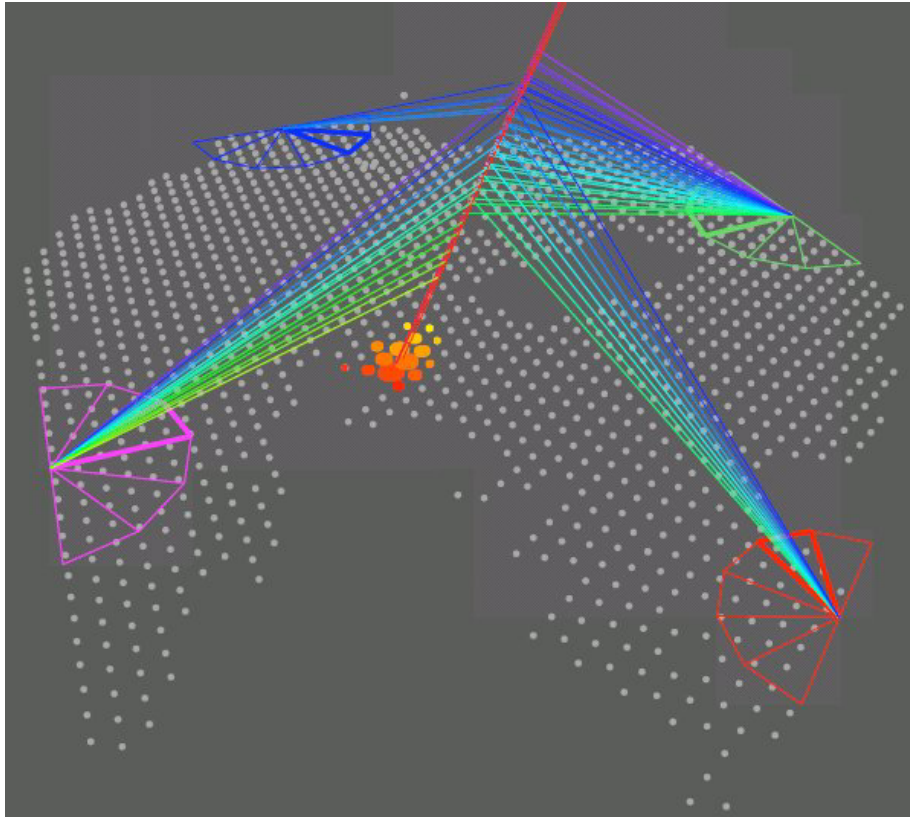


Myondetektor & Eisenjoch

- **Bestimmung von Myonen & Rückflussjoch**

- **Aufgabe:** Identifikation von Myonen und Bestimmung ihres Impulses, Rückführung des magnetischen Flusses, Abschirmung vordringender Hadronen
- **Aufbau:** 1400 Myonkammern im Rückflussjoch des Solenoiden ($B = 2\text{ T}$)
 - Myonkammern: gasgefüllte Systeme
 - **Myonen $> 100\text{ GeV}$ sind m.i.p.s** nur geringe Energiedeposition in ECAL und HCAL



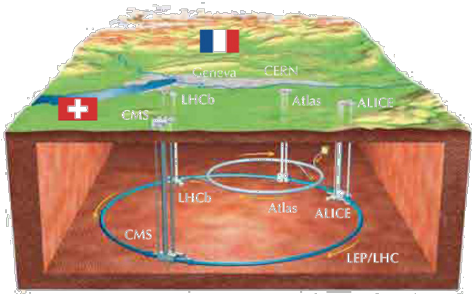


EINSCHUB: LUFTSCHAUER IN DER ATMOSPHÄRE

Q: PAO

Energiemessung durch Schauer

- **Schauer am LHC Collider und in der Atmosphäre**



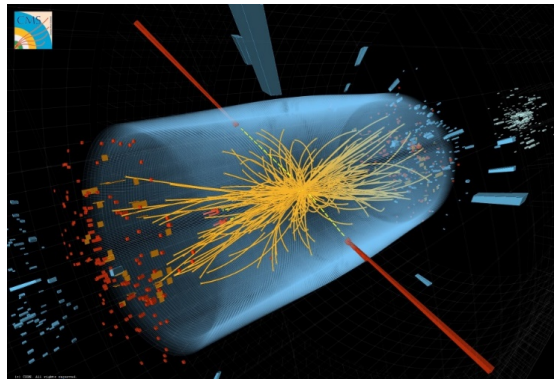
- **Beschleuniger:**
Protonen bis
7 TeV (exakt
bekannte Teilchen)

- **AGN-Beschleuniger:**
Protonen bis
 10^{20} eV oder Kerne
(Primärteilchen ist
unbekannt)



ECAL und HCAL

- Abdeckung in
 4π -Geometrie



Luftschauer in Atmosphäre

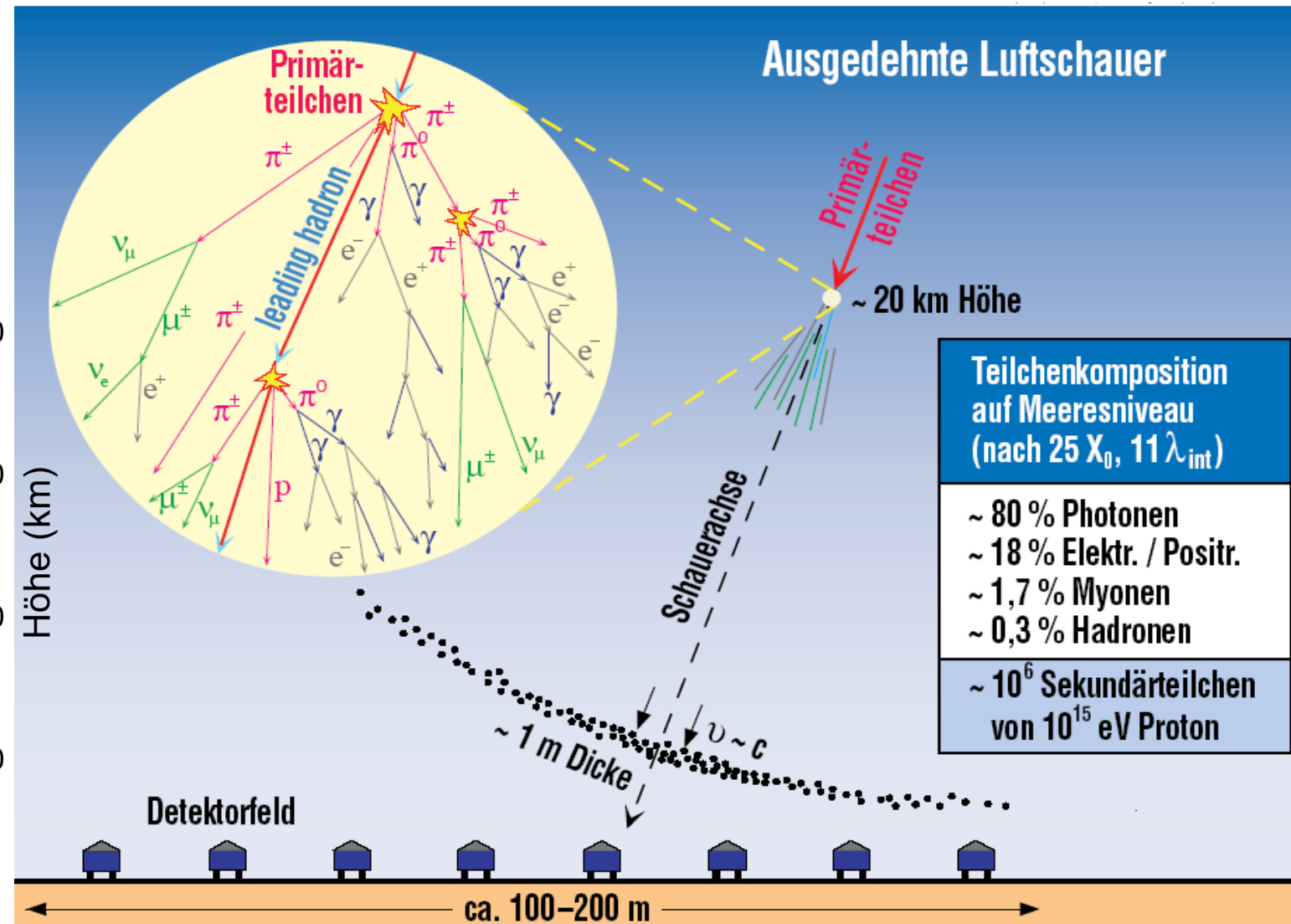
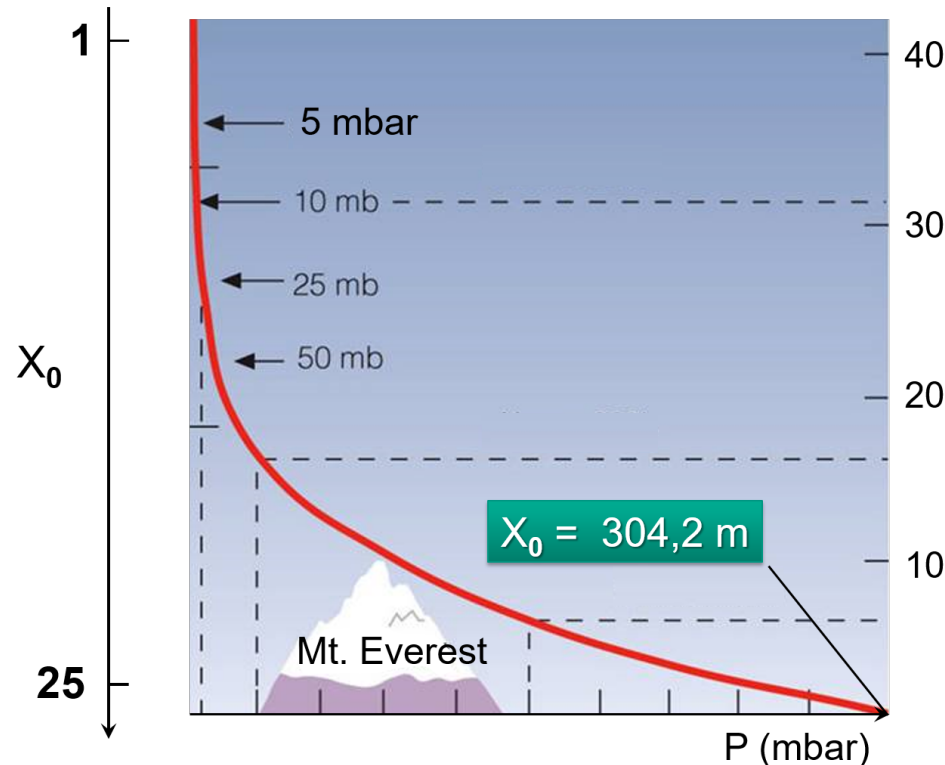
- Abdeckung nur
in enger
Vorwärtsrichtung



Q: CERN, NASA

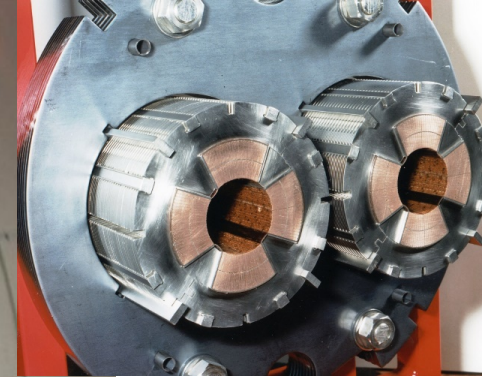
- Physik der Luftschauer

- Modellierung der sehr vielen Sekundärteilchen



... und dann gibt es Katzen





KAPITEL 3.8 – TEILCHENBESCHLEUNIGER

- **Grundlagen der Beschleunigertechnik**

$$\vec{F} L = q \cdot \left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right)$$

- **Beschleunigung** von geladenen Teilchen:
elektrisches Feld (parallel zur Bewegungsrichtung),
Energiegewinn nur abhängig von **Ladung q** des Teilchens
 - elektrostatisches Feld: Hochspannung
 - **HF**-Wechselfelder (**RF**: **R**adio **F**requency): linear oder ringförmig
- **Führung** von geladenen Teilchen:
magnetisches Dipolfeld (senkrecht zur Bewegungsrichtung),
kein Energiegewinn
Quadrupolfelder zur Strahlformung (kleiner Strahlquerschnitt)

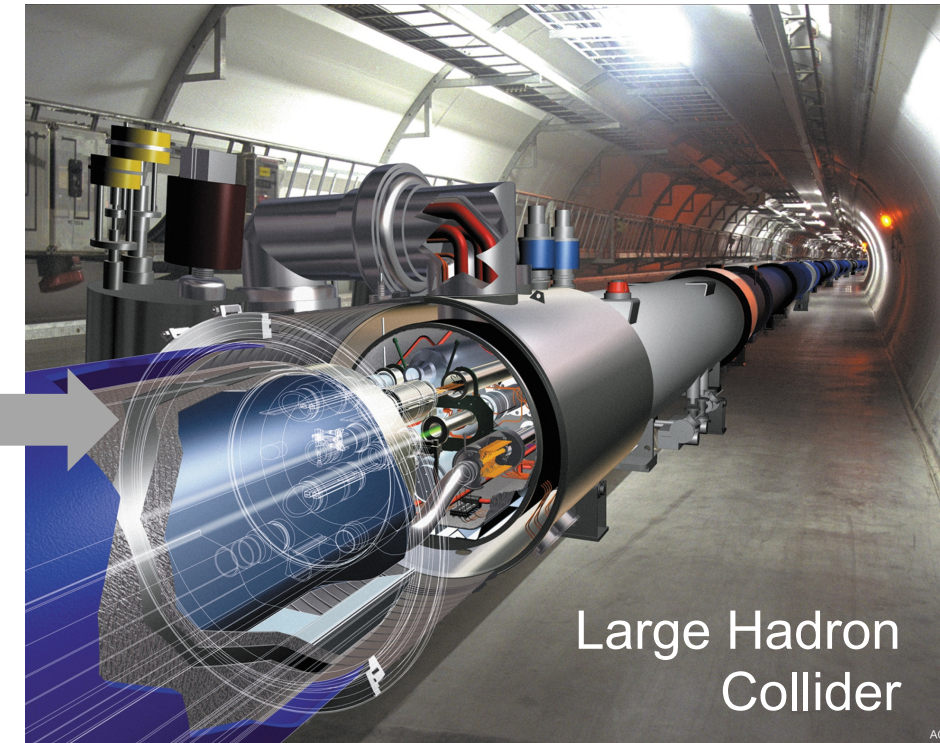
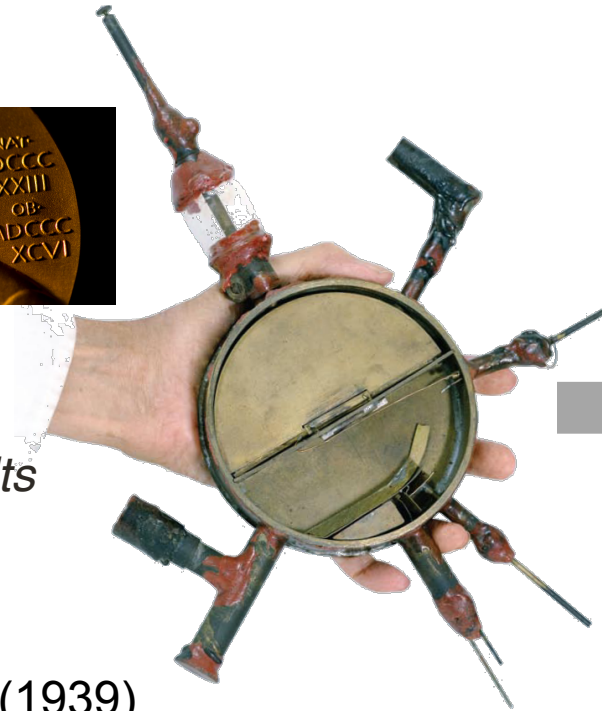
Beschleuniger – Historie

- **Fortschritt in der Beschleunigertechnologie: Faktor $\sim 10^8$ in 85 Jahren**
 - 1930: E.O. Lawrence baut das erste Zyklotron $\varnothing = 13 \text{ cm}$ mit $E_p = 80 \text{ keV}$
 - 2015: CERN erreicht nach Upgrade des LHC $\varnothing = 8,5 \text{ km}$ ein $E_p = 6,5 \text{ TeV}$



*for the invention and
development of the
cyclotron and for results
obtained with it*

Ernest O. Lawrence
Lawrence Berkeley National Laboratory (1939)

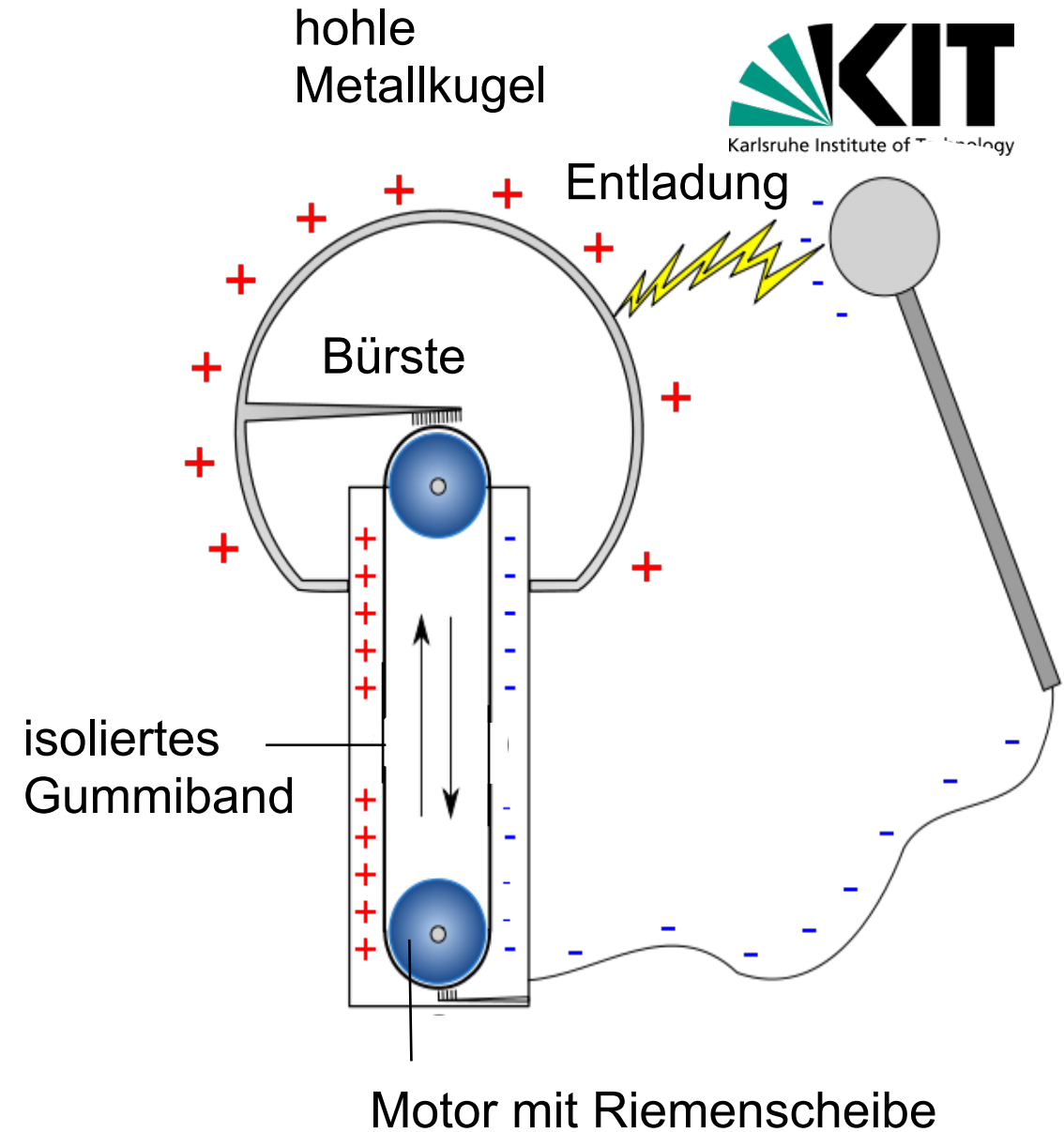


Large Hadron
Collider

Elektrostatische Generatoren

- **Van-de-Graaf- (Band-) Generator**

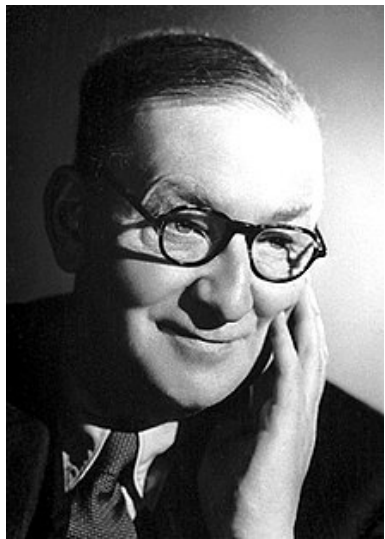
- Elektrostatisches Prinzip
- Aufladung des Bandes durch Reibung oder Aufsprühen:
mechanischer Transport von Q
- Bürste „streift“ Ladungen ab & überträgt sie auf Metallkugel
- Kugelinneres = Faraday'scher Käfig
Ladungen an Kugelaußenfläche, ab
 $\sim 12 \text{ MeV}$ elektrostatische Entladungen



Elektrostatische Generatoren

- **Cockcroft-Walton - Generator**

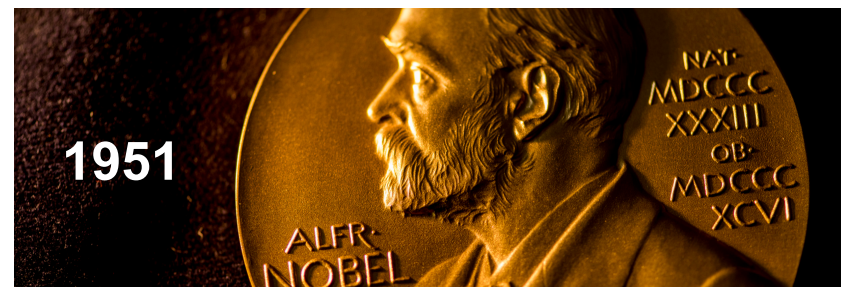
- Prinzip der Spannungsvervielfachung mit Dioden & Kapazitäten
(Hochspannungskaskade, nach H. Greinacher)



J. Cockcroft

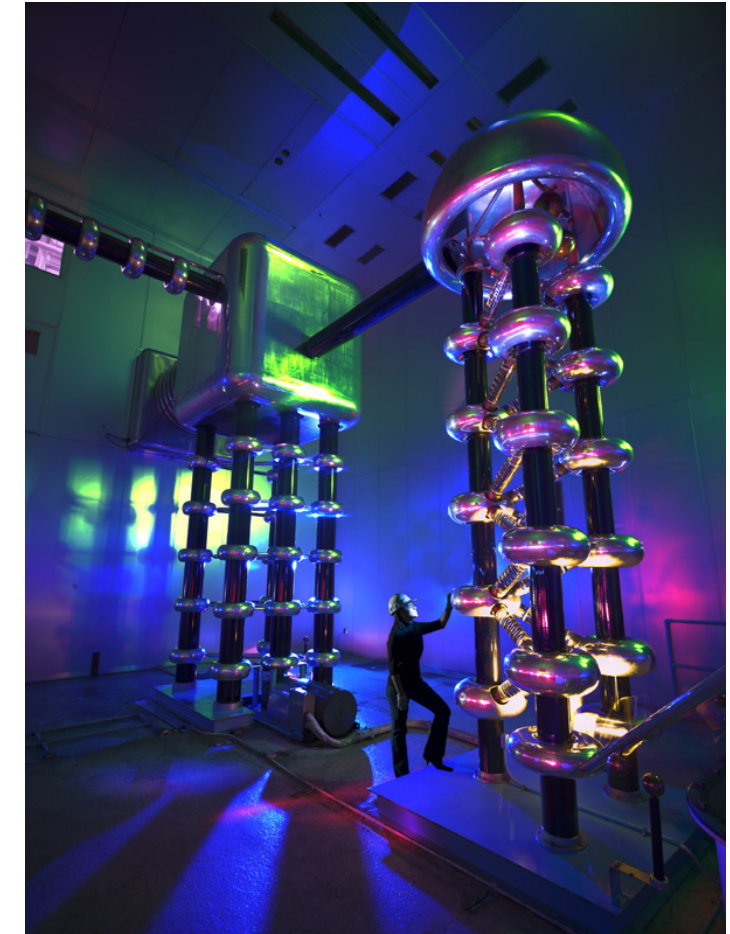


E. Walton



"for their pioneer work on the transmutation of atomic nuclei by artificially accelerated atomic particles."

Q: Fermilab



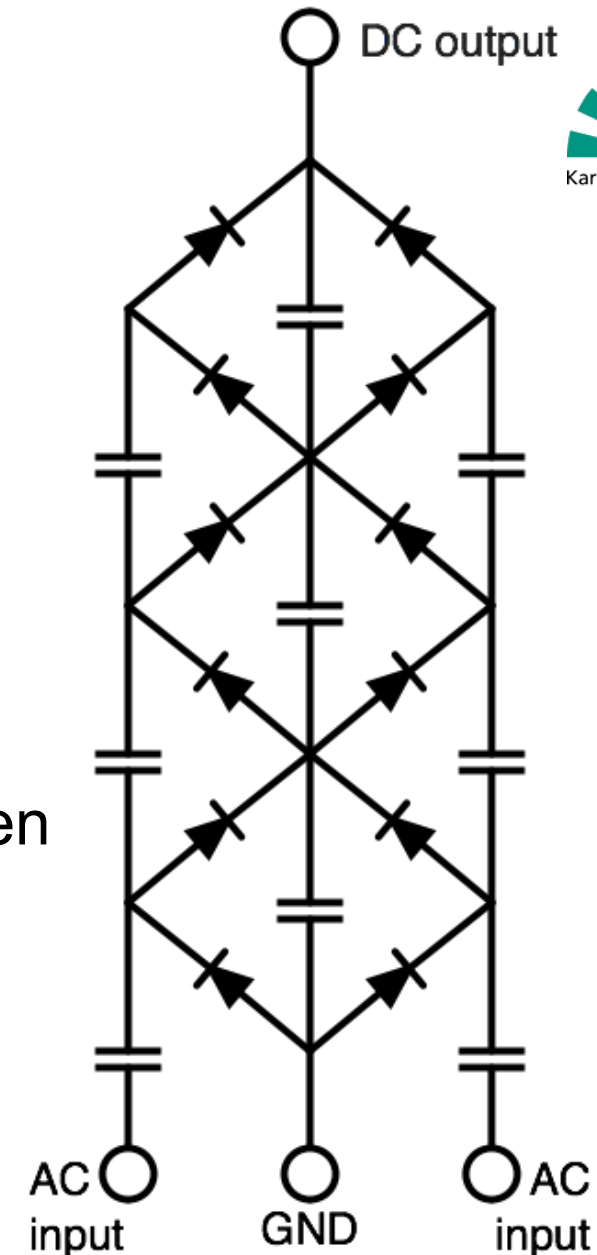
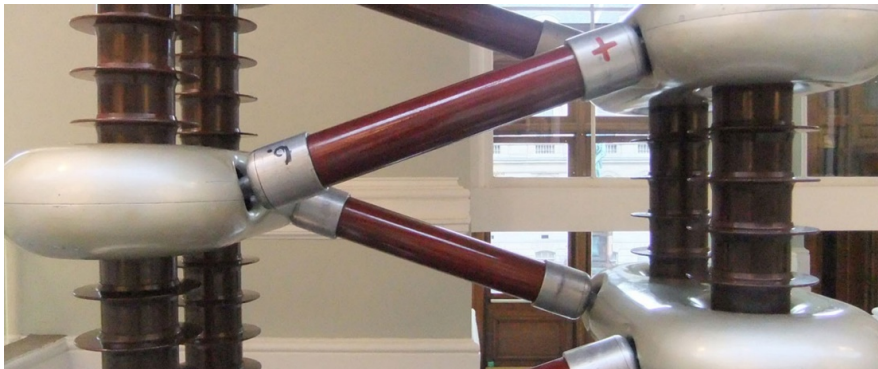
früherer CW am Fermilab

Elektrostatische Generatoren

- **Cockcroft-Walton - Generator**

- **Spannungsvervielfältiger** auf Basis von Dioden (Gleichrichtung) & Kondensatoren
- DC Ausgangssignal bis **1 MV**, limitiert durch elektrostatische Entladungen
- CW's dienen (teilweise noch heute) als Injektoren

Q: nms.ac.uk

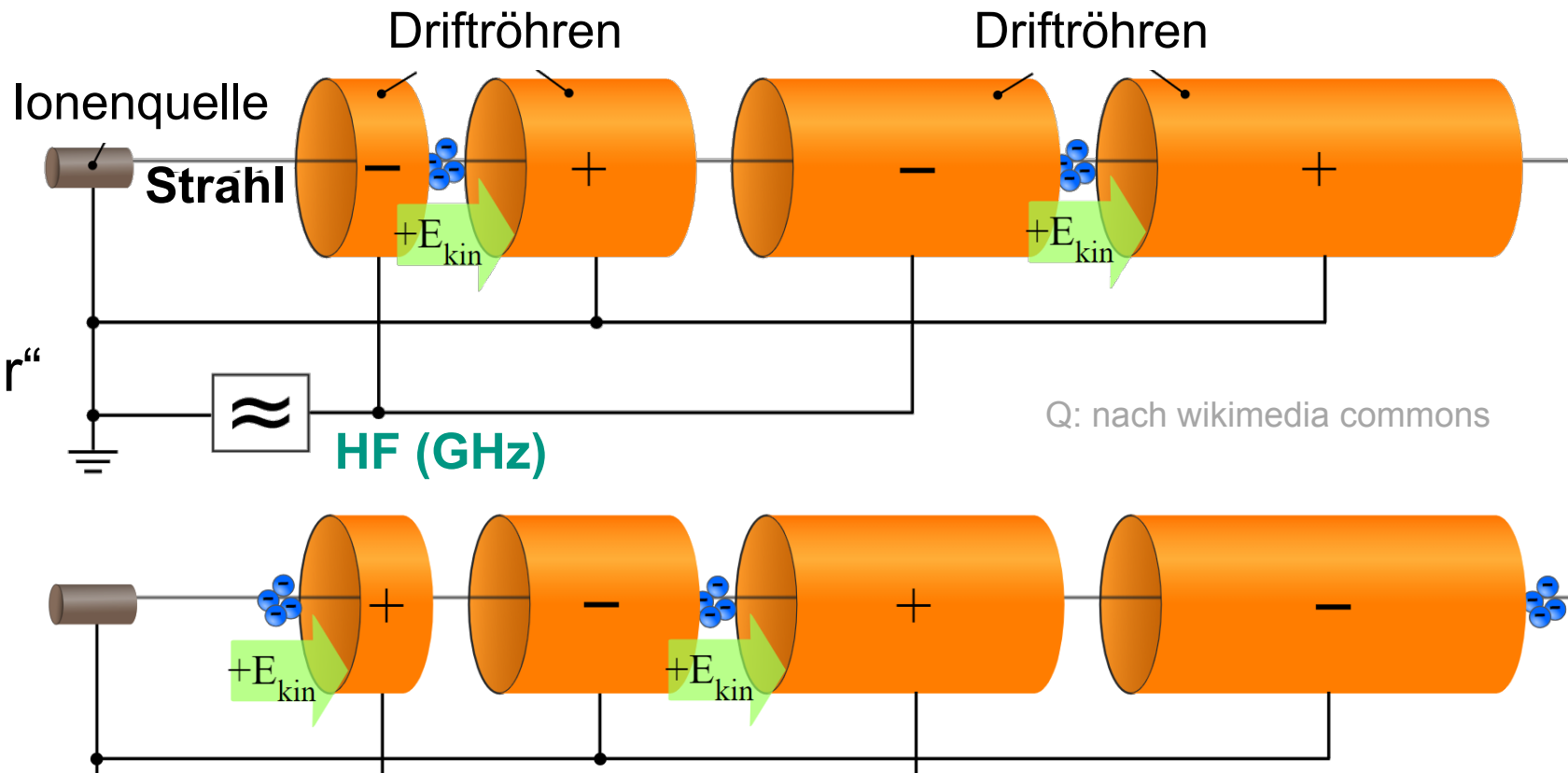


Q: wikipedia

Linearbeschleuniger – (LINAC = linear accelerator)

- **HF-Wechselfelder** hoher Frequenz (0,1- einige GHz) erlauben mehrfache Nutzung der Beschleunigungs-Spannung

- **LINAC** Prinzip nach R. Wideröe
- **Beschleunigung** in den Gaps zwischen Driftröhren bei „richtiger“ HF-Polung
- **Abschirmung** in Driftröhren während „falscher“ HF-Polung



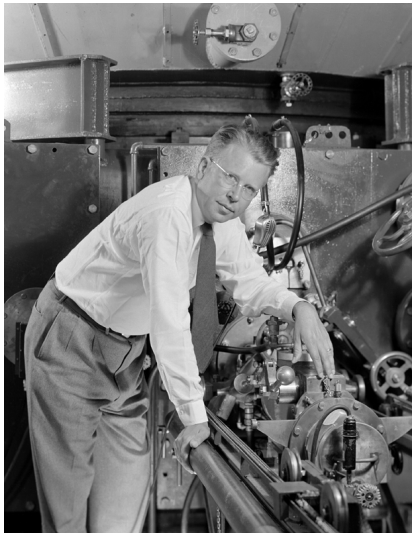
Zyklotron – der erste Ringbeschleuniger

- **Aufbau & Prinzip:** geladenes Teilchen wird in der Mitte des Zyklotrons injiziert

Ablenkung: im homogenen B-Feld - Teilchen auf Spiralbahn

Beschleunigung: im **Gap** der D-förmigen Elektroden (DEEs)

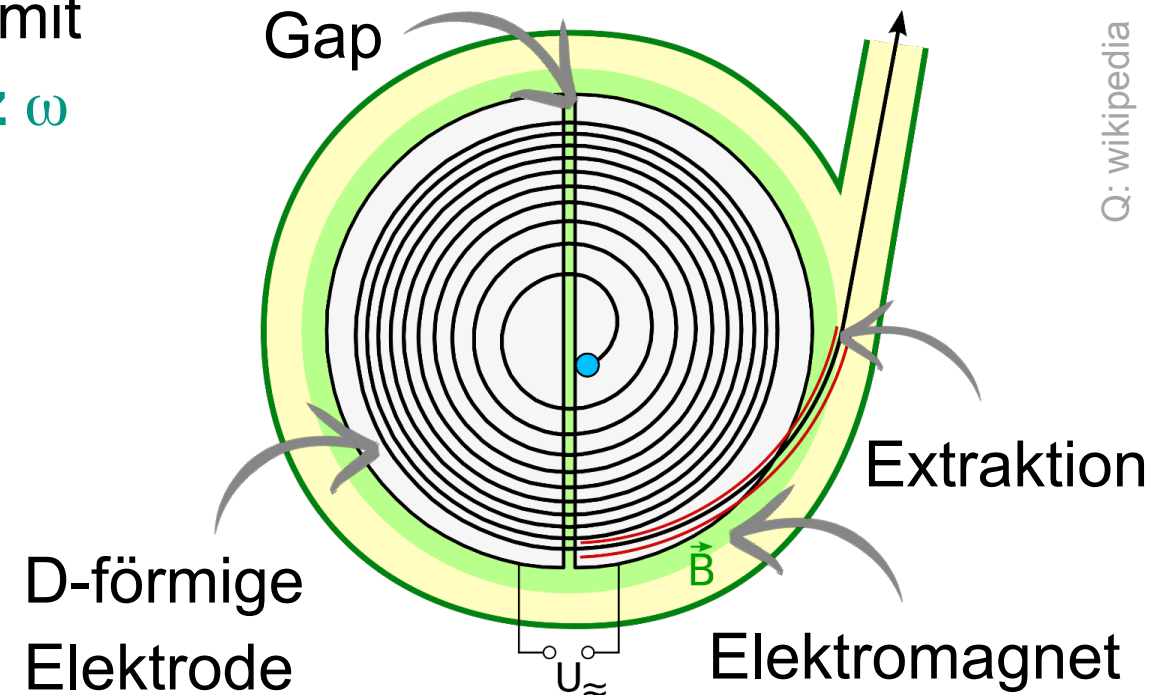
Amplitude & Frequenz: U (10-1000 kV) mit
fester Zyklotron-Frequenz ω



Ernest O. Lawrence

$$\omega = \frac{q}{m} \cdot B$$

ω unabhängig von
Radius r, Impuls $m \cdot v$

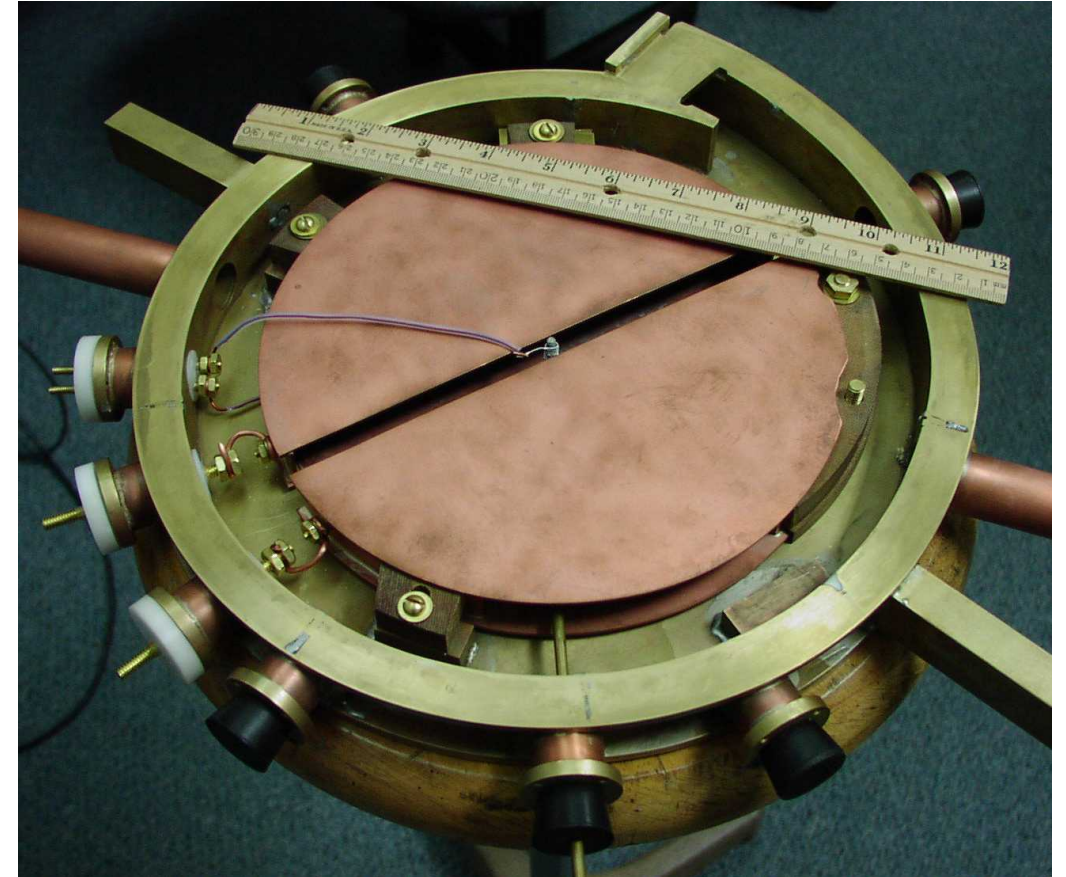
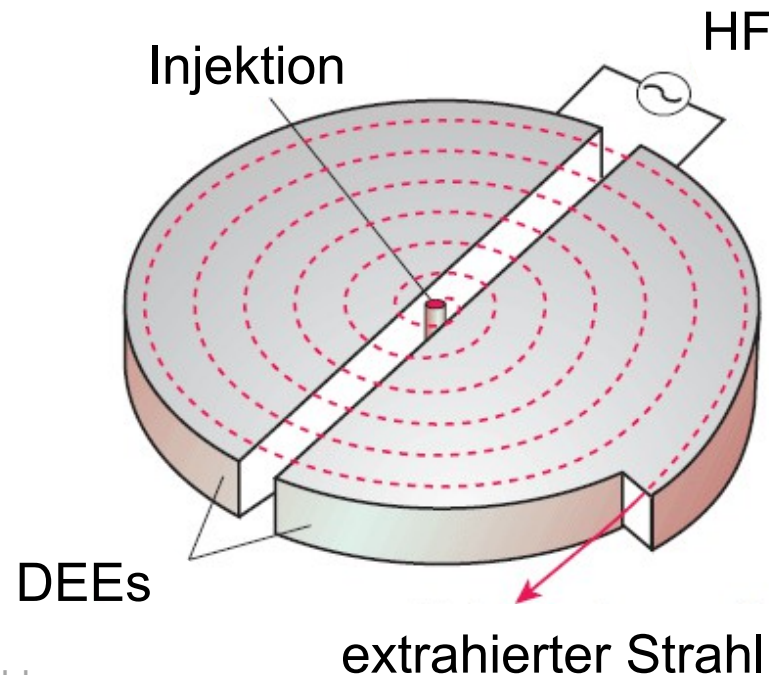


Q: wikipedia

Zyklotron – Anwachsen des Radius limitiert Größe

- **Prinzip: feste Beschleunigungsfrequenz ω (Zyklotronfrequenz)**

- lineares Anwachsen des Radius mit dem Impuls: $r \sim m \cdot v$
- festes T für Beschleunigung im Gap



Synchrozyklotron

- **Relativistische Effekte: variable Beschleunigungsfrequenz ω**

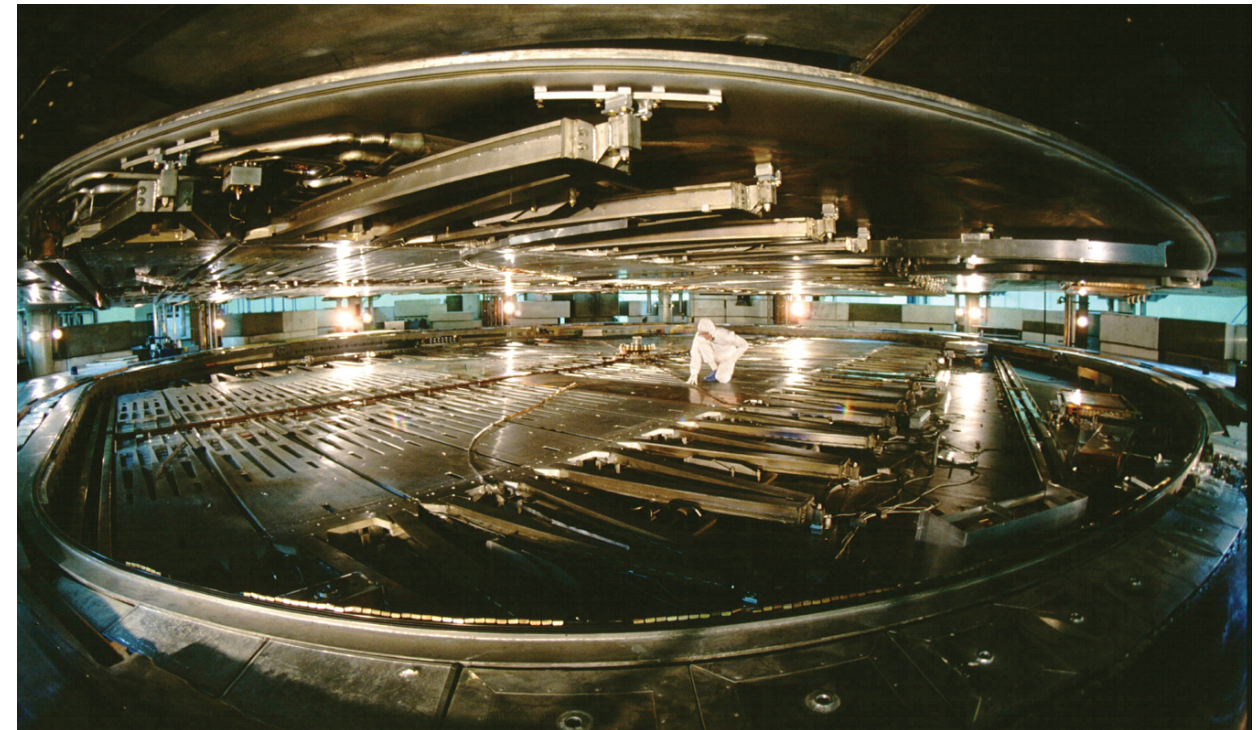
- relativistische Massenzunahme limitiert bei Protonen in einem Zyklotron Energie $E_{\max} < 20 \text{ MeV}$

- **Synchrozyklotron:**
variable Frequenz ω

$$\omega = \frac{q}{\gamma \cdot m} \cdot B$$

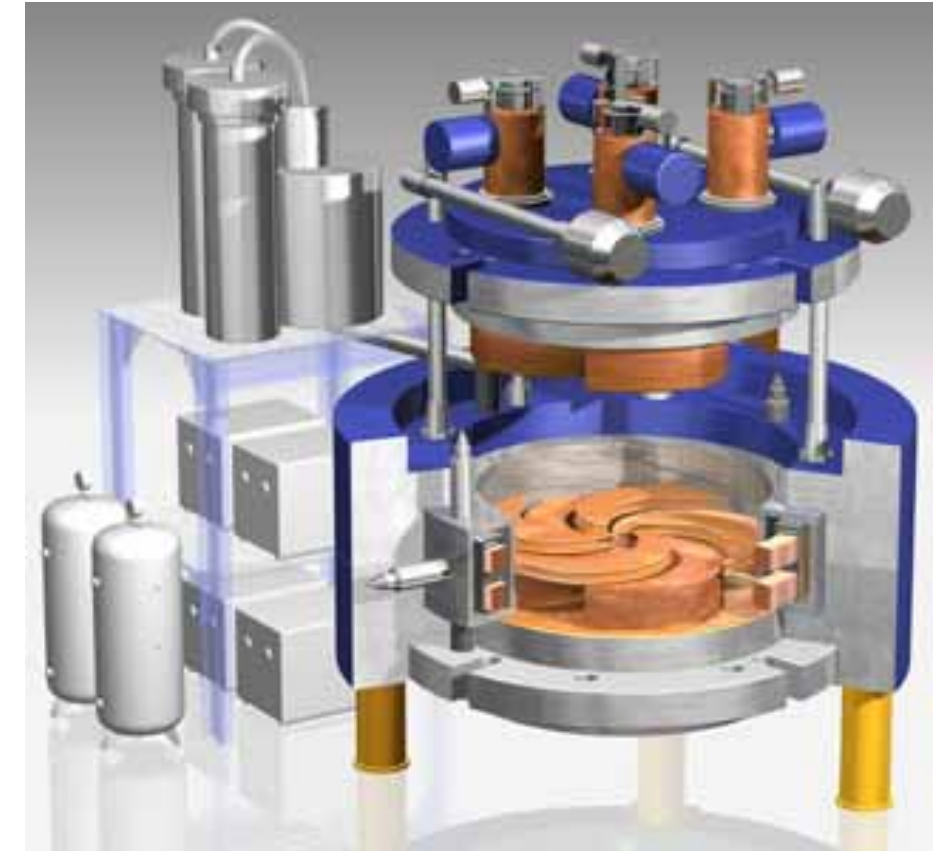
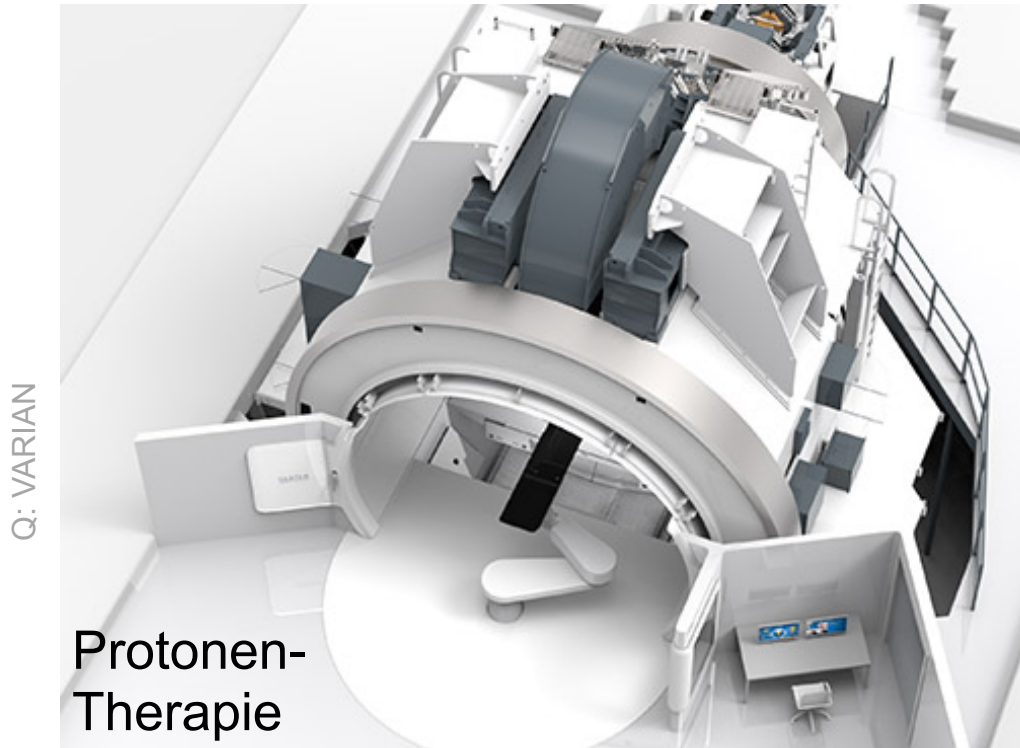
|
relativistische
Masse

weltgrößtes Zyklotron $\varnothing = 18 \text{ m}$ $\omega = 23 \text{ MHz}$



Q: TRIUMPF Labor, Kanada

- **Moderne Kompakt-Zyklotrone für Radioisotope & zur Strahlentherapie**
 - Einsatz zur Erzeugung medizinisch nutzbarer Radioisotope (^{99m}Tc) & für Protonentherapie



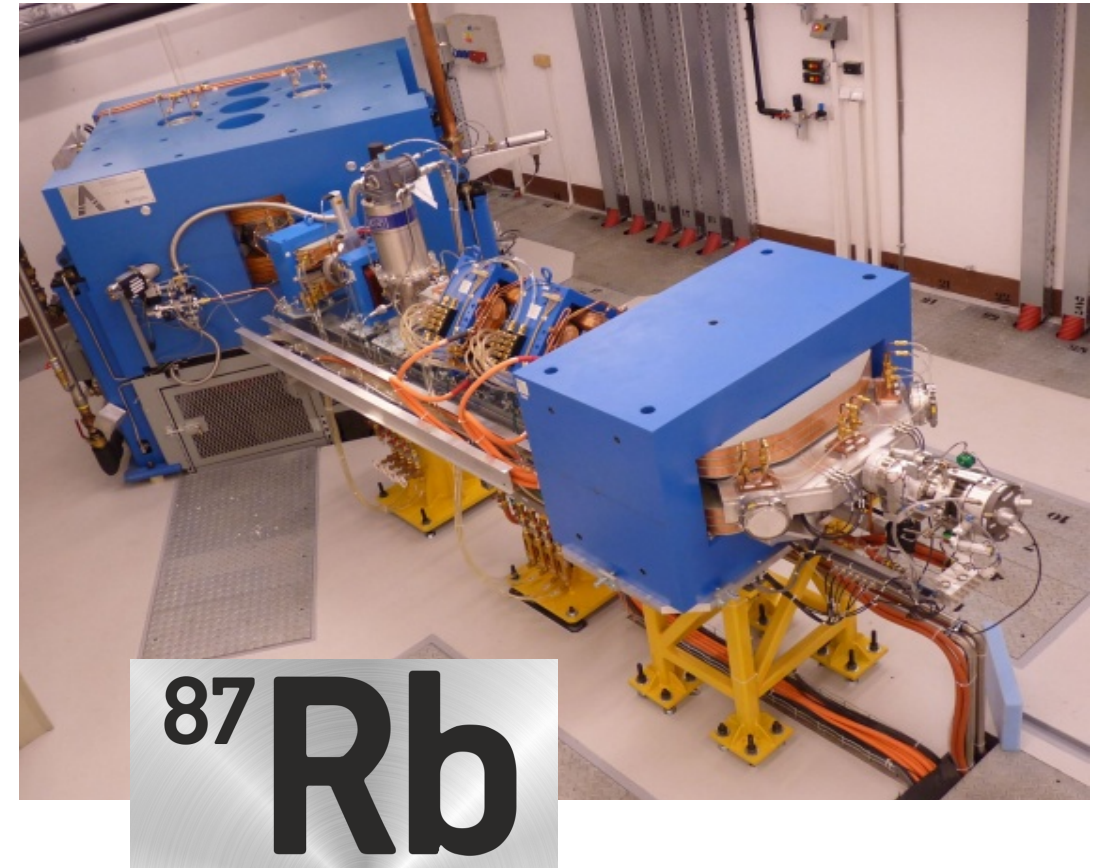
Kompaktzyklotron

Anwendung: spezielles Isotop für KATRIN

- Zyklotron in Rez produziert p für ^{83}Rb -Eichquelle für KATRIN (10 GBq)
monoenergetische Elektronen aus $^{83\text{m}}\text{Kr}$ -Tochterisotop



Q: NPI Rez bei Prag



Synchrotron – Aufbau & Prinzip

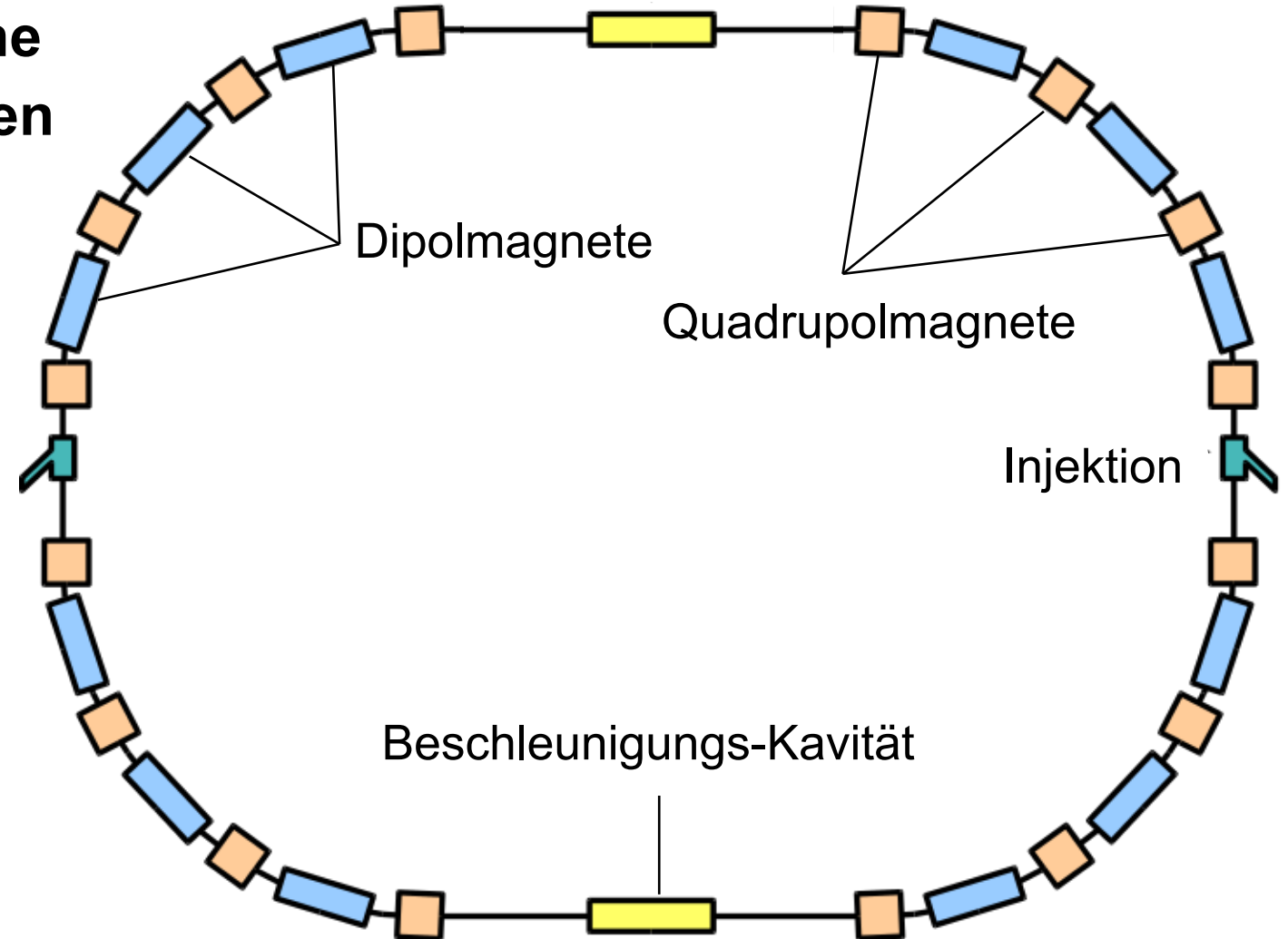
- **Synchrotron:** das magnetische Führungsfeld für den gepulsten Teilchenstrahl wird **synchron** mit der anwachsenden Teilchenenergie E hochgefahren

- zentrale Elemente:

Dipolmagnete

Quadrupolmagnete

Beschleunigungskavitäten



Element Dipolmagnet

- **Dipolmagnet: Ablenkung des Teilchenstrahls mit festem Radius R**

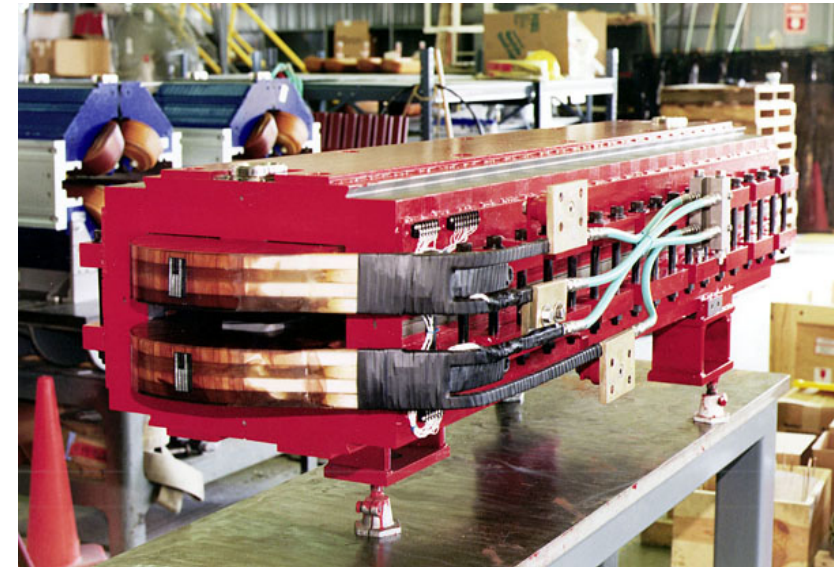
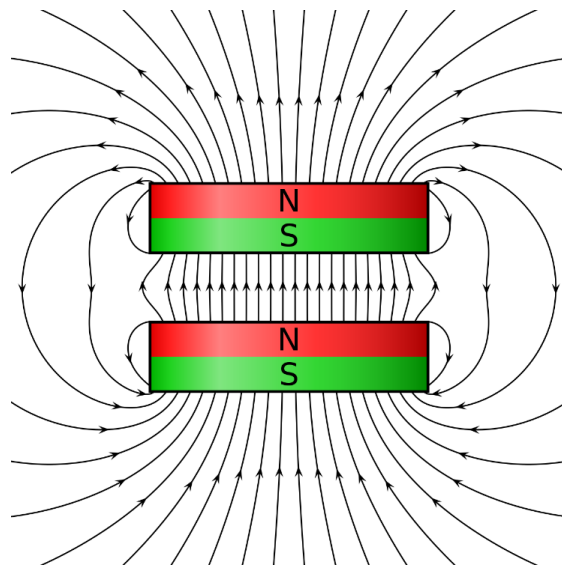
- homogenes B-Feld für Sollradius r

$$p = r \cdot q \cdot B$$

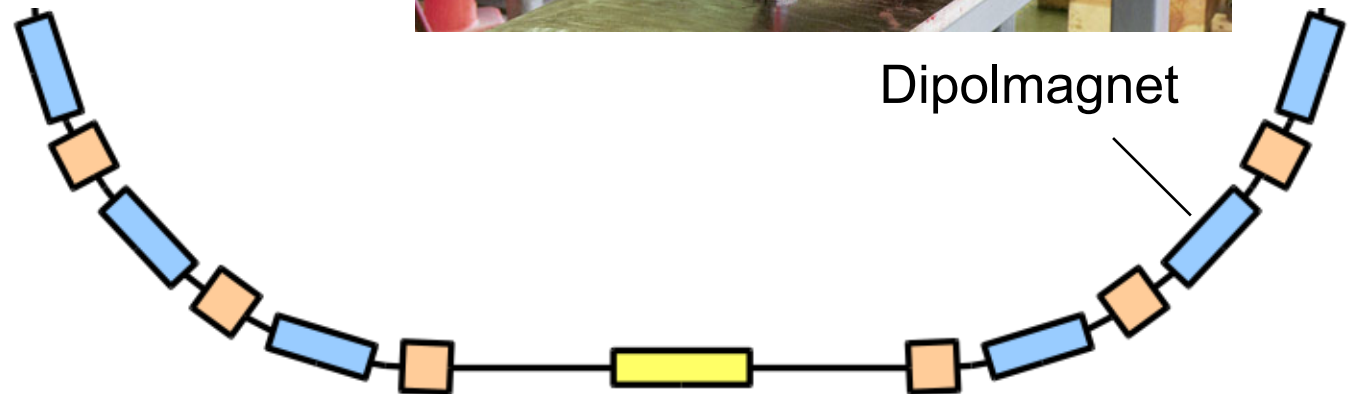
Teilchenladung q
Synchrotronradius r

Teilchenimpuls

Dipolfeld B



Dipolmagnet



Element Dipolmagnet

- **Dipolmagnet: Ablenkung des Teilchenstrahls mit festem Radius R**

- homogenes B-Feld für Sollradius r

$$p = r \cdot q \cdot B$$



$$q = e \cdot z$$

$$c \cdot p = c \cdot r \cdot z \cdot B$$

$$= 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot r [\text{m}] \cdot z \cdot B [\text{T}]$$

$$p [\text{GeV} / c] = 0,3 \cdot z \cdot B [\text{T}] \cdot r [\text{m}]$$

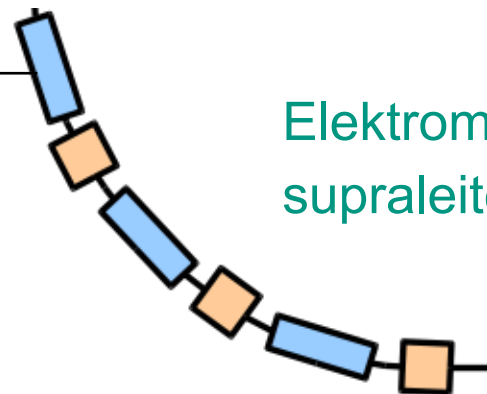
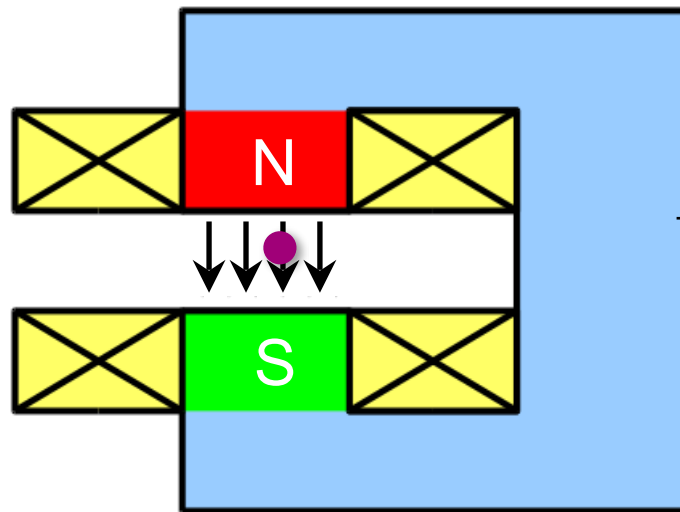


Elektromagnet (Eisenjoch)

$B \sim 1 \text{ T}$

supraleitender Magnet (LHC)

$B \sim 9 \text{ T}$



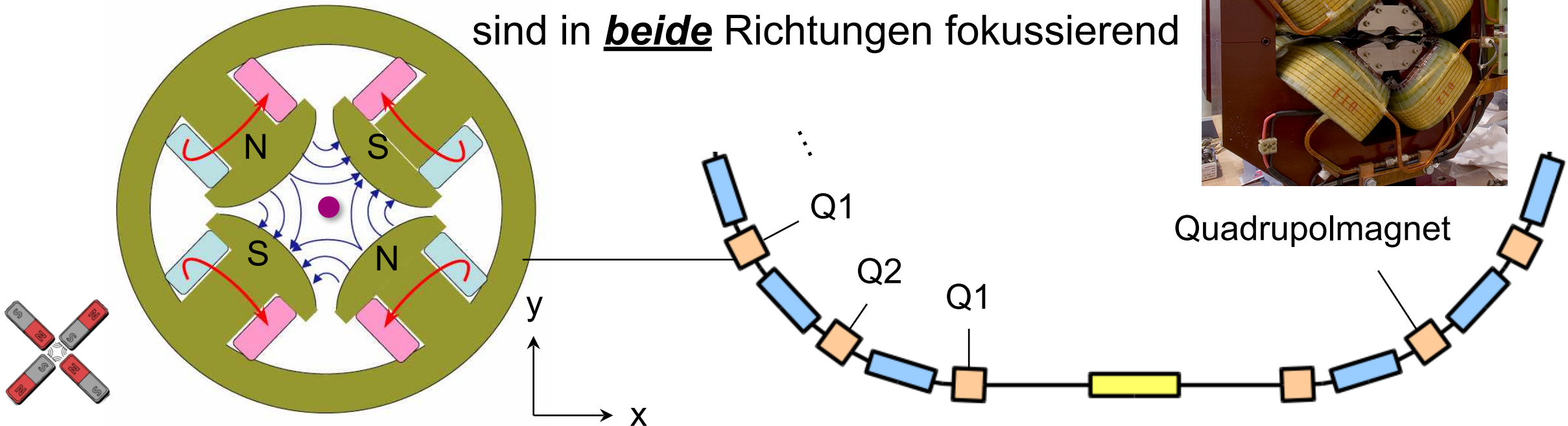
aus B,r folgt Teilchenimpuls p

Element Quadrupolmagnet

- **Quadrupolmagnete: starke Fokussierung des Teilchenstrahls auf Sollbahn**

- **Q1**: Fokussierung in x, Defokussierung in y
- **Q2**: Defokussierung in x, Fokussierung in y
- gegeneinander gedrehte Quadrupole **Q1**, **Q2**

sind in **beide** Richtungen fokussierend



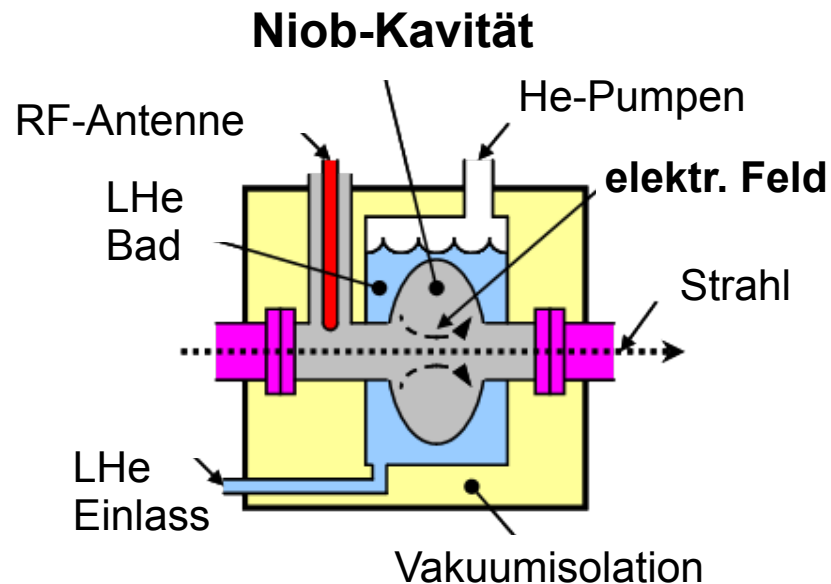
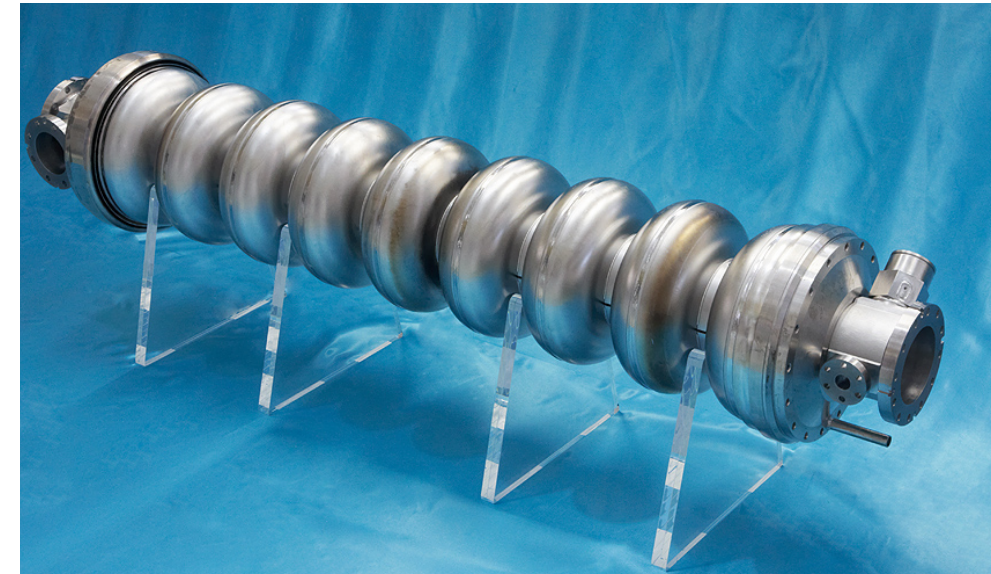
Quadrupolmagnet

Element Kavität (Hohlraumresonator)

- **Kavität: Anregung resonanter elektrischer Felder via HF-Einkopplung**

- Beschleunigung: TM₀₁ Mode
- normalleitend (Cu@300 K): **Verluste**
- supraleitend (Niob@1,8 K): **$Q = 10^{10}$**

Q: newslite.linearcollider.org

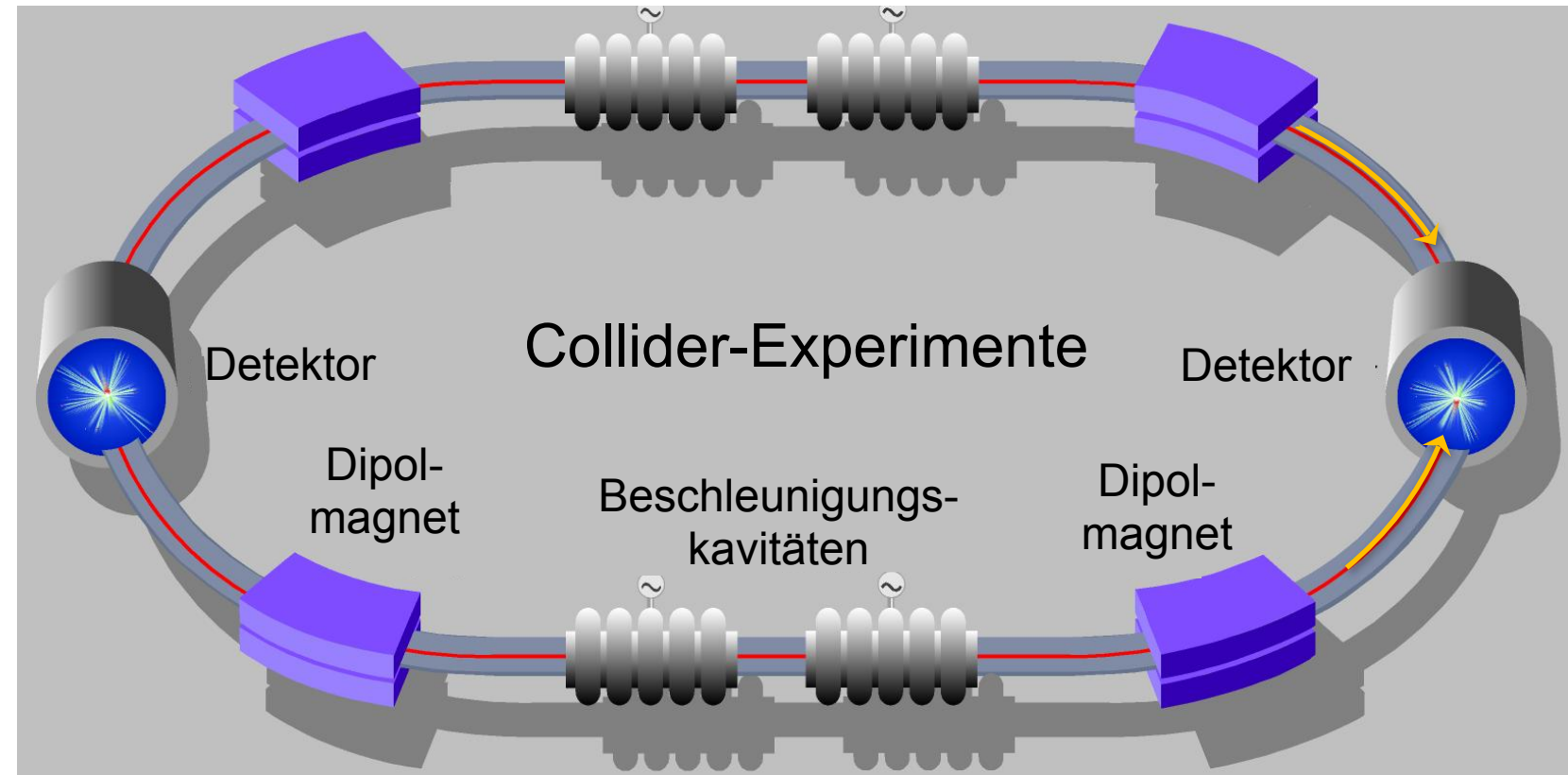
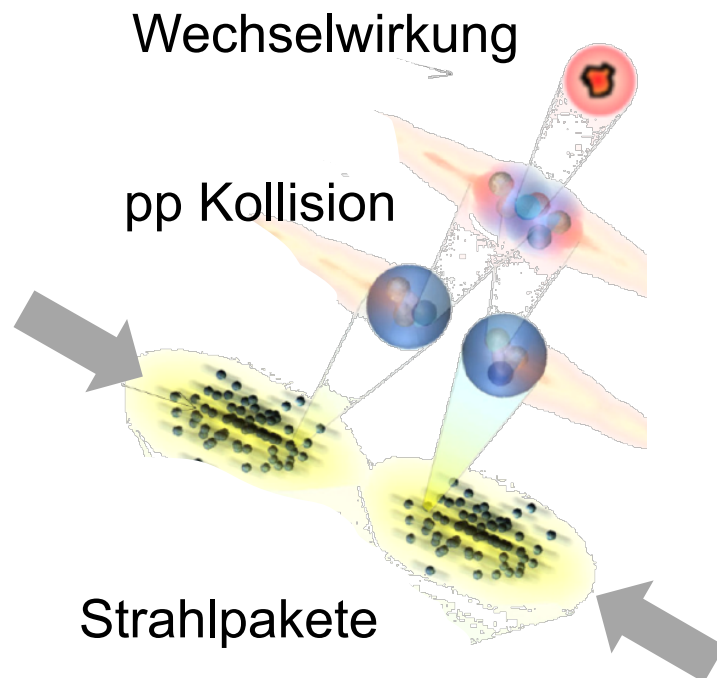


Collider-Experimente

- **Collider – Kollision von gegenläufigen Teilchenstrahlen (Bunches)**

- **Lepton**-Collider: $e^+ e^-$ (LEP), **Hadron**-Collider: pp (LHC) oder $p\bar{p}$ (SPS)

LHC Physik



Beschleuniger weltweit: USA



SLAC NATIONAL
ACCELERATOR
LABORATORY

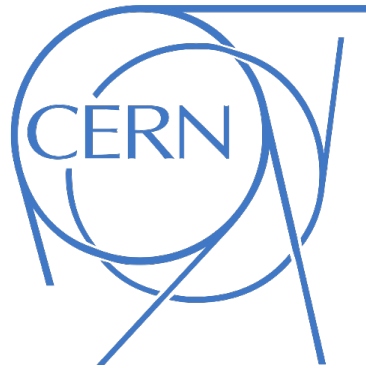
Stanford Linear
Accelerator

 **Fermilab**
Tevatron



Beschleuniger weltweit: Europa

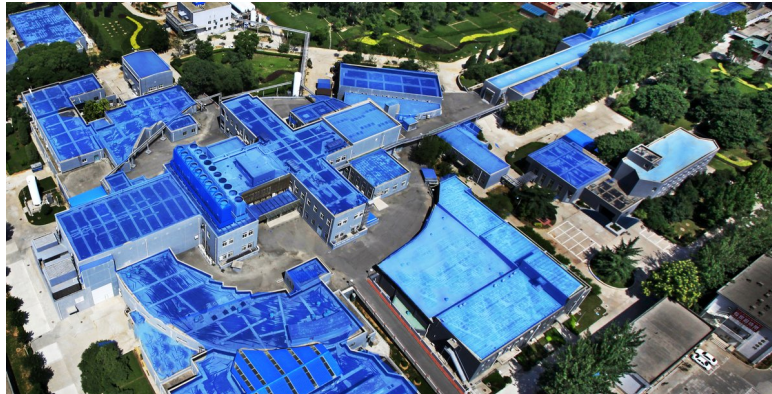
Large Hadron Collider - LHC



PETRA,
HERA, XFEL



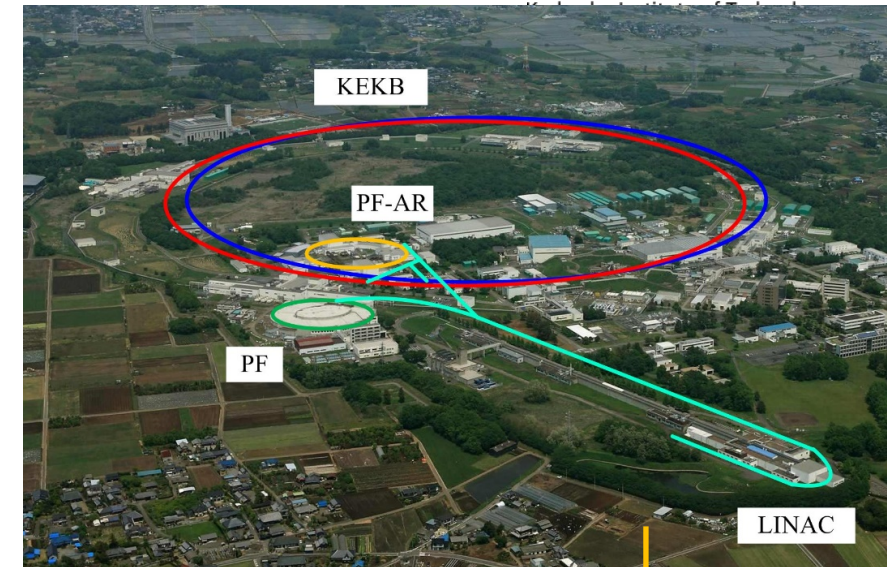
Beschleuniger weltweit: Asien



BEPC II



Super-KEKB

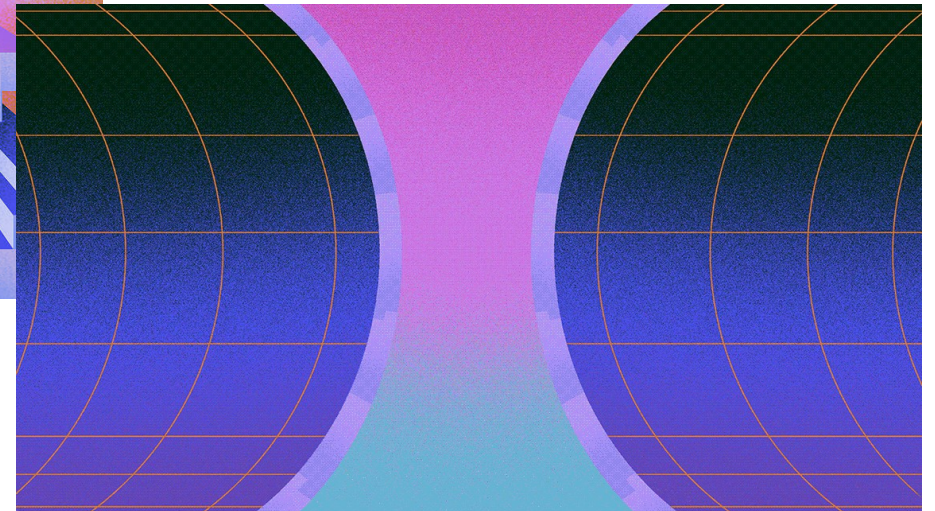
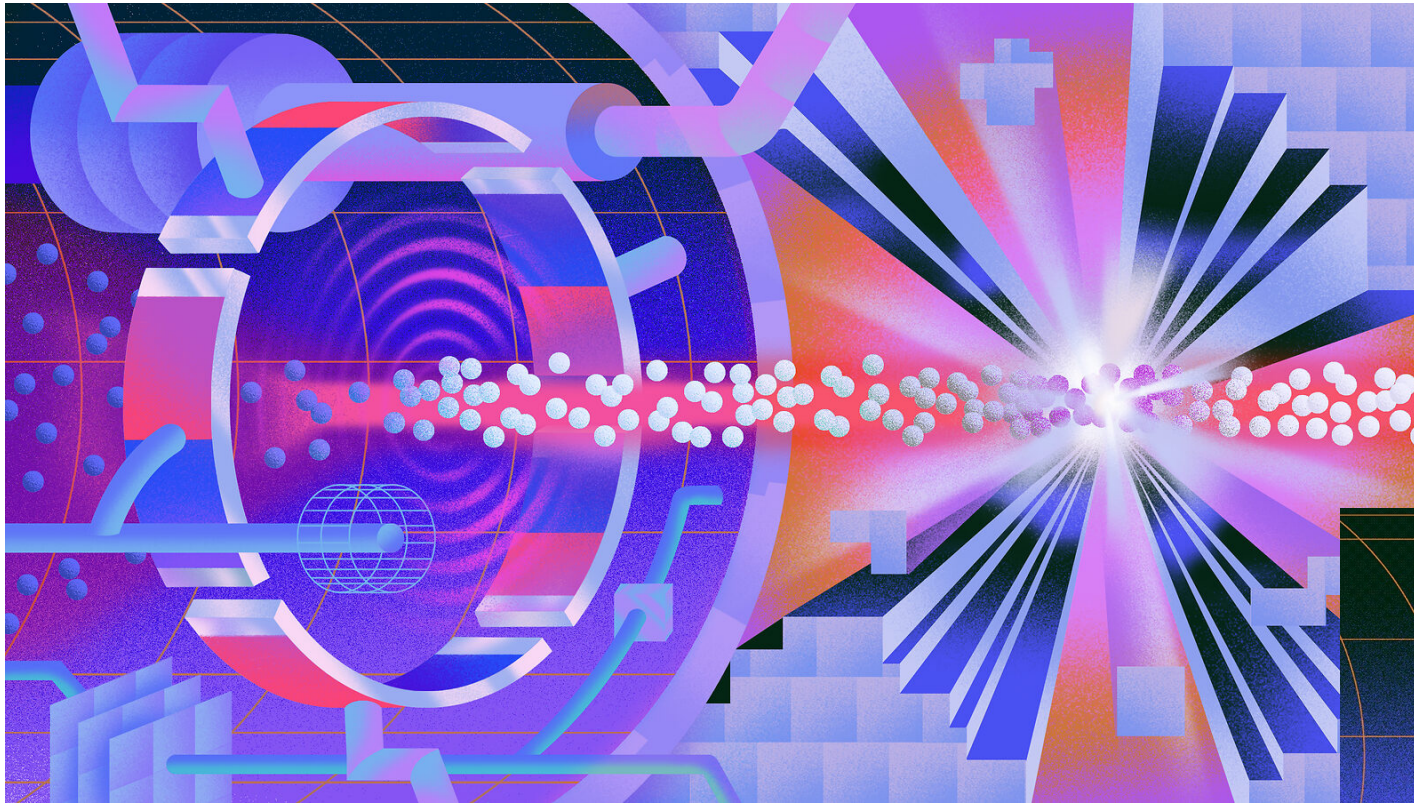


LHC – Large Hadron Collider

- Proton – Proton Kollisionen bei Schwerpunktsenergie $\sqrt{s} = 13.6 \text{ TeV}$

4 Experimente :
CMS, ATLAS,
ALICE, LHCb





EINSCHUB: LUMINOSITÄT

Q: symmetry magazine

Collider-Experimente: Luminosität

- **Luminosität L** – wichtiges Merkmal für die Leistungsfähigkeit eines Colliders

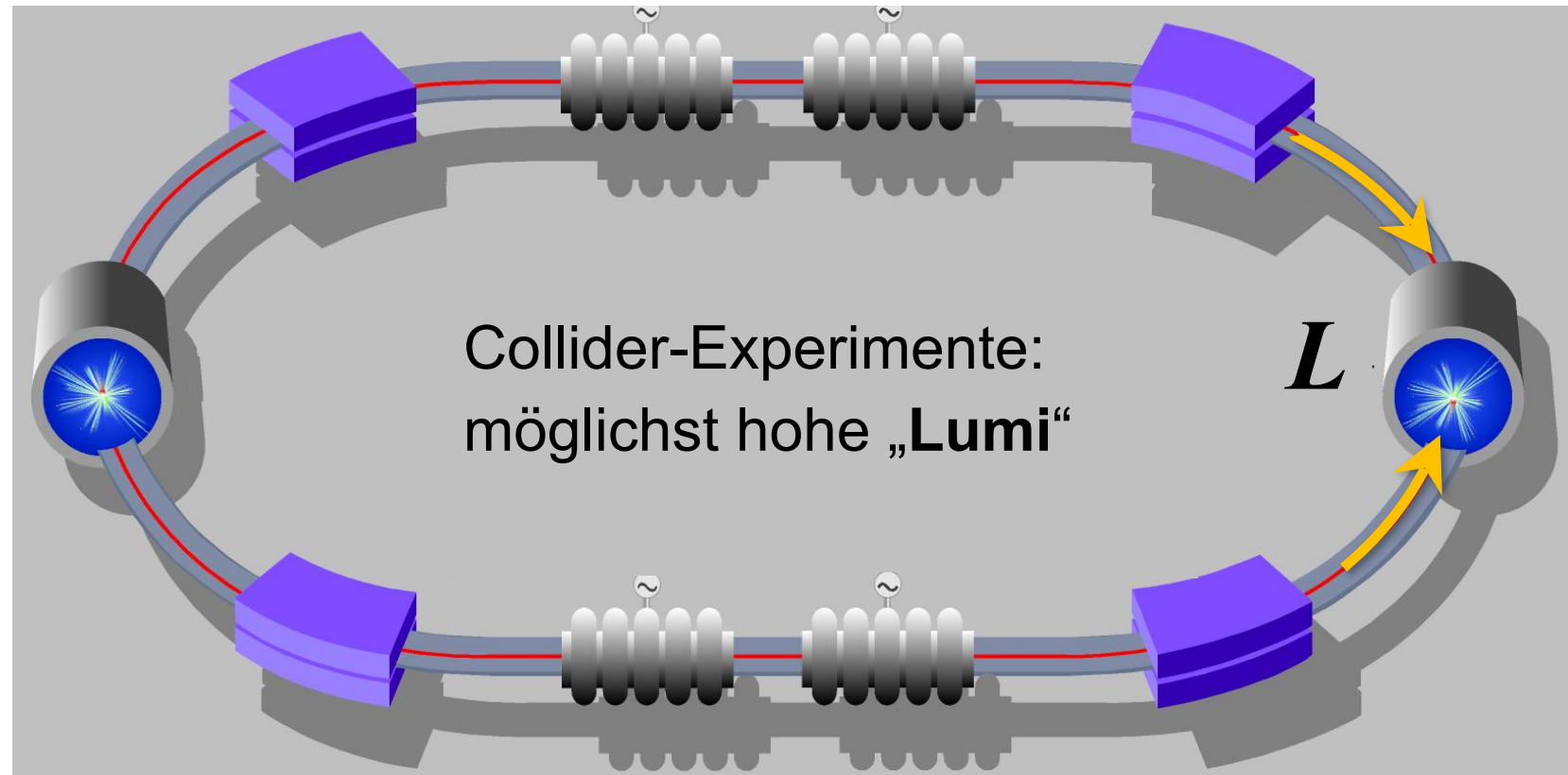
$$R = \frac{dN}{dt} = \sigma \cdot L$$

σ = Wirkungs-
querschnitt (cm^2)

L = Luminosität ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)

**L = Anzahl der
Kollisionen in einem
Detektor pro cm^2
pro sec**

R = Rate = # an Streuereignissen pro Zeiteinheit (s^{-1})



Collider-Experimente: integrierte Luminosität

- **integr. Luminosität** $\int L dt$ – ein Merkmal für einen „Datensatz“ an Collidern

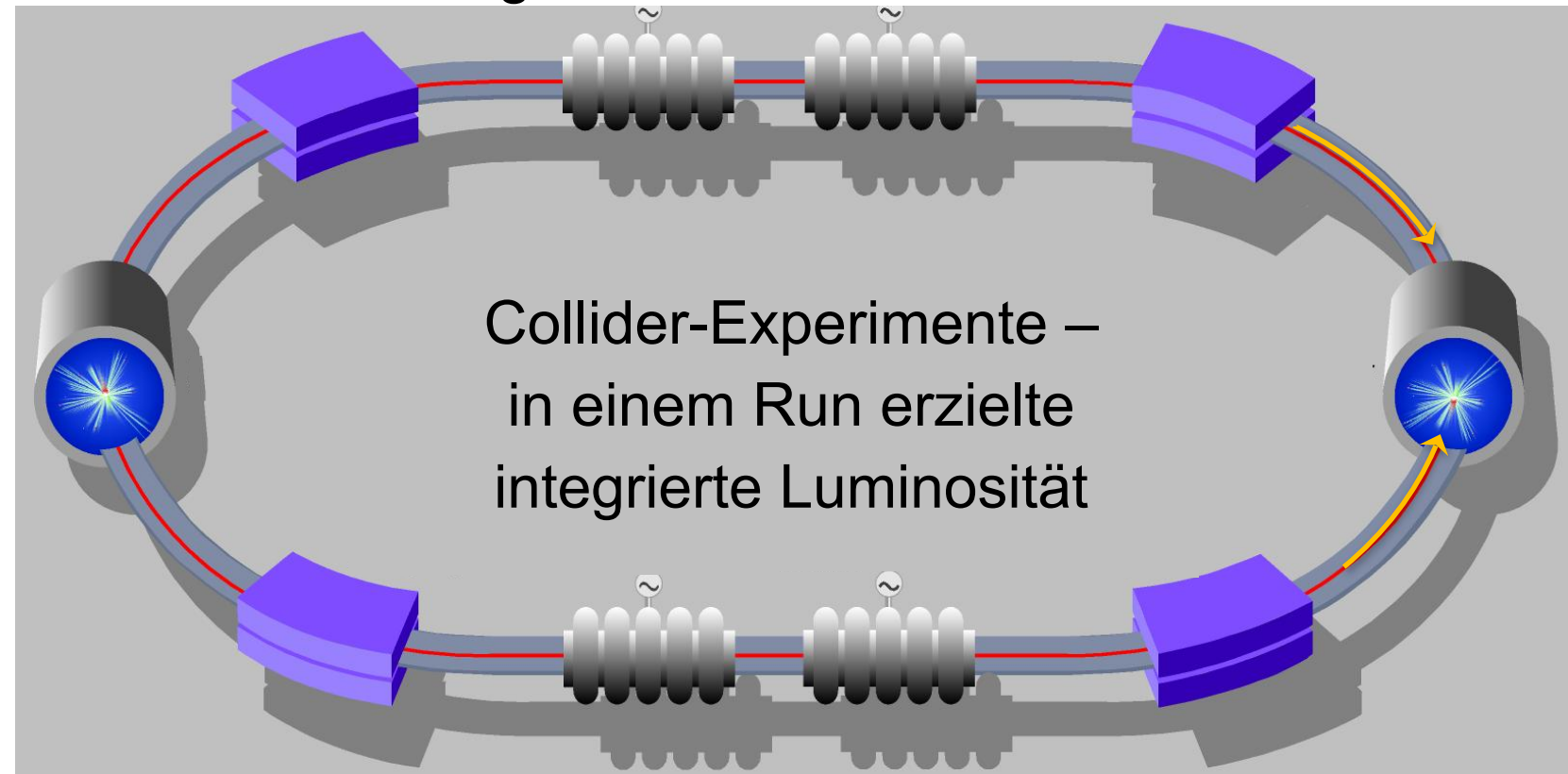
$$N = \sigma \cdot \int L dt$$

zeitintegrierte Größe
(z.B. 1 Monat, 1 Jahr)

$\int L dt$ = integrierte
Luminosität (cm^{-2})

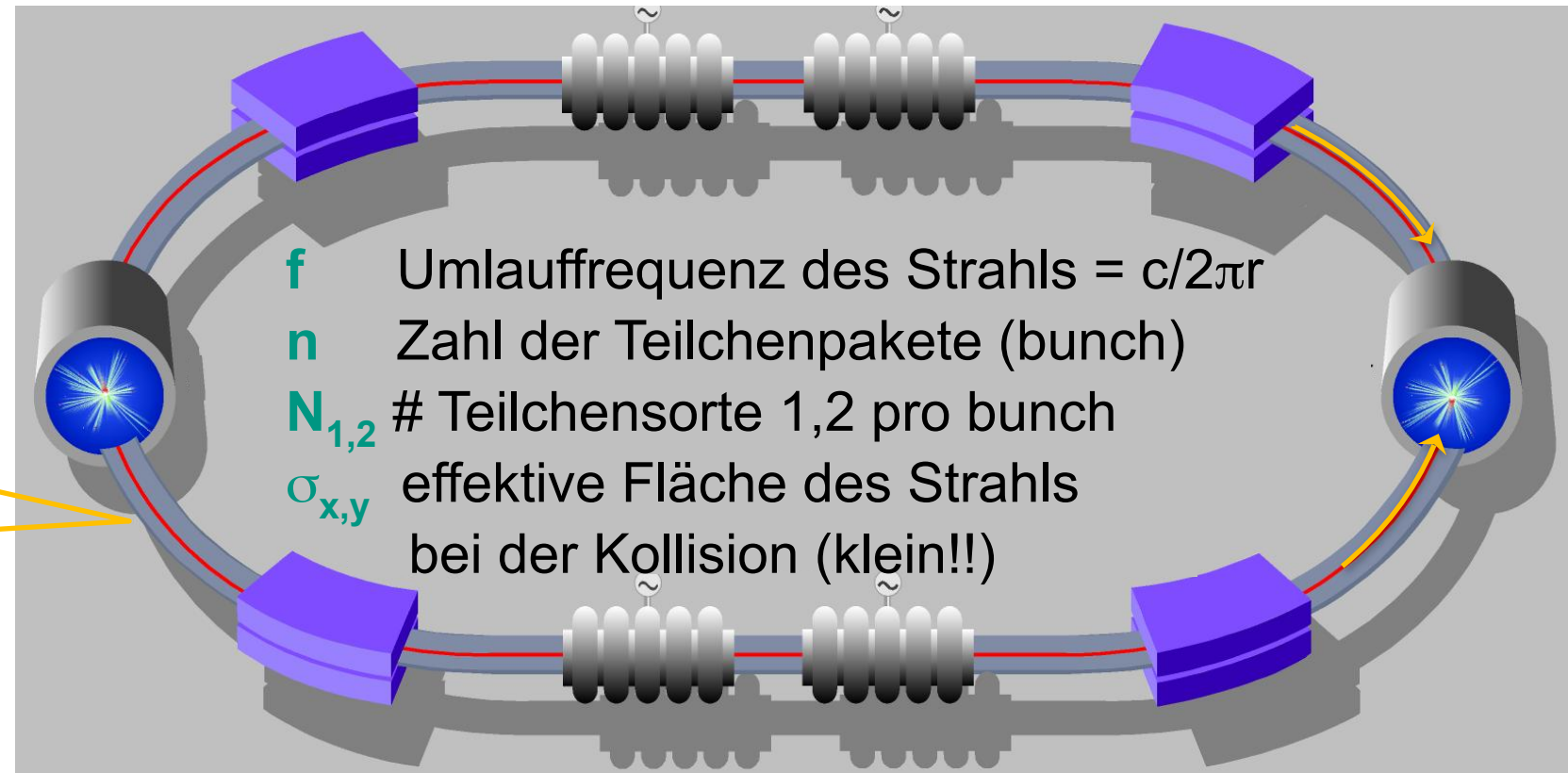
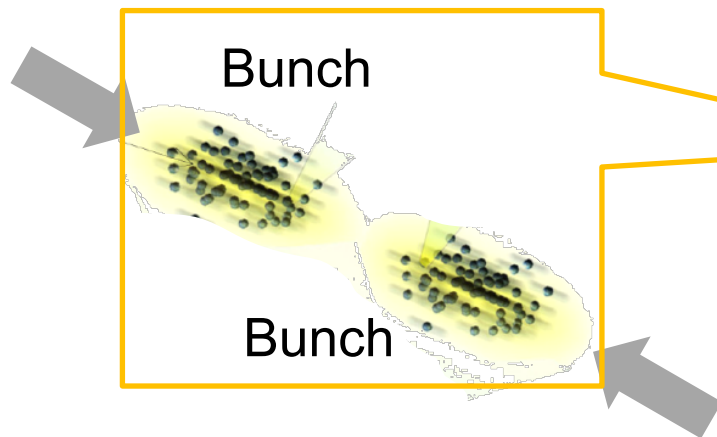
(Einheit: **inverser**
Wirkungsquerschnitt
z.B. inverse fb)

N = # an Streuereignissen über einen „Run“



- **Luminosität L und Strahlparameter: Anzahl Bunche, Umlauf-Frequenz**

$$L = f \cdot n \cdot \frac{N_1 \cdot N_2}{4\pi \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y}$$



Luminosität des LHC

- **Design-Luminosität L des Large Hadron Colliders**

$$L = f \cdot n \cdot \frac{N^2}{4\pi \cdot \sigma_b^2} \quad L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$



f	Umlauffrequenz des Strahls = $c/2\pi r$	$\sim 10^4 \text{ s}^{-1}$
n	Zahl der Teilchenpakete	= 2808
N	# Protonen pro bunch	= $1,15 \cdot 10^{11}$
σ_b	transversale Größe des Strahls bei der Kollision (klein!!)	= $16 \mu\text{m}$

Luminosität des LHC

- Design-Luminosität L des Large Hadron Colliders

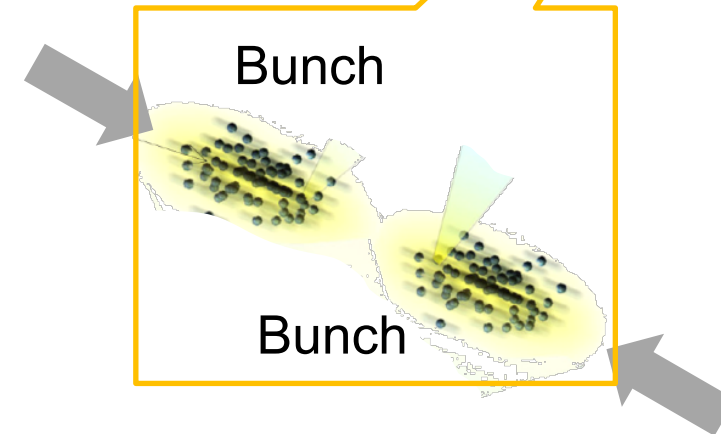
$$L = f \cdot n \cdot \frac{N^2}{4\pi \cdot \sigma_b^2}$$

$$L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$R = \frac{dN}{dt} = \sigma \cdot L$$

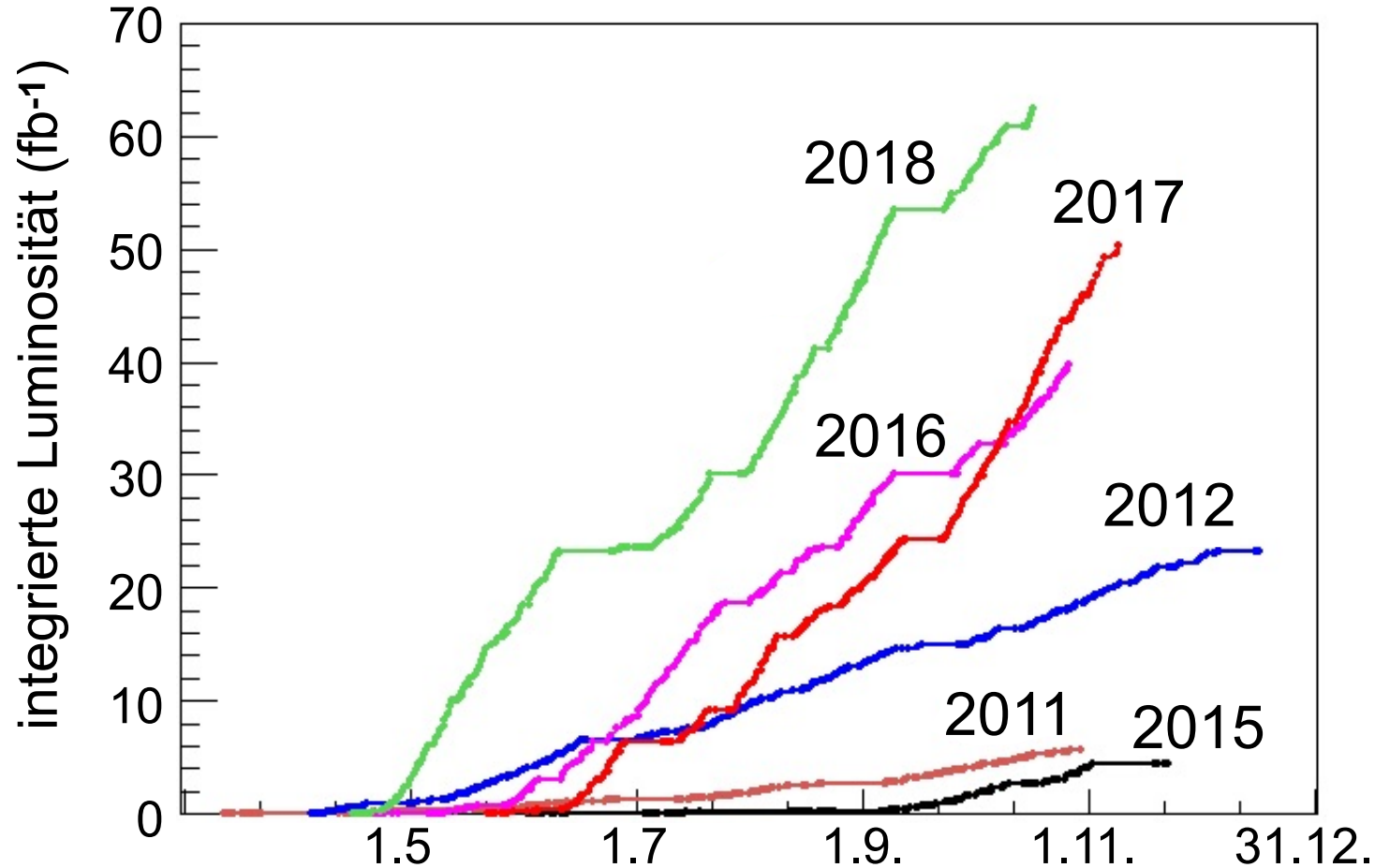
mit $\sigma_{\text{inel}} = 60 \text{ mb}$ beträgt am LHC
die Kollisionsrate R der Protonen
in ATLAS oder CMS:

$$R = \sigma_{\text{inel}} \cdot L \sim 10^9 \text{ s}^{-1}$$



Integrierte Luminosität des LHC pro Jahr

- Entwicklung der integrierten LHC-Luminosität / Jahr

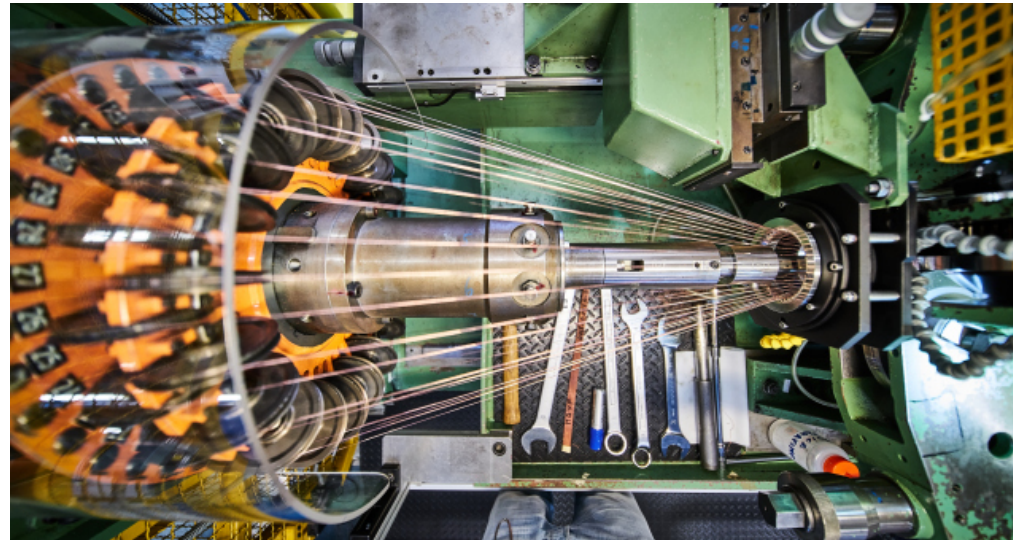


Ausbau des LHC zum HL-LHC

- **Erhöhung der Luminosität des LHC auf $10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$**
 - 2025-27: Einbau neuer Quadrupol-Magnete, Kavitäten,...



erste von 16 neuen Kavitäten



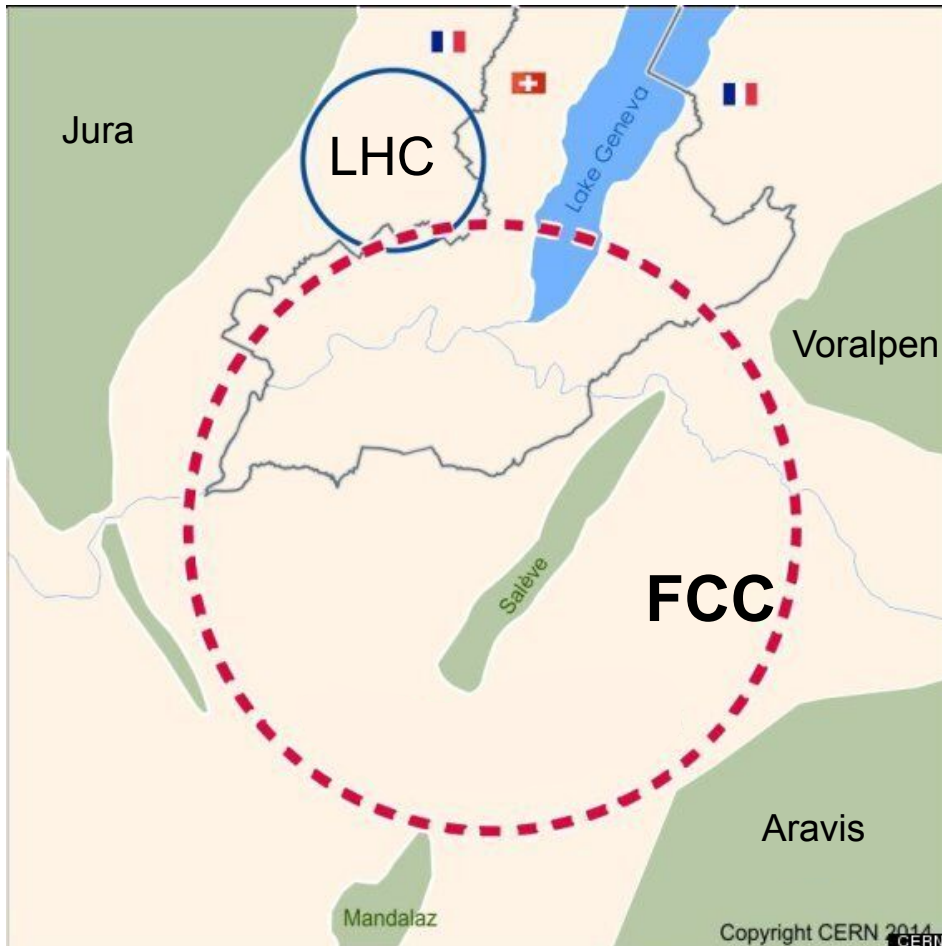
neue Quadrupole bei $B = 12 \text{ T}$

$$L = 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$



FCC – Future Circular Collider: FCC-ee und FCC-hh

- **Geplanter Ring für Kollisionen von e^+e^- und hh (pp und Ion-Ion)**



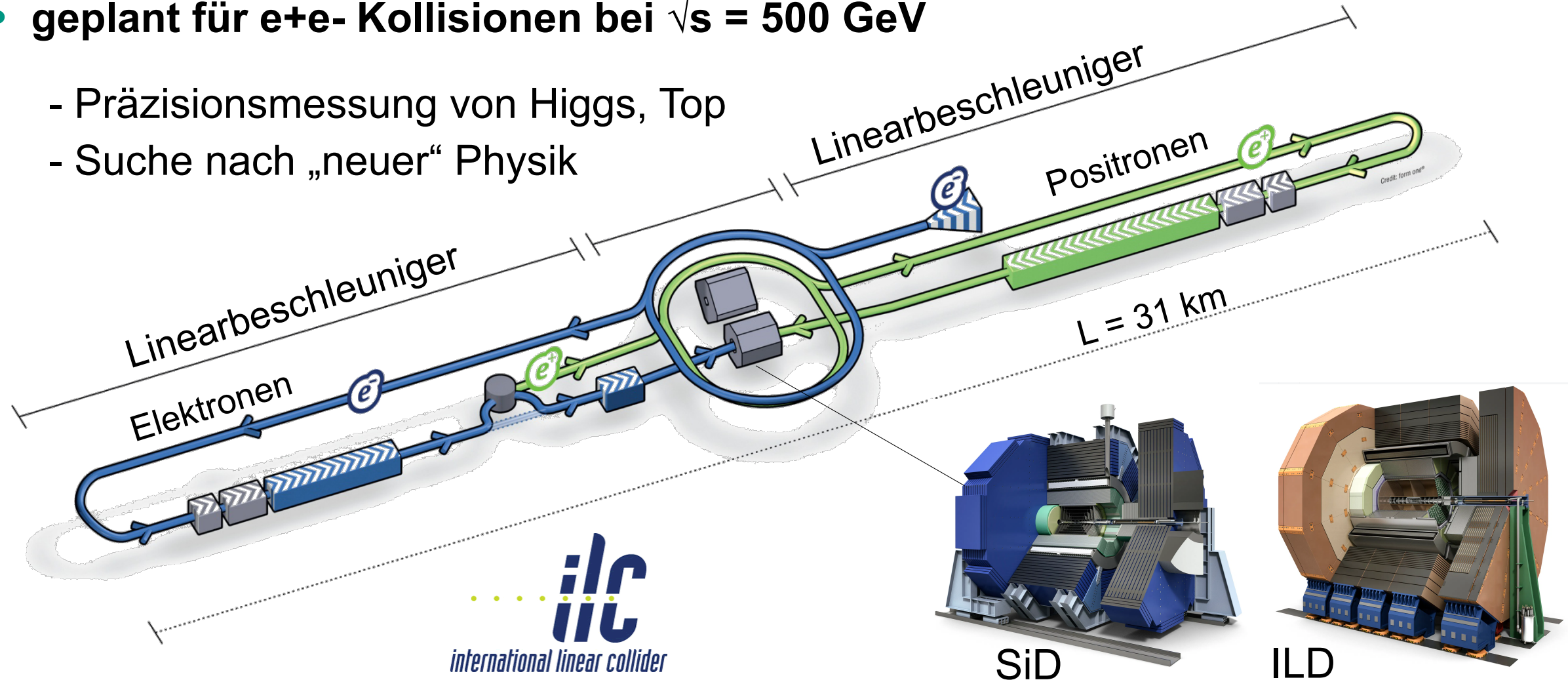
- **ee**: e^+e^- Kollisionen bei $\sqrt{s} = 90\text{-}350$ GeV
- **hh**: pp-Kollisionen bei $\sqrt{s} = 100$ TeV, Ionen

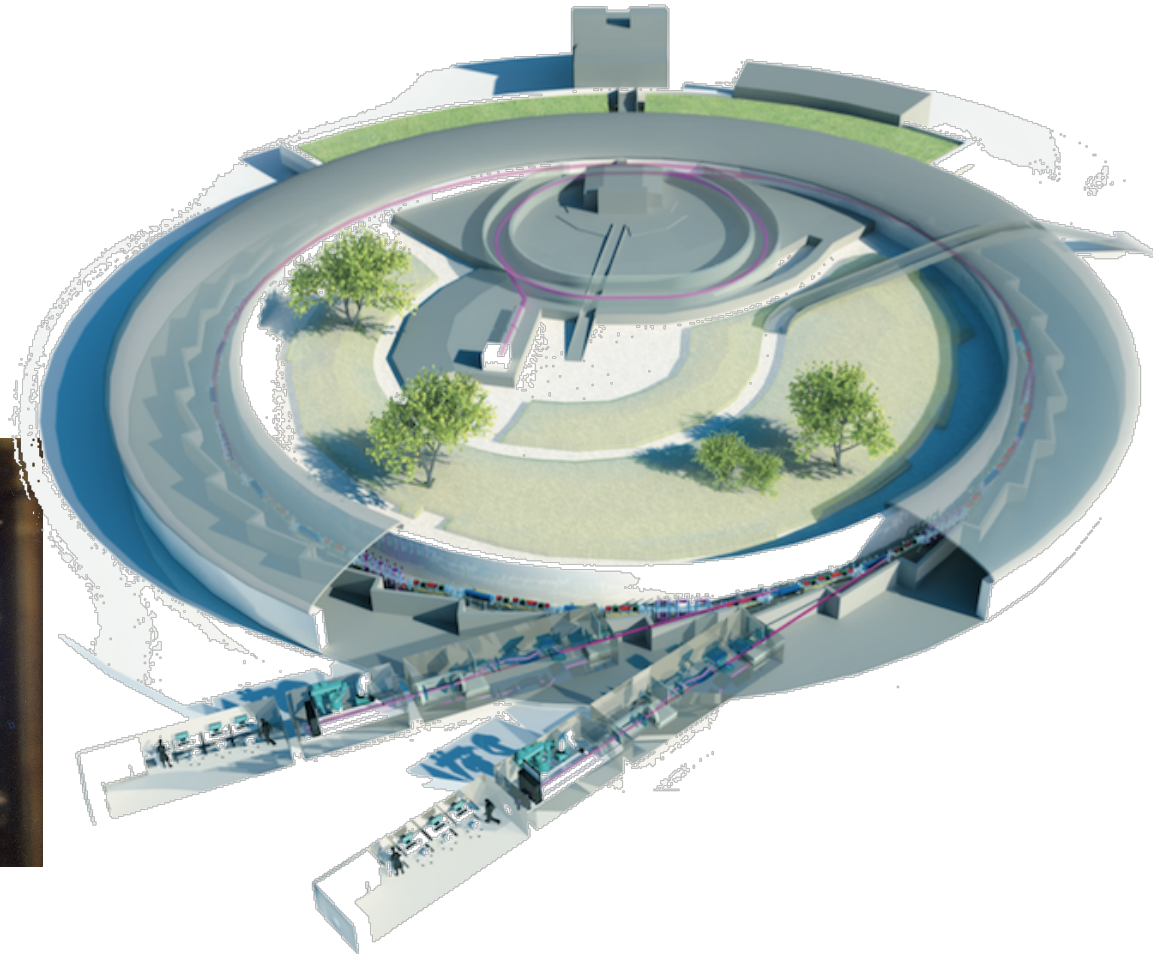
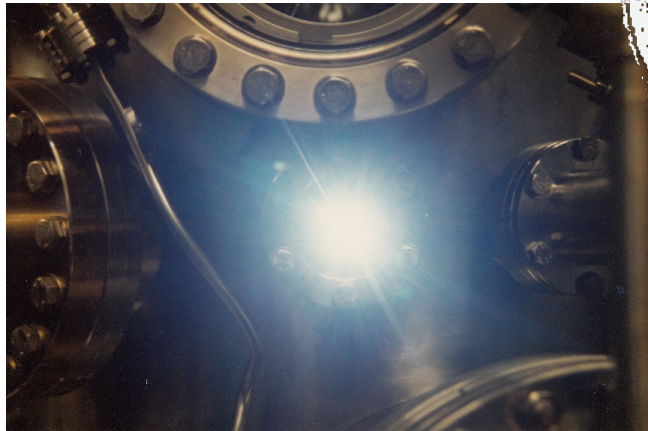


ILC – International Linear Collider

- geplant für e^+e^- Kollisionen bei $\sqrt{s} = 500 \text{ GeV}$

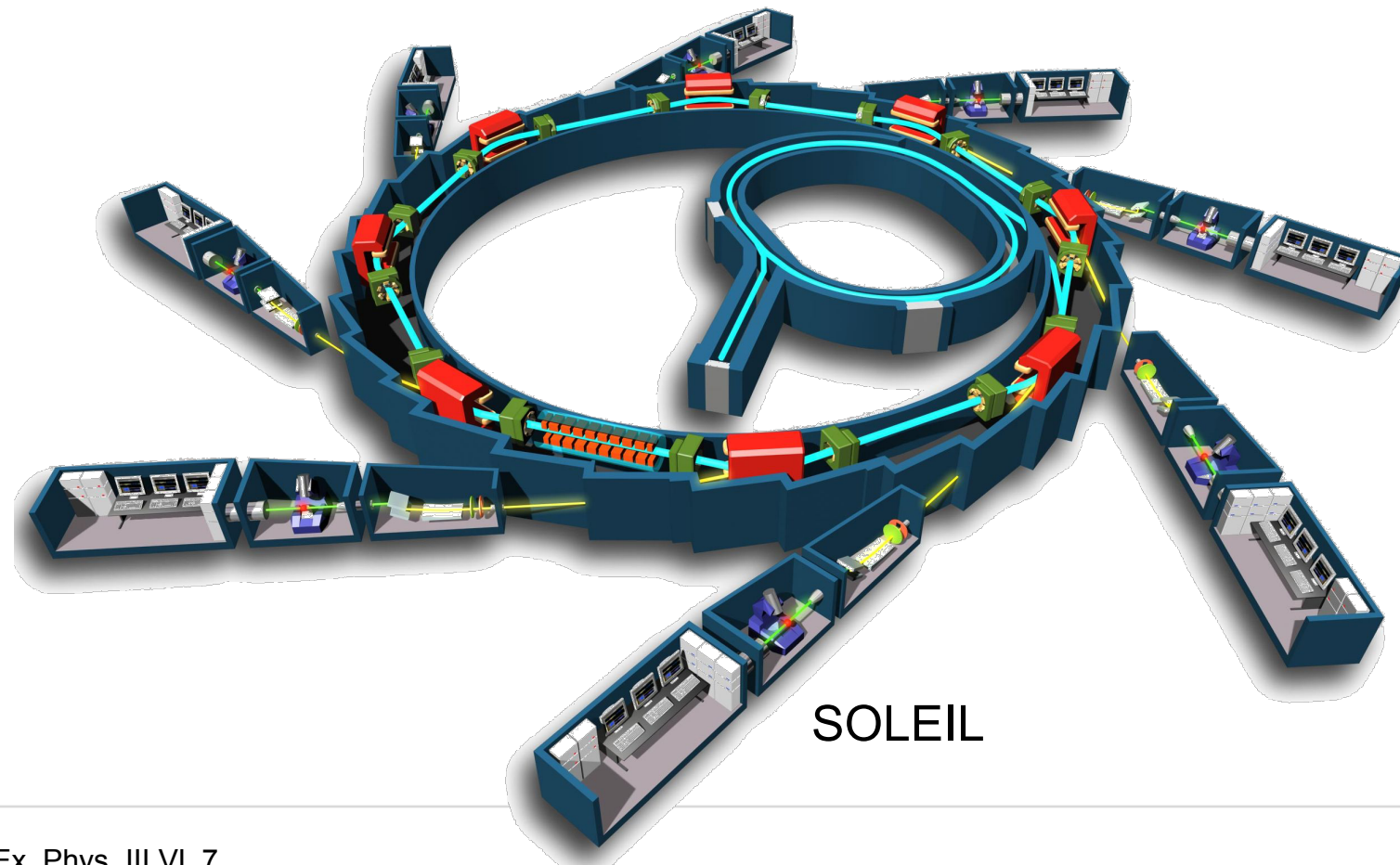
- Präzisionsmessung von Higgs, Top
- Suche nach „neuer“ Physik



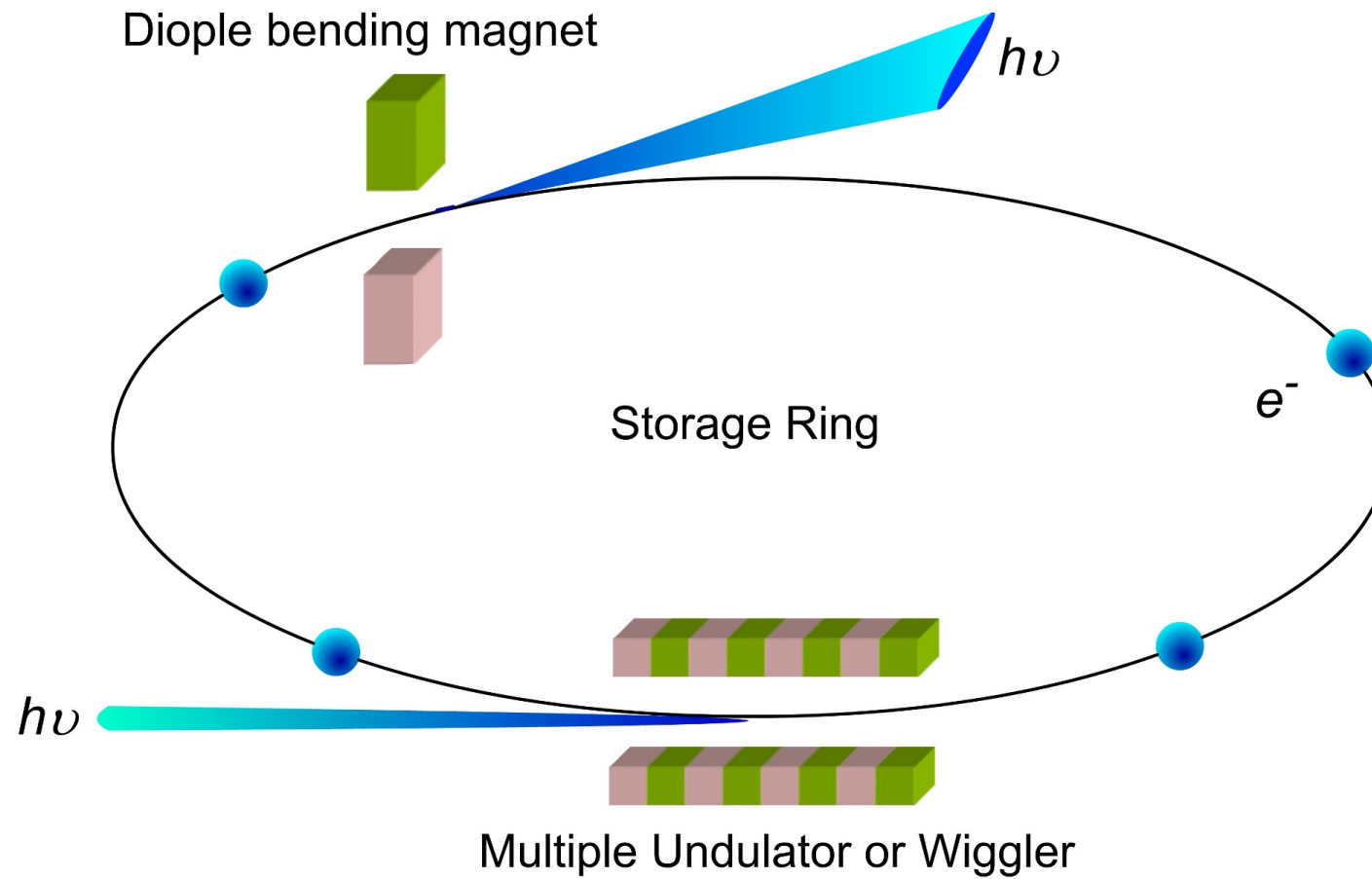


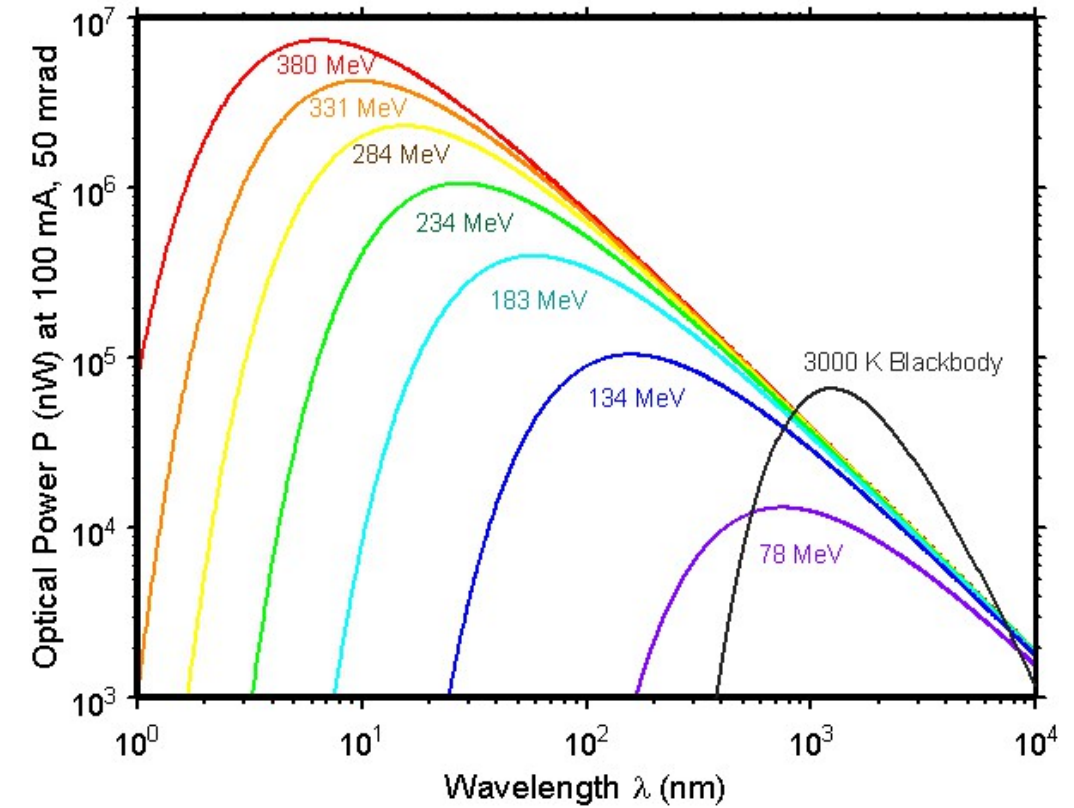
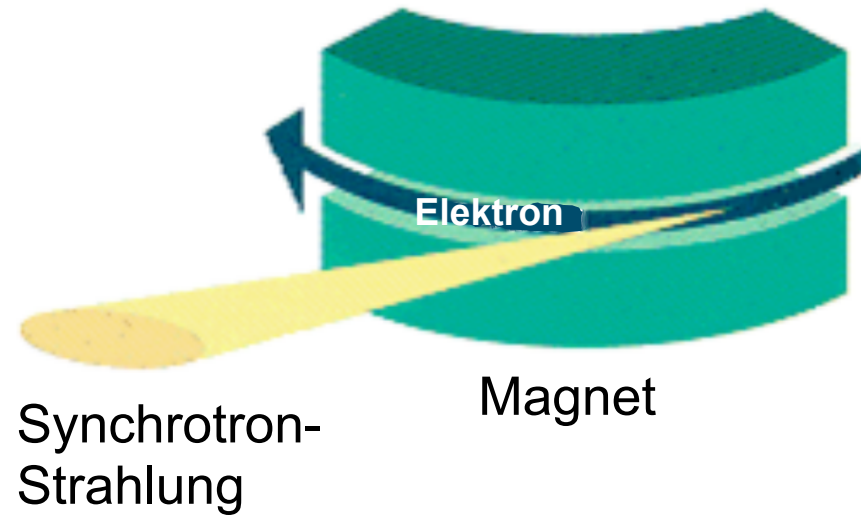
EINSCHUB: SYNCHROTRONSTRAHLUNGS-QUELLEN

- **Synchrotron-Strahlungsquellen**



Q: wikipedia



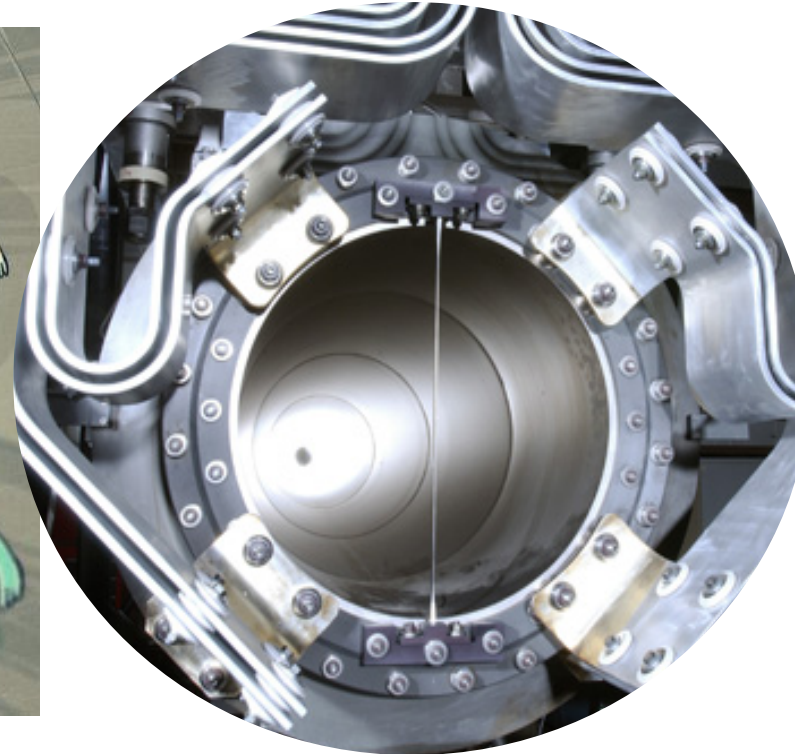


KARA – Synchrotronstrahlungsquelle am KIT

- **Ein Speicherring für Elektronen bei $E = 2,5 \text{ GeV}$ (Umfang: 110 m)**
 - Elektronen beschleunigt und gespeichert bis zu Strom $I = 150 \text{ mA}$
 - Erzeugung von Synchrotronstrahlung
 - kohärente Strahlung in THz Region

**KARA- KARlsruhe
Research Accelerator**





EINSCHUB: ERZEUGUNG VON NEUTRINO- STRAHLEN

Neutrino-Strahlen

