

Experimentalphysik VI

Kern- und Teilchenphysik

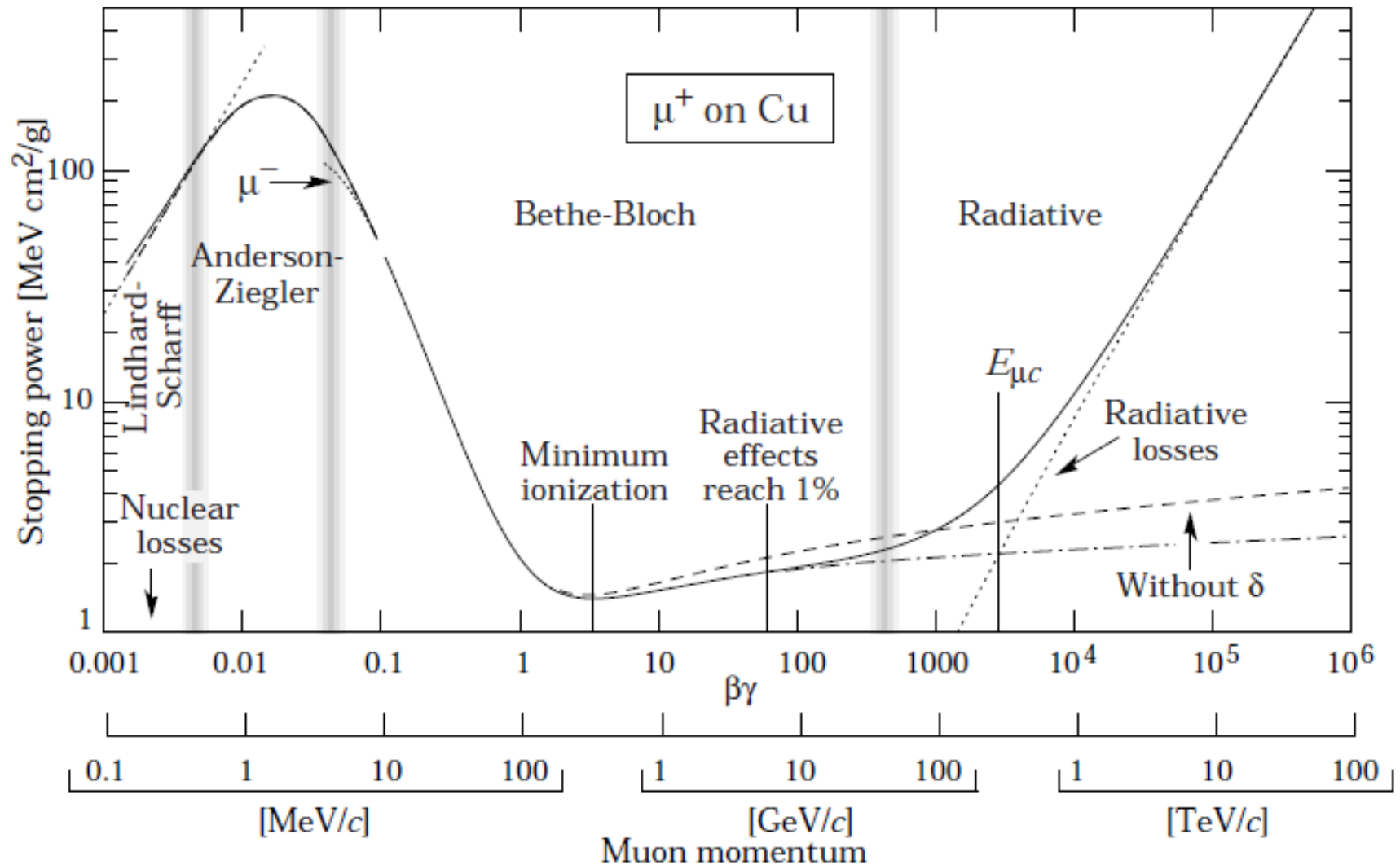
Prof. Markus Schumacher

ALU Freiburg, Sommersemester 2010

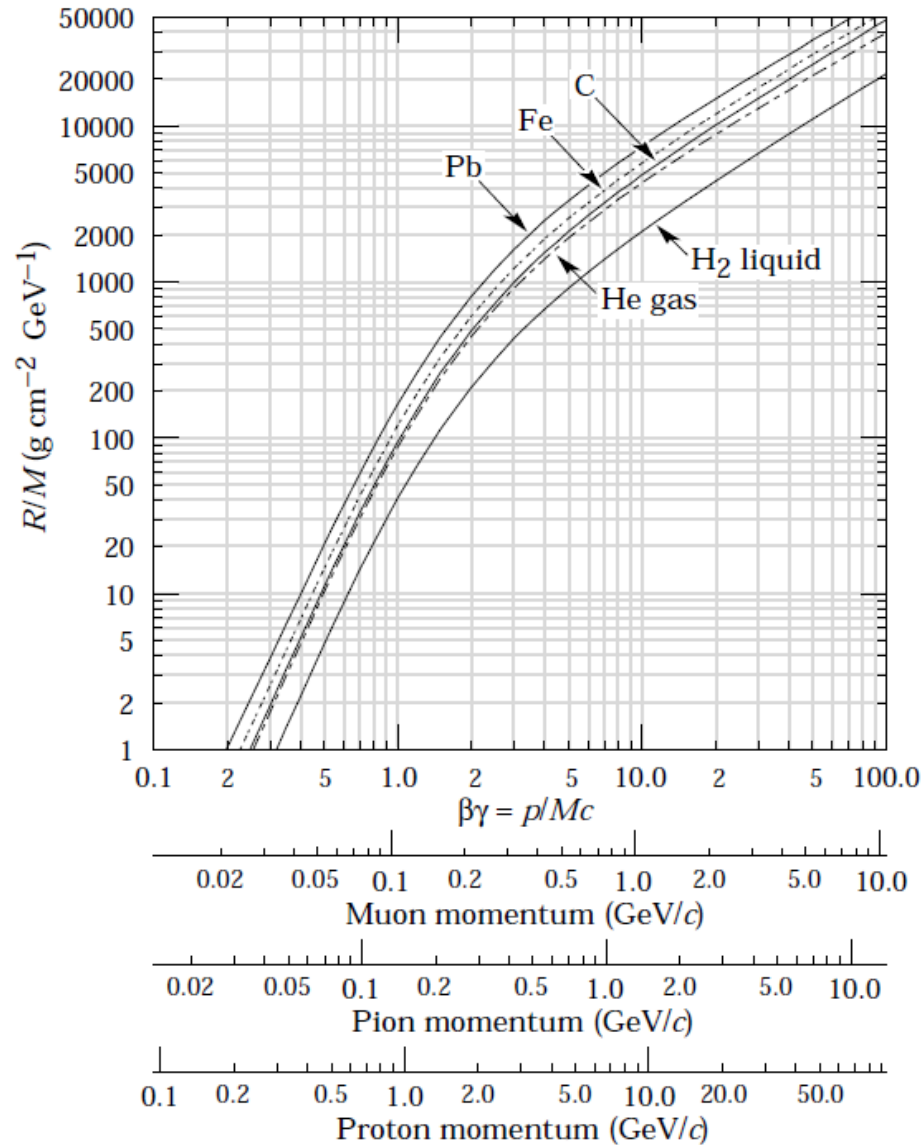
Kapitel 7: Nachweis von Teilchen und Detektoren

Symbol	Definition	Units or Value
α	Fine structure constant ($e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$)	1/137.035 999 11(46)
M	Incident particle mass	MeV/ c^2
E	Incident part. energy $\gamma M c^2$	MeV
T	Kinetic energy	MeV
$m_e c^2$	Electron mass $\times c^2$	0.510 998 918(44) MeV
r_e	Classical electron radius $e^2/4\pi\epsilon_0 m_e c^2$	2.817 940 325(28) fm
N_A	Avogadro's number	$6.022\ 1415(10) \times 10^{23}$ mol $^{-1}$
ze	Charge of incident particle	
Z	Atomic number of absorber	
A	Atomic mass of absorber	g mol $^{-1}$
K/A	$4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 / A$	0.307 075 MeV g $^{-1}$ cm 2 for $A = 1$ g mol $^{-1}$
I	Mean excitation energy	eV (<i>Nota bene!</i>)
$\delta(\beta\gamma)$	Density effect correction to ionization energy loss	
$\hbar\omega_p$	Plasma energy $(\sqrt{4\pi N_e r_e^3} m_e c^2 / \alpha)$	$\sqrt{\rho \langle Z/A \rangle} \times 28.816$ eV (ρ in g cm $^{-2}$)
N_e	Electron density	(units of r_e) $^{-3}$
w_j	Weight fraction of the j th element in a compound or mixture	
n_j	\propto number of j th kind of atoms in a compound or mixture	
—	$4\alpha r_e^2 N_A / A$	(716.408 g cm $^{-2}$) $^{-1}$ for $A = 1$ g mol $^{-1}$
X_0	Radiation length	g cm $^{-2}$
E_c	Critical energy for electrons	MeV
$E_{\mu c}$	Critical energy for muons	GeV
E_s	Scale energy $\sqrt{4\pi/\alpha} m_e c^2$	21.2052 MeV
R_M	Molière radius	g cm $^{-2}$

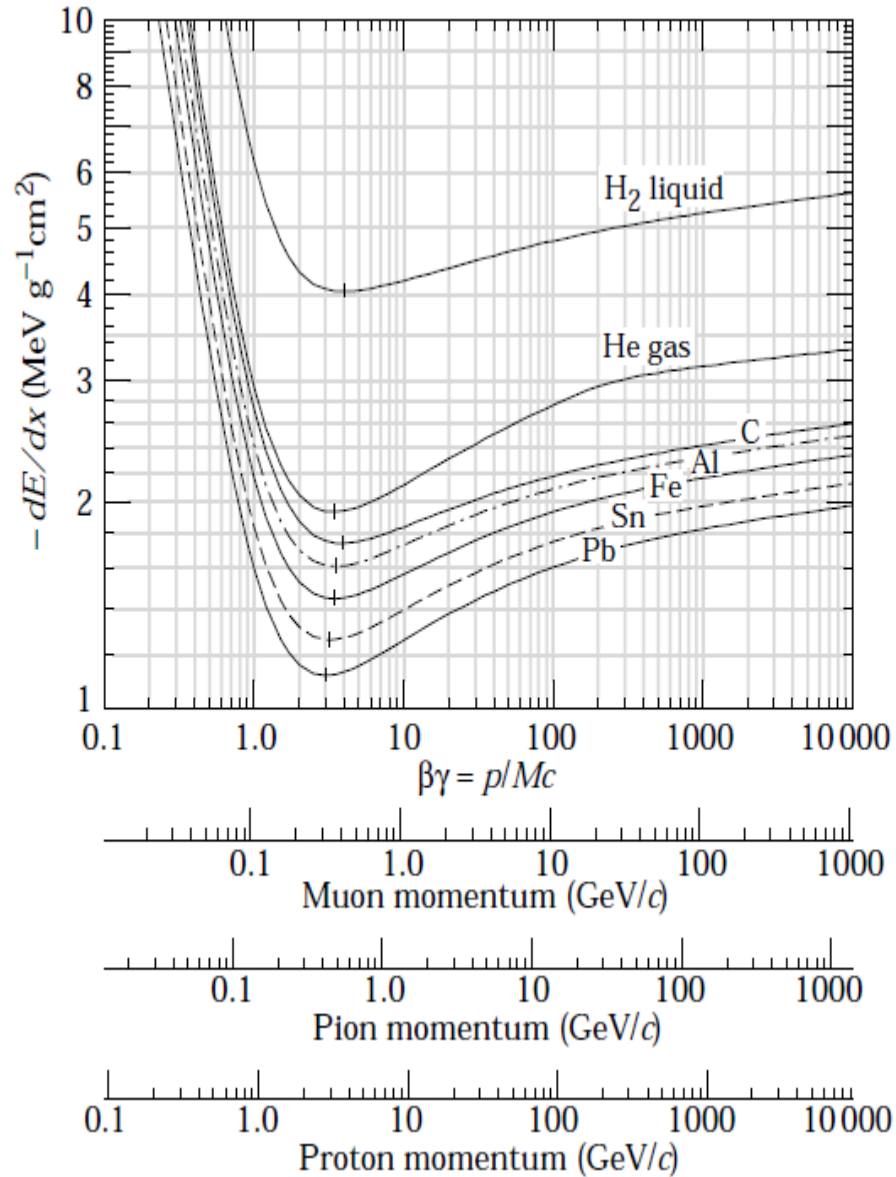
Energieverlust schwerer Teilchen



Reichweite/Dichte/Masse des Projektils

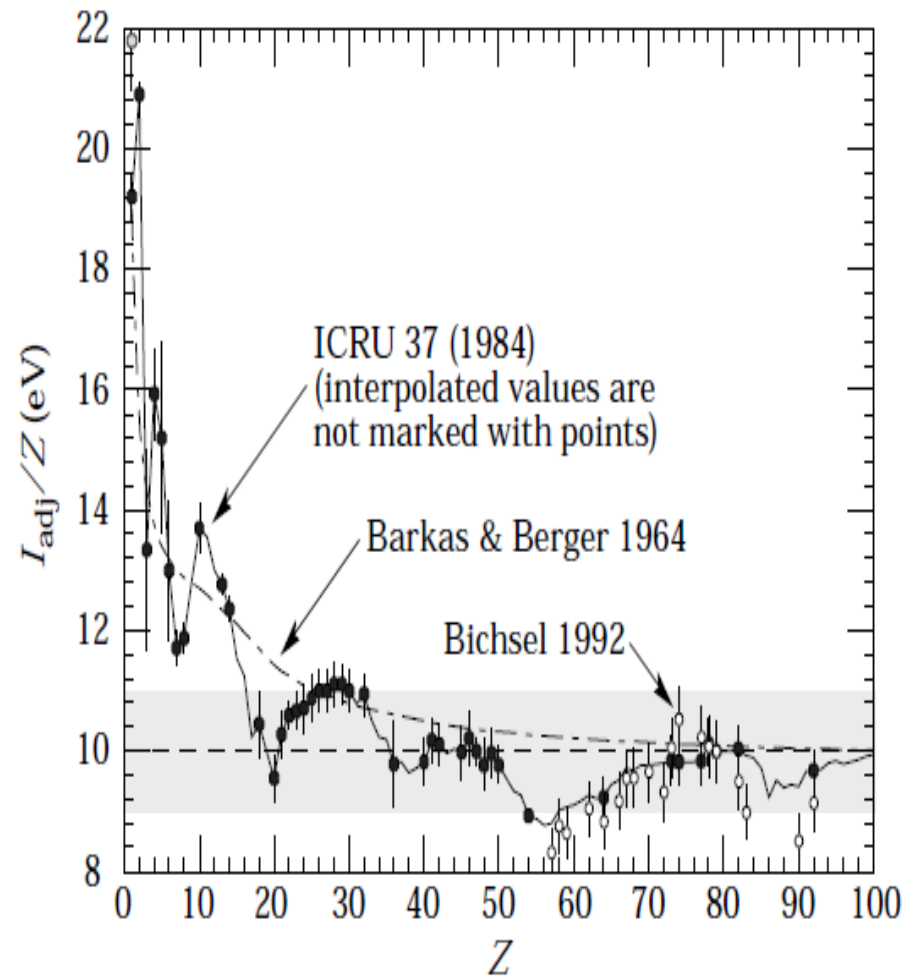


Bethe-Bloch-Kurven in unterschiedlichen Materialien

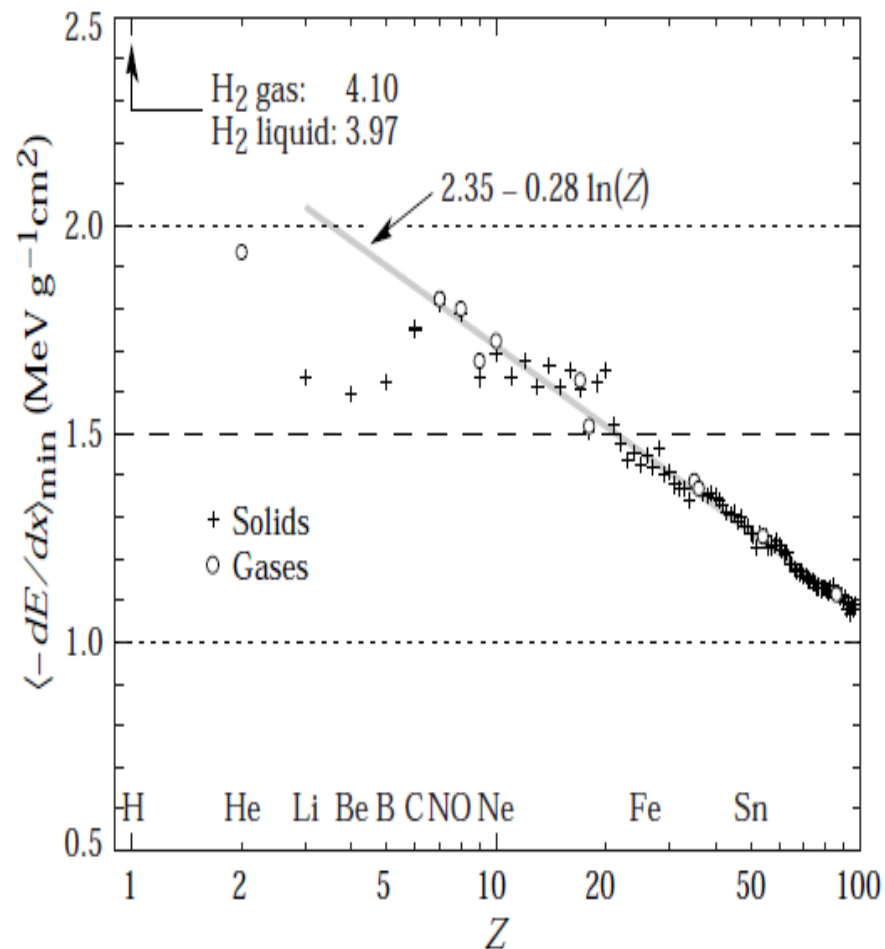


Materialanhänglichkeiten

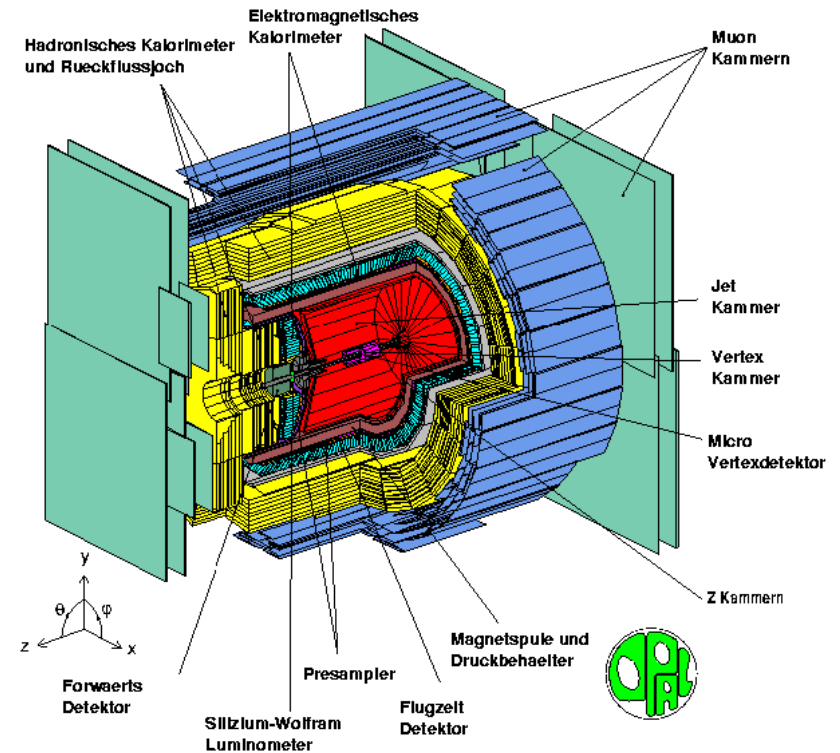
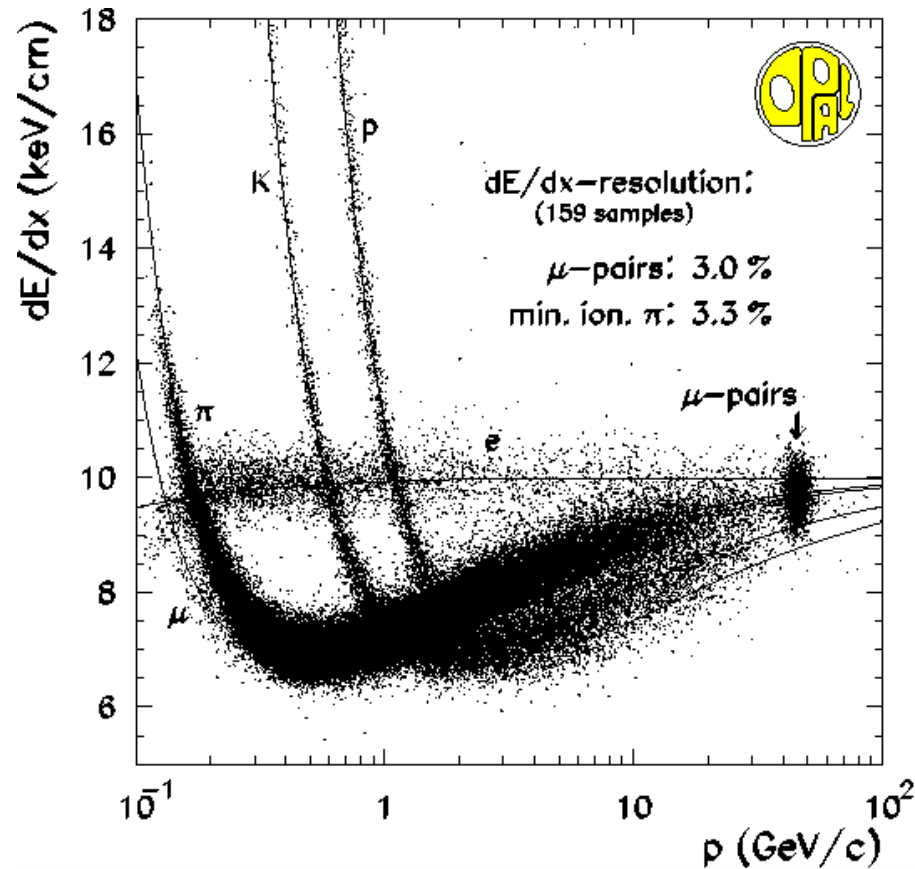
Mittlere Ionisationsenergie/Z



Minimales dE/dx



Teilchenidentifikation mittels dE/dx- vs Impuls-Messung



Landau-Verteilung für Häufigkeit von $-dE/dx$ in Einzelkollisionen

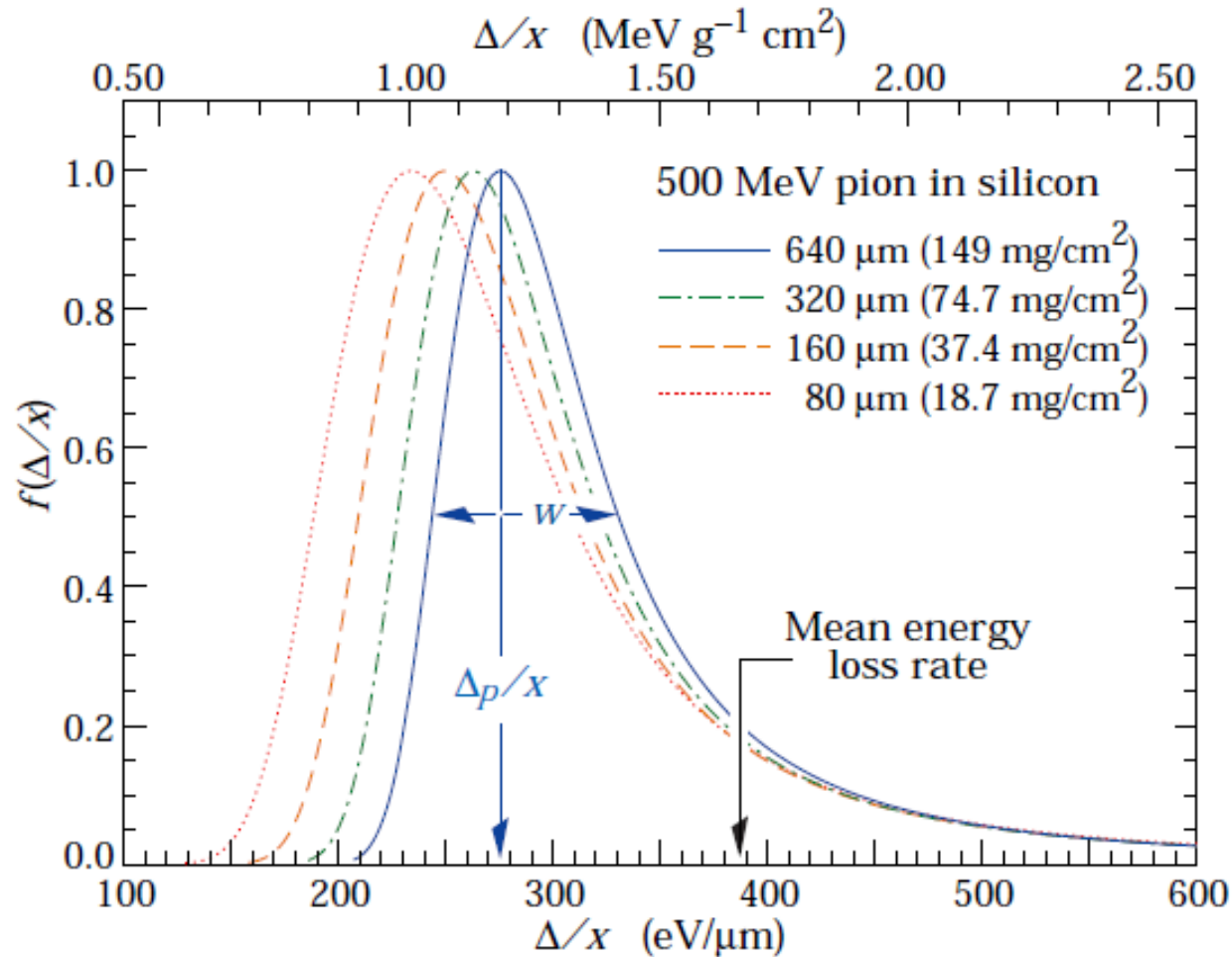


Figure 27.7: Straggling functions in silicon for 500 MeV pions, normalized to unity at the most probable value δ_p/x . The width w is the full width at half maximum.

Ionisationsverlust für Elektronen:

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi \frac{e^2 N_L}{m_e c^2} \rho \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2}.$$

$$\cdot \left[\ln \frac{\gamma m_e c^2 \beta \sqrt{\gamma - 1}}{\sqrt{2} \langle I \rangle} + \frac{1}{2}(1 - \beta^2) - \frac{2\gamma - 1}{2\gamma^2} \ln 2 + \frac{1}{16} \left(\frac{\gamma - 1}{\gamma} \right)^2 \right]$$

Bethe Bloch Formel **gilt nicht für Elektronen**

(gleiche Massen, ununterscheidbare Teilchen)

Cherenkovstrahlung: Polarisation des Mediums

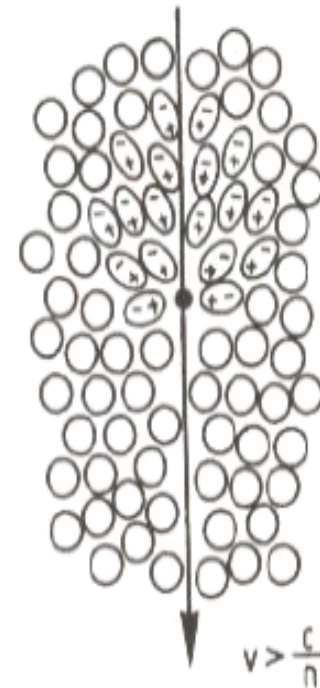


Teilchen polarisiert das Medium

$$v_{\text{Pol}} = c/n > v$$

→ symmetrisch in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung

→ kein resultierendes Dipolmoment

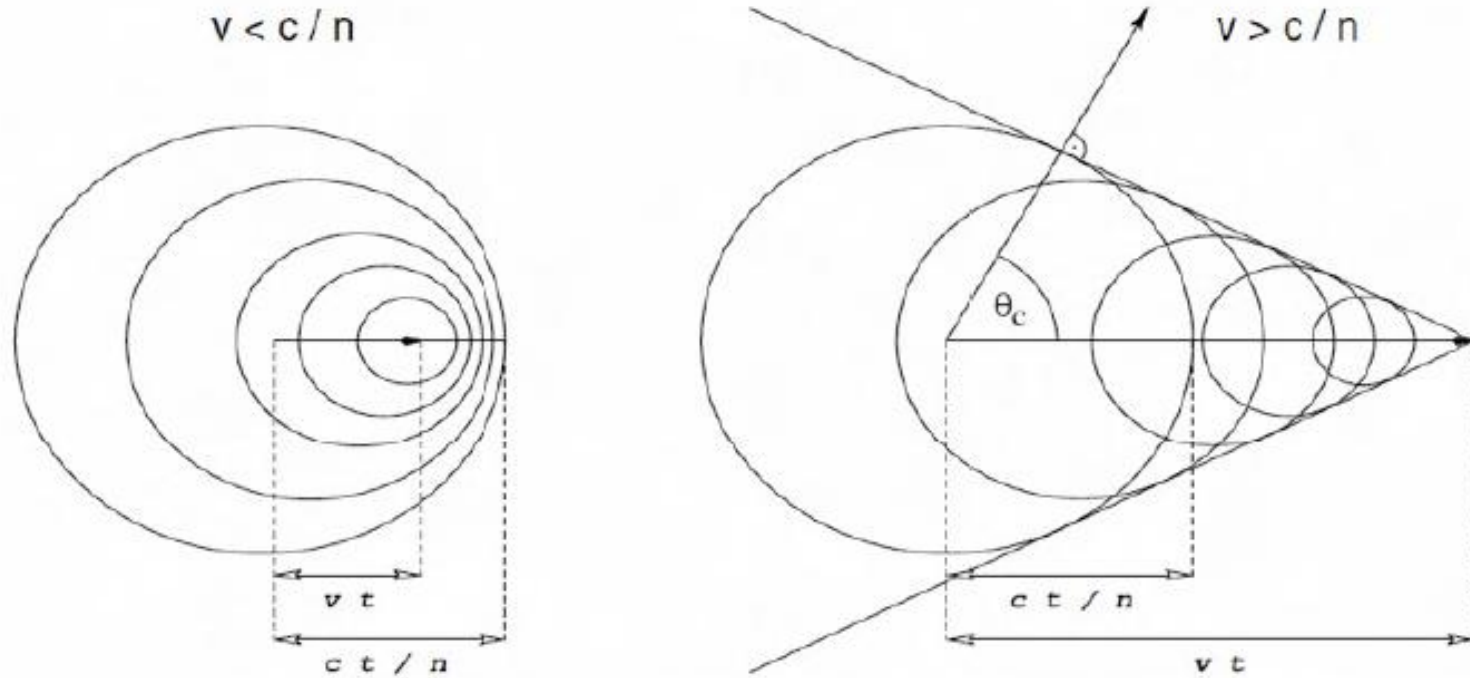


Atome in Rückwärtsrichtung bleiben polarisiert,
keine Polarisation in Vorwärtsrichtung

→ resultierendes Dipolmoment am Ort des Teilchens

→ el. magn. Strahlung

Cherenkovstrahlung: Abstrahlung in Kegel



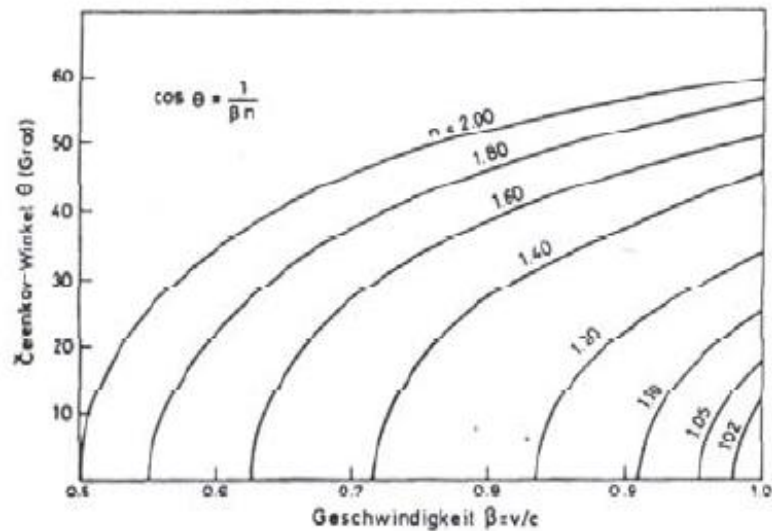
- Abstrahlung von Photonen, wenn ein geladenes Teilchen schneller ist als die Lichtgeschwindigkeit im Medium: Konstruktive Interferenz

Abstrahlung unter einem charakteristischen Winkel:

$$\cos\theta_c = \frac{ct/n}{vt} = \frac{1}{n\beta}$$

Wellenlängen-Maximum
im UV-Bereich

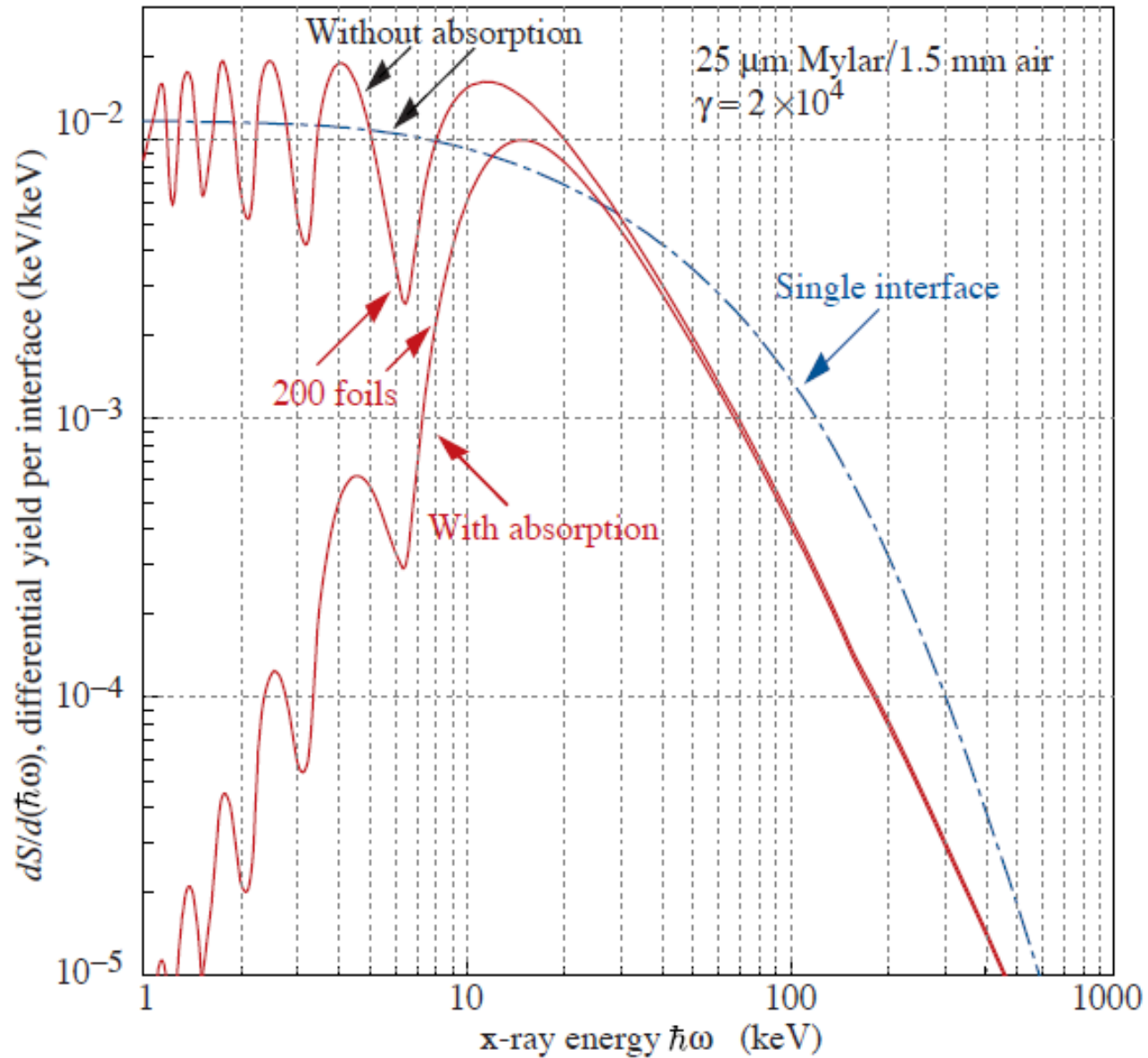
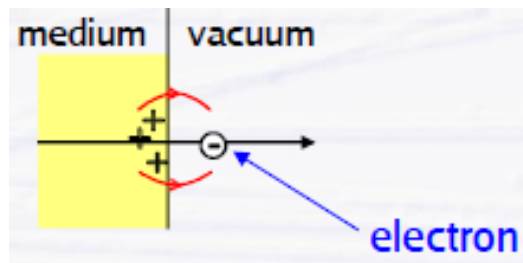
Cherenkovstrahlung: Polarisation des Mediums



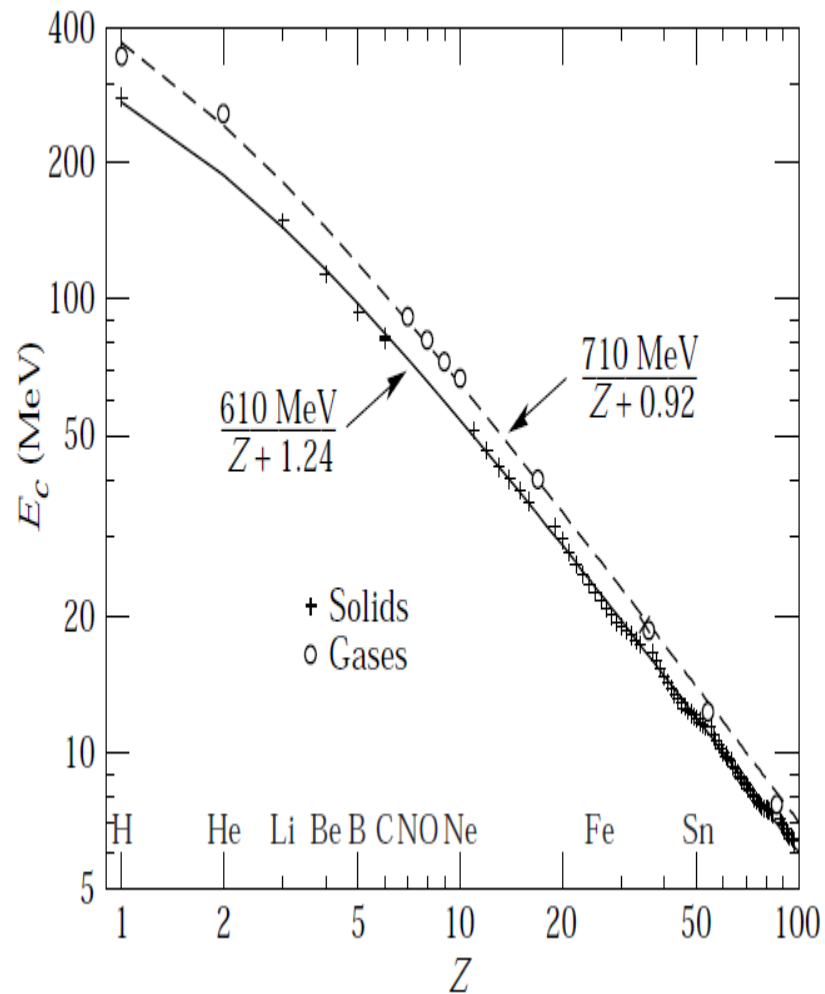
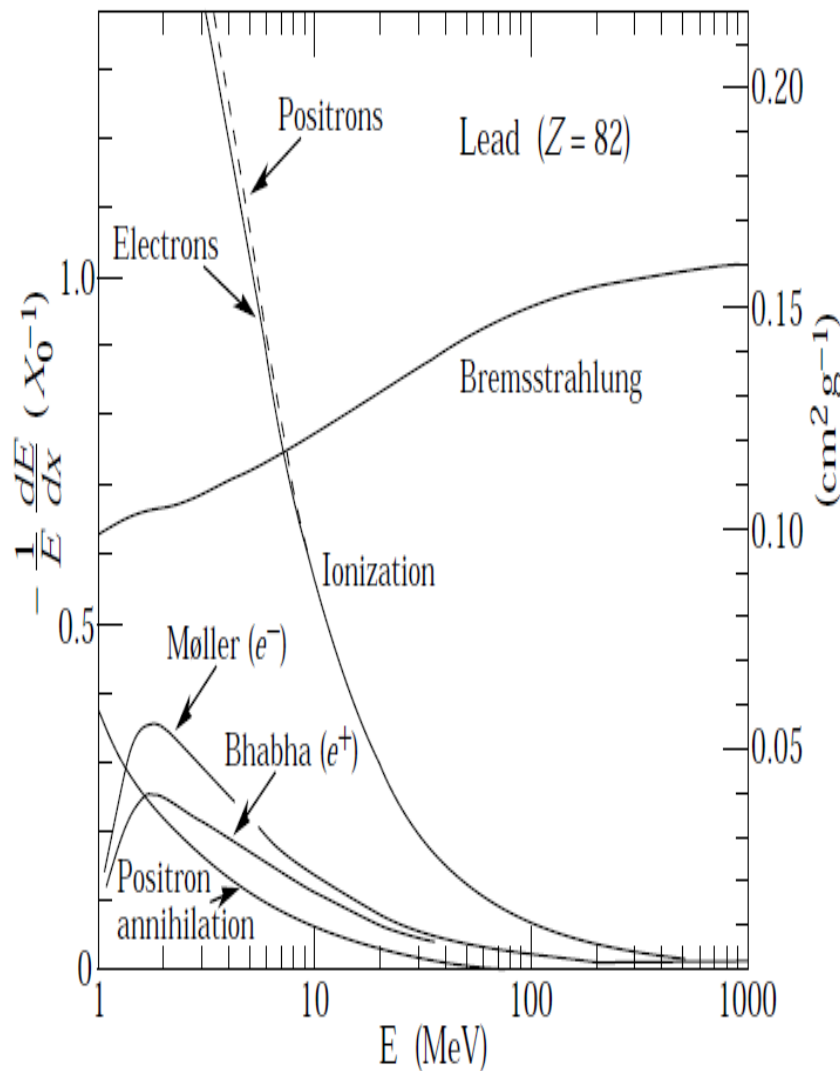
Material	$n - 1$	β -Schwelle	γ -Schwelle
festes Natrium	3.22	0.24	1.029
Bleisulfid	2.91	0.26	1.034
Diamant	1.42	0.41	1.10
Zinksulfid ($ZnS(Ag)$)	1.37	0.42	1.10
Silberchlorid	1.07	0.48	1.14
Flintglas (SFS1)	0.92	0.52	1.17
Bleifluorid	0.80	0.55	1.20
Clerici-Lösung	0.69	0.59	1.24
Bleiglas	0.67	0.60	1.25
Thalliumformiat-Lösung	0.59	0.63	1.29
Szintillator	0.58	0.63	1.29
Plexiglas	0.48	0.66	1.33
Borsilikatglas	0.47	0.68	1.36
Wasser	0.33	0.75	1.52
Aerogel	0.025 - 0.075	0.93 - 0.976	4.5 - 2.7
Pentan (STP)	$1.7 \cdot 10^{-3}$	0.9983	17.2
CO_2 (STP)	$4.3 \cdot 10^{-4}$	0.9996	34.1
Luft (STP)	$2.93 \cdot 10^{-4}$	0.9997	41.2
H_2 (STP)	$1.4 \cdot 10^{-4}$	0.99986	59.8
He (STP)	$3.3 \cdot 10^{-5}$	0.99997	123

Tabelle 6.2: Cherenkov-Radiatoren [94, 32, 313]. Der Brechungsindex für Gase bezieht sich auf $0^\circ C$ und 1 atm (STP). Festes Natrium ist für Wellenlängen unterhalb von 2000 \AA transparent [373, 209].

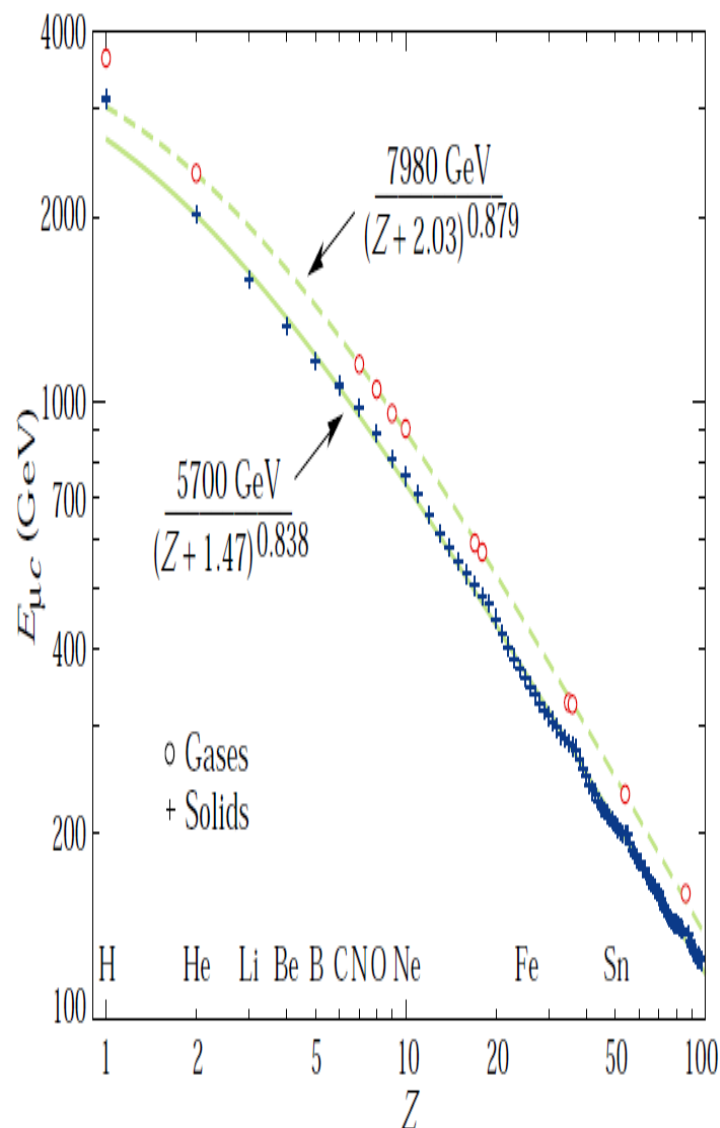
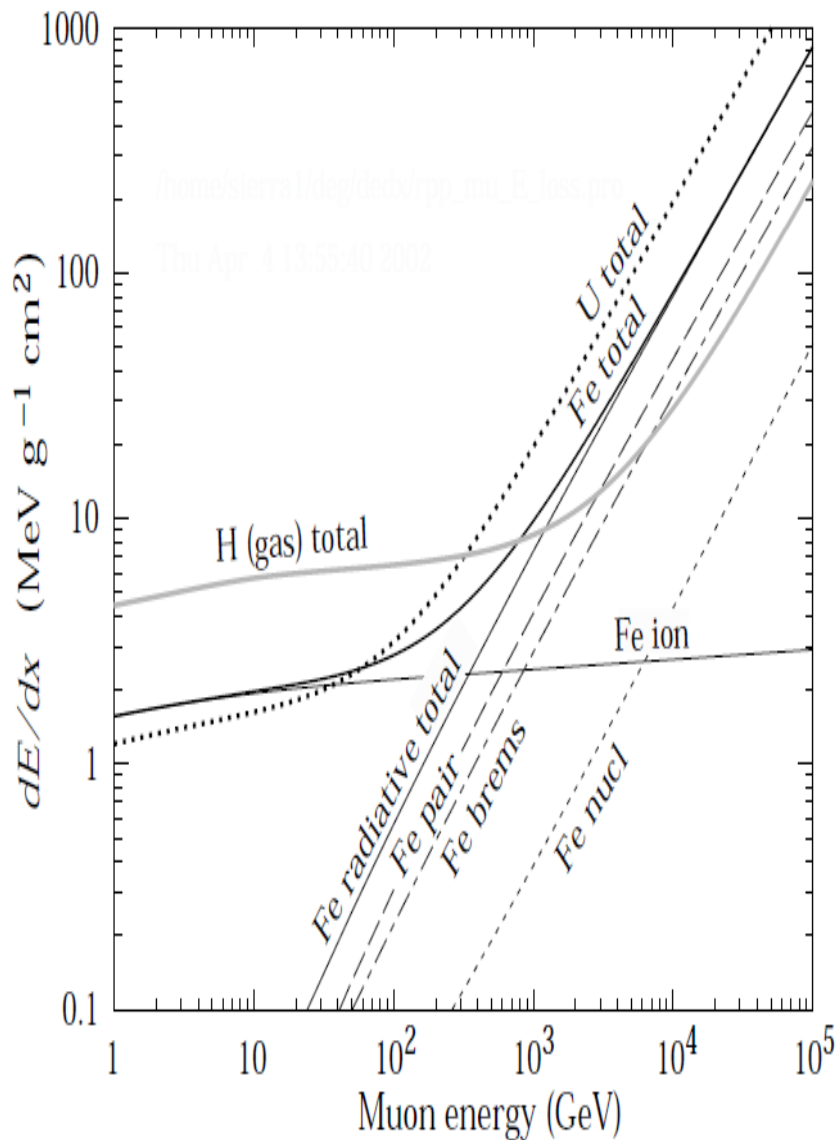
Übergangsstrahlung: Photonenergiespektrum



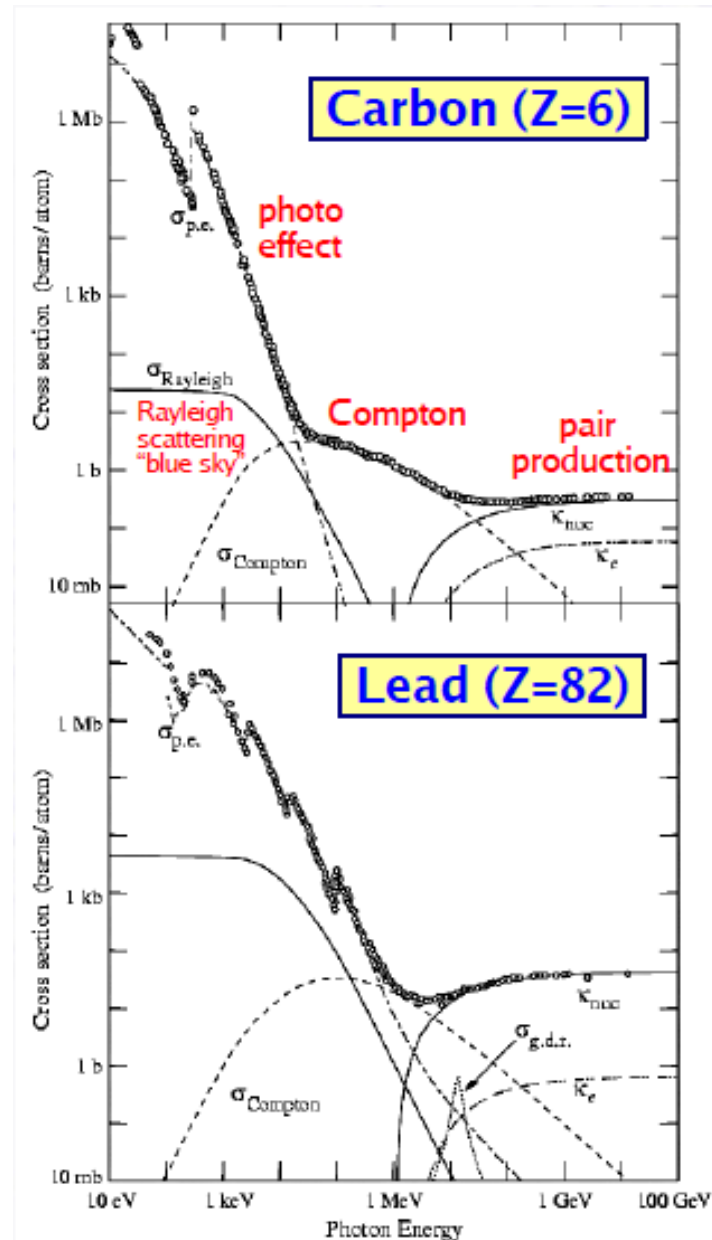
Bremsstrahlung für Elektronen und kritische Energie



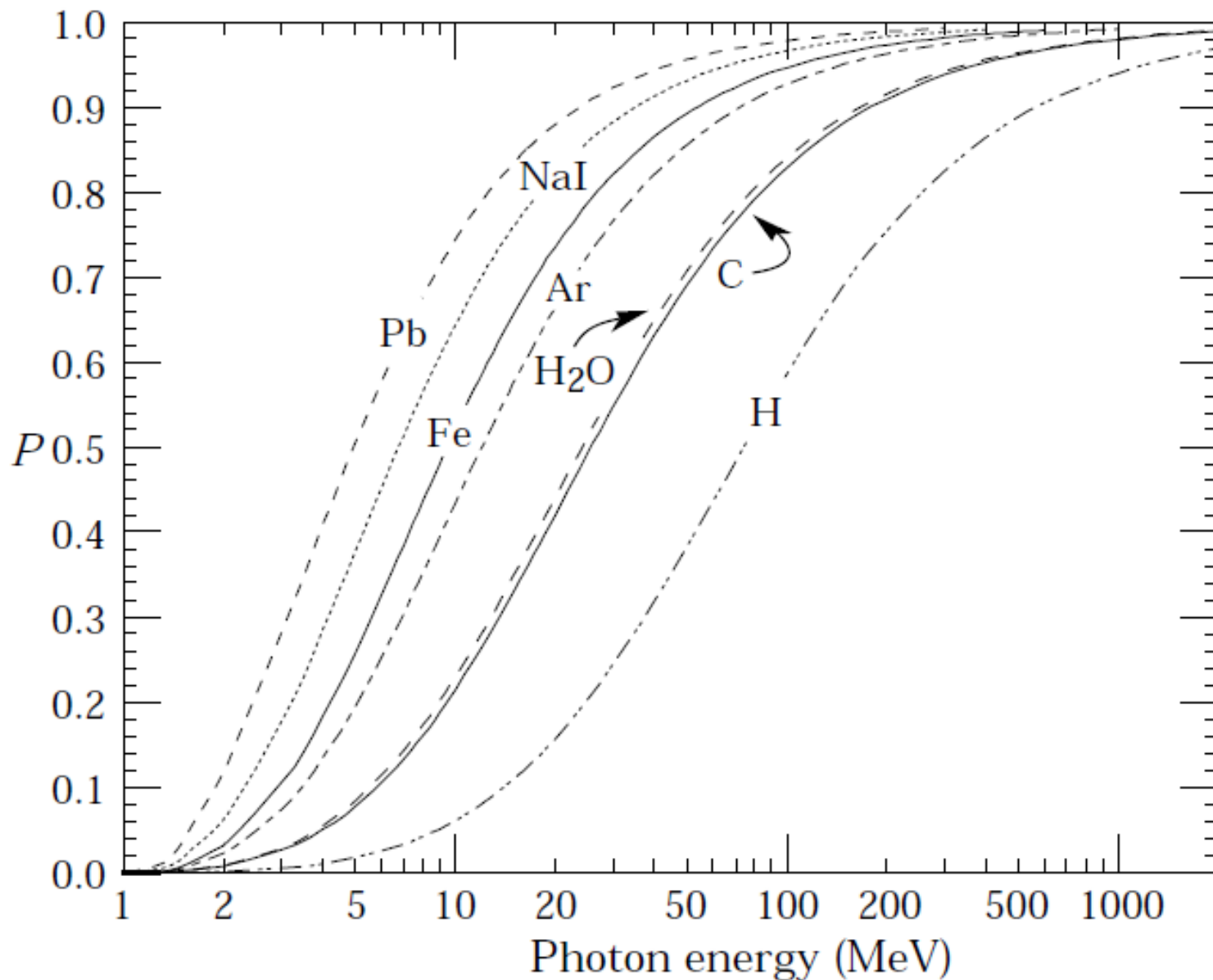
Bremsstrahlung von Myonen und kritische Energie



Wechselwirkung von Photonen mit Materie



Anteil von Paarbildung an Wechselwirkung von Photonen mit Materie



Materialabhängigkeit:

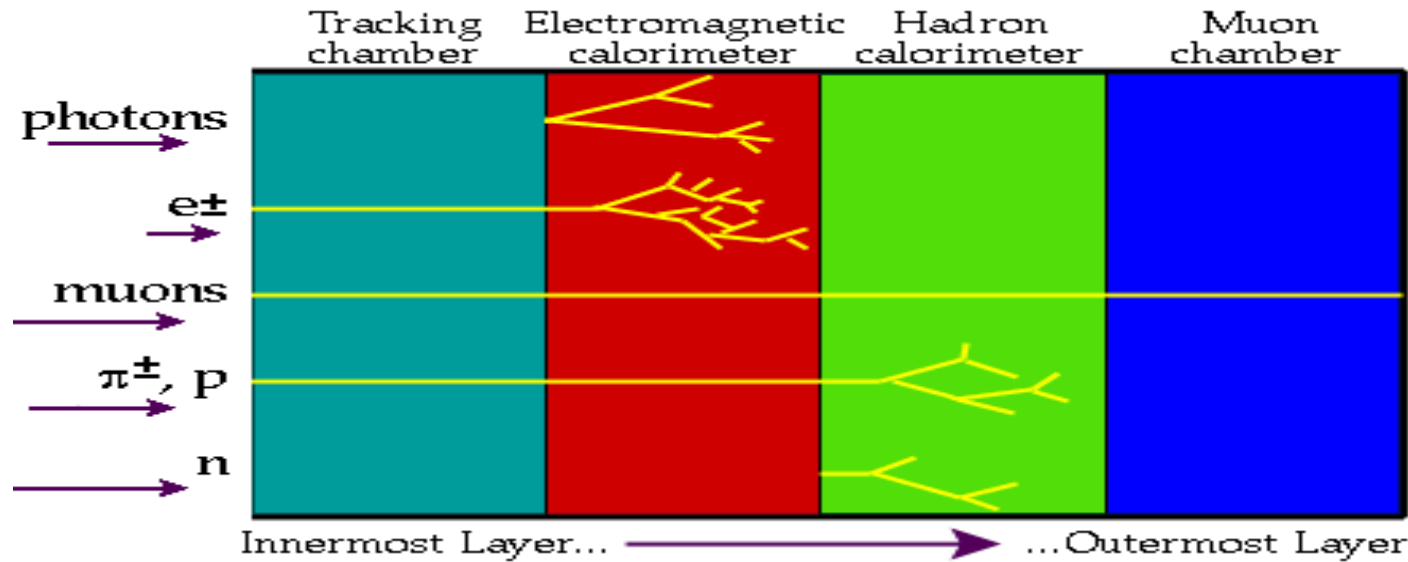
Material	Z	A	$X_0[g/cm^2]$	$X_0/\rho [cm]$	$E_c[MeV]$
Wasserstoff	1	1.01	63	700000	350
Helium	2	4.00	94	530000	250
Lithium	3	6.94	83	156	180
Kohlenstoff	6	12.01	43	18.8	90
Stickstoff	7	14.01	38	30500	85
Sauerstoff	8	16.00	34	24000	75
Aluminium	13	26.98	24	8.9	40
Silizium	14	28.09	22	9.4	39
Eisen	26	55.85	13.9	1.76	20.7
Kupfer	29	63.55	12.9	1.43	18.8
Silber	47	109.9	9.3	0.89	11.9
Wolfram	74	183.9	6.8	0.35	8.0
Blei	82	207.2	6.4	0.56	7.40
Luft	7.3	14.4	37	30000	84
SiO ₂	11.2	21.7	27	12	57
Wasser	7.5	14.2	36	36	83

Charakteristische Größen von Materialien

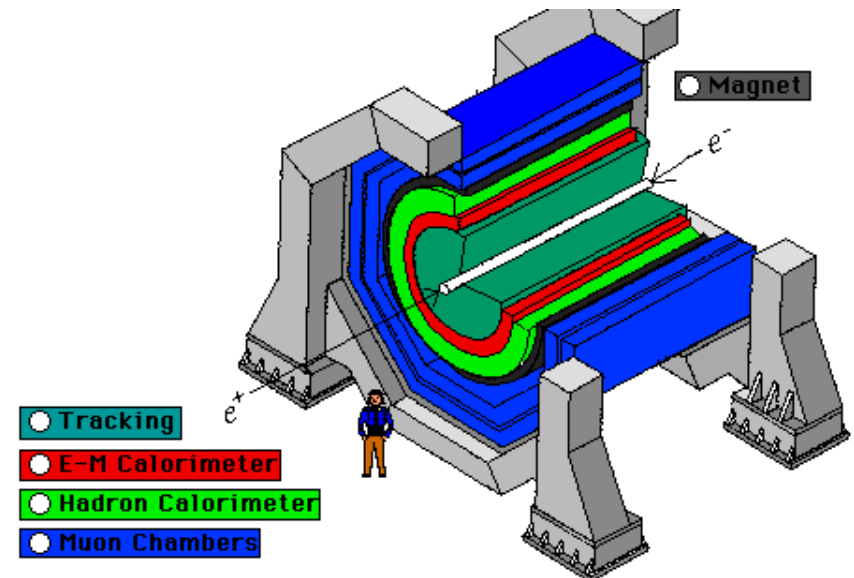
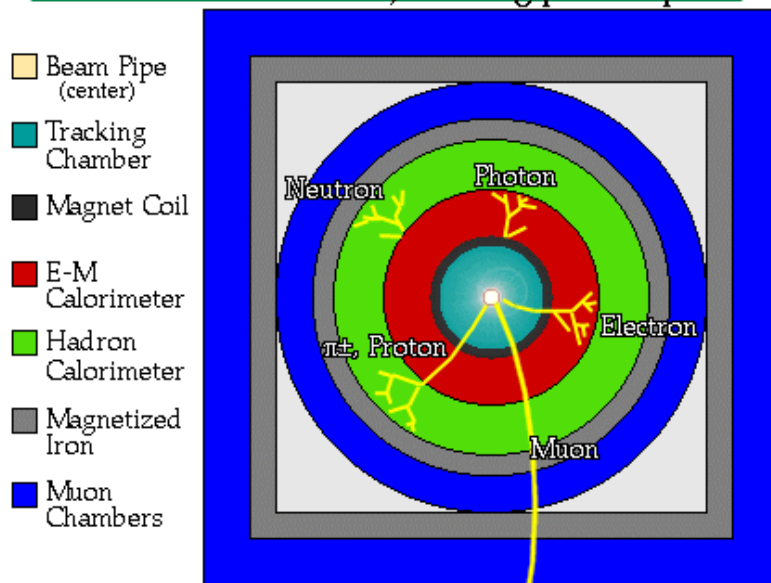
Table 6.1 Abridged from pdg.lbl.gov/AtomicNuclearProperties by D. E. Groom (2007). See web pages for more detail about entries in this table including chemical formulae, and for several hundred other entries. Quantities in parentheses are for NTP (20°C and 1 atm), and square brackets indicate quantities evaluated at STP. Boiling points are at 1 atm. Refractive indices n are evaluated at the sodium D line blend (589.2 nm); values $\gg 1$ in brackets are for $(n - 1) \times 10^6$ (gases).

Material	Z	A	(Z/A)	Nucl.coll. length λ_T [g cm ⁻²]	Nucl.inter. length λ_I [g cm ⁻²]	Rad.len. X_0 [g cm ⁻²]	$dE/dx _{min}$ { MeV g ⁻¹ cm ² }	Density [g cm ⁻³] { (g ^t -1) }	Melting point (K)	Boiling point (K)	Refract. index (@ Na D)
H ₂	1	1.00794(7)	0.99212	42.8	52.0	63.04	(4.103)	0.071(0.084)	13.81	20.28	1.11[132]
D ₂	1	2.01410177803(8)	0.49650	51.3	71.8	125.97	(2.053)	0.109(0.168)	18.7	23.65	1.11[138]
He	2	4.002602(2)	0.49907	51.8	71.0	94.32	(1.937)	0.125(0.160)	4.220	102[35.0]	
Li	3	6.941(2)	0.43221	52.2	71.3	82.78	1.639	0.534	453.0	1615.	
Be	4	9.012182(3)	0.44384	55.3	77.8	65.19	1.595	1.848	1560.	2744.	
C diamond	6	12.0107(8)	0.49955	59.2	85.8	42.70	1.725	3.520			2.42
C graphite	6	12.0107(8)	0.49955	59.2	85.8	42.70	1.742	2.210			
N ₂	7	14.0067(2)	0.49976	61.1	89.7	37.99	(1.825)	0.807(1.165)	63.15	77.29	1.20[298]
O ₂	8	15.9994(3)	0.50002	61.3	90.2	34.24	(1.801)	1.141(1.332)	54.36	90.20	1.22[271]
F ₂	9	18.9984032(5)	0.47372	65.0	97.4	32.93	(1.676)	1.507(1.580)	53.53	85.03	[195]
Ne	10	20.1797(6)	0.49555	65.7	99.0	28.93	(1.724)	1.204(0.839)	24.56	27.07	1.09[67.1]
Al	13	26.9815386(8)	0.48181	69.7	107.2	24.01	1.615	2.699	933.5	2792.	
Si	14	28.0855(3)	0.49848	70.2	108.4	21.82	1.604	2.329	1687.	3538.	3.95
Cl ₂	17	35.453(2)	0.47951	73.8	115.7	19.28	(1.630)	1.574(2.980)	171.6	239.1	[773]
Ar	18	39.948(1)	0.45059	75.7	119.7	19.55	(1.519)	1.396(1.662)	83.81	87.26	1.23[281]
Ti	22	47.867(1)	0.45961	78.8	126.2	16.16	1.477	4.540	1941.	3500.	
Fe	26	55.845(2)	0.46557	81.7	132.1	13.84	1.451	7.874	1811.	3134.	
Cu	29	63.546(3)	0.45636	84.2	137.3	12.86	1.403	8.960	1358.	2835.	
Ge	32	72.64(1)	0.44053	86.9	143.0	12.25	1.370	5.323	1211.	3106.	
Sn	50	118.710(7)	0.42119	98.2	166.7	8.82	1.263	7.310	505.1	2875.	
Xe	54	131.293(6)	0.41129	100.8	172.1	8.48	(1.255)	2.953(5.483)	161.4	165.1	1.39[701]
W	74	183.84(1)	0.40252	110.4	191.9	6.76	1.145	19.300	3695.	5828.	
Pt	78	195.084(9)	0.39983	112.2	195.7	6.54	1.128	21.450	2042.	4098.	
Au	79	196.966569(4)	0.40108	112.5	196.3	6.46	1.134	19.320	1337.	3129.	
Pb	82	207.2(1)	0.39575	114.1	199.6	6.37	1.122	11.350	600.6	2022.	
U	92	[238.02891(3)]	0.38651	118.6	209.0	6.00	1.081	18.950	1408.	4404.	
Air (dry, 1 atm)			0.49919	61.3	90.1	36.62	(1.815)	(1.205)		78.80	
Shielding concrete			0.50274	65.1	97.5	26.57	1.711	2.300			
Borosilicate glass (Pyrex)			0.49707	64.6	96.5	28.17	1.696	2.230			
Lead glass			0.42101	95.9	158.0	7.87	1.255	6.220			
Standard rock			0.50000	66.8	101.3	26.54	1.688	2.650			
Methane (CH ₄)			0.62334	54.0	73.8	46.47	(2.417)	(0.667)	90.68	111.7	[444]
Ethane (C ₂ H ₆)			0.59861	55.0	75.9	45.66	(2.304)	(1.263)	90.36	184.5	
Propane (C ₃ H ₈)			0.58902	55.3	76.7	45.37	(2.262)	0.493(1.868)	85.52	231.0	
Butane (C ₄ H ₁₀)			0.59497	55.5	77.1	45.23	(2.278)	(2.489)	134.9	272.6	
Octane (C ₈ H ₁₈)			0.57778	55.8	77.8	45.00	2.123	0.703	214.4	398.8	
Paraffin (CH ₃ (CH ₂) _{n-23} CH ₃)			0.57275	56.0	78.3	44.85	2.088	0.930			
Nylon (type 6, 6/6)			0.54790	57.5	81.6	41.92	1.973	1.18			
Polycarbonate (Lexan)			0.52697	58.3	83.6	41.50	1.886	1.20			
Polyethylene ((CH ₂ CH ₂) _n)			0.57034	56.1	78.5	44.77	2.079	0.89			
Polyethylene terephthalate (Mylar)			0.52037	58.9	84.9	39.95	1.848	1.40			
Polyimide film (Kapton)			0.51264	59.2	85.5	40.58	1.820	1.42			
Polymethylmethacrylate (acrylic)			0.53937	58.1	82.8	40.55	1.929	1.19			1.49
Polypropylene			0.55998	56.1	78.5	44.77	2.041	0.90			
Polystyrene ((C ₆ H ₅ CHCH ₂) _n)			0.53768	57.5	81.7	43.79	1.936	1.06			1.59
Polytetrafluoroethylene (Teflon)			0.47992	63.5	94.4	34.84	1.671	2.20			
Polyvinyltoluene			0.54141	57.3	81.3	43.90	1.956	1.03			1.58
Aluminum oxide (sapphire)			0.49038	65.5	98.4	27.94	1.647	3.970	2327.	3273.	1.77
Barium fluoride (BaF ₂)			0.42207	90.8	149.0	9.91	1.303	4.893	1641.	2533.	1.47
Bismuth germanate (BGO)			0.42065	96.2	159.1	7.97	1.251	7.130	1317.		2.15
Carbon dioxide gas (CO ₂)			0.49989	60.7	88.9	36.20	1.819	(1.842)			[449]
Solid carbon dioxide (dry ice)			0.49989	60.7	88.9	36.20	1.787	1.563		Sublimes at 194.7 K	
Cesium iodide (CsI)			0.41569	100.6	171.5	8.39	1.243	4.510	894.2	1553.	1.79
Lithium fluoride (LiF)			0.46262	61.0	88.7	39.26	1.614	2.635	1121.	1946.	1.39
Lithium hydride (LiH)			0.50321	50.8	68.1	79.62	1.897	0.820	965.		
Lead tungstate (PbWO ₄)			0.41315	100.6	168.3	7.39	1.229	8.300	1403.		2.20
Silicon dioxide (SiO ₂ , fused quartz)			0.49930	65.2	97.8	27.05	1.699	2.200	1986.	3223.	1.46
Sodium chloride (NaCl)			0.55509	71.2	110.1	21.91	1.847	2.170	1075.	1738.	1.54
Sodium iodide (NaI)			0.42697	93.1	154.6	9.49	1.305	3.667	933.2	1577.	1.77
Water (H ₂ O)			0.55509	58.5	83.3	36.08	1.992	1.000(0.756)	273.1	373.1	1.33
Silica aerogel			0.50093	65.0	97.3	27.25	1.740	0.200		(0.03 H ₂ O, 0.97 SiO ₂)	

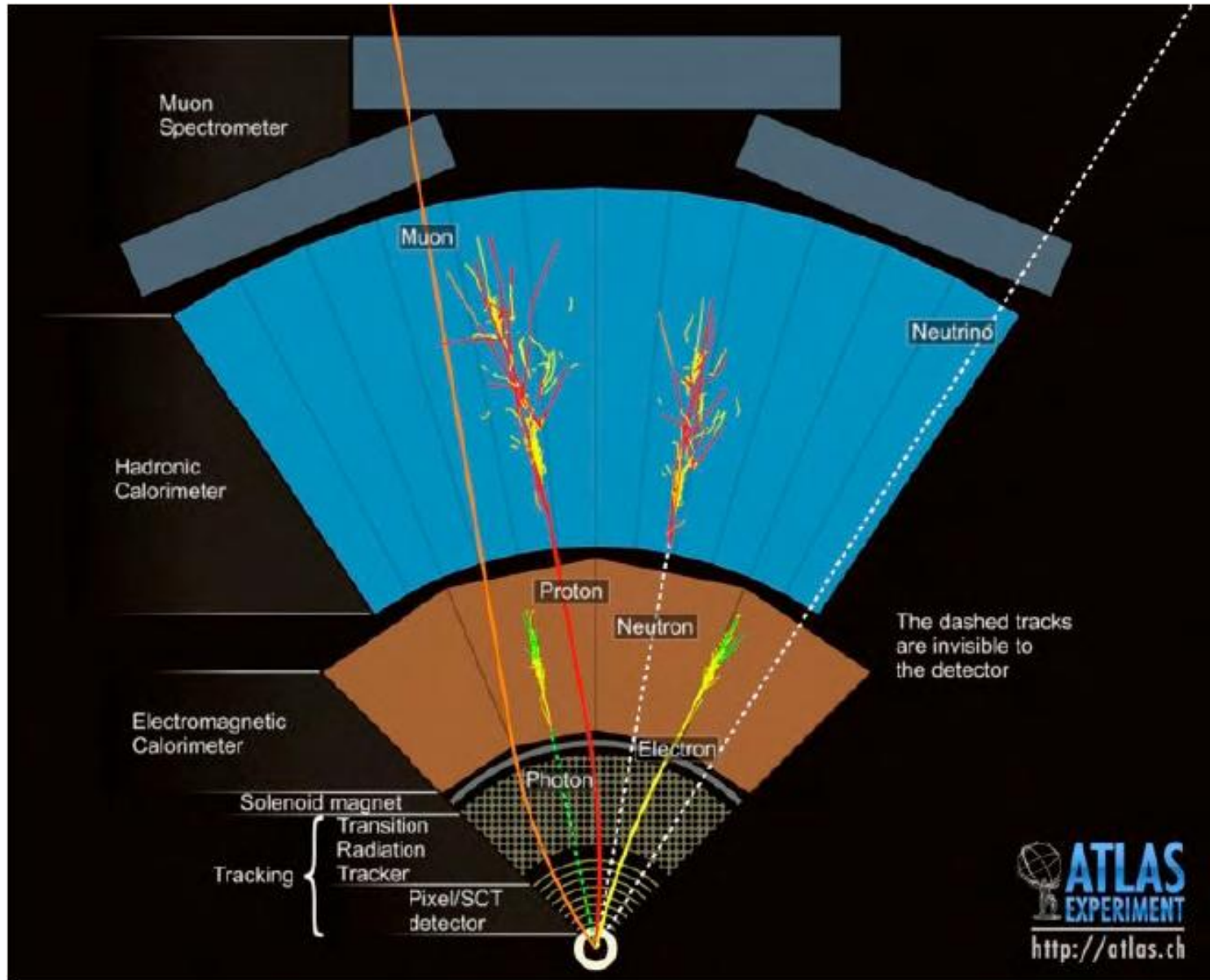
Prinzipieller Aufbau eines Kolliderdetektors



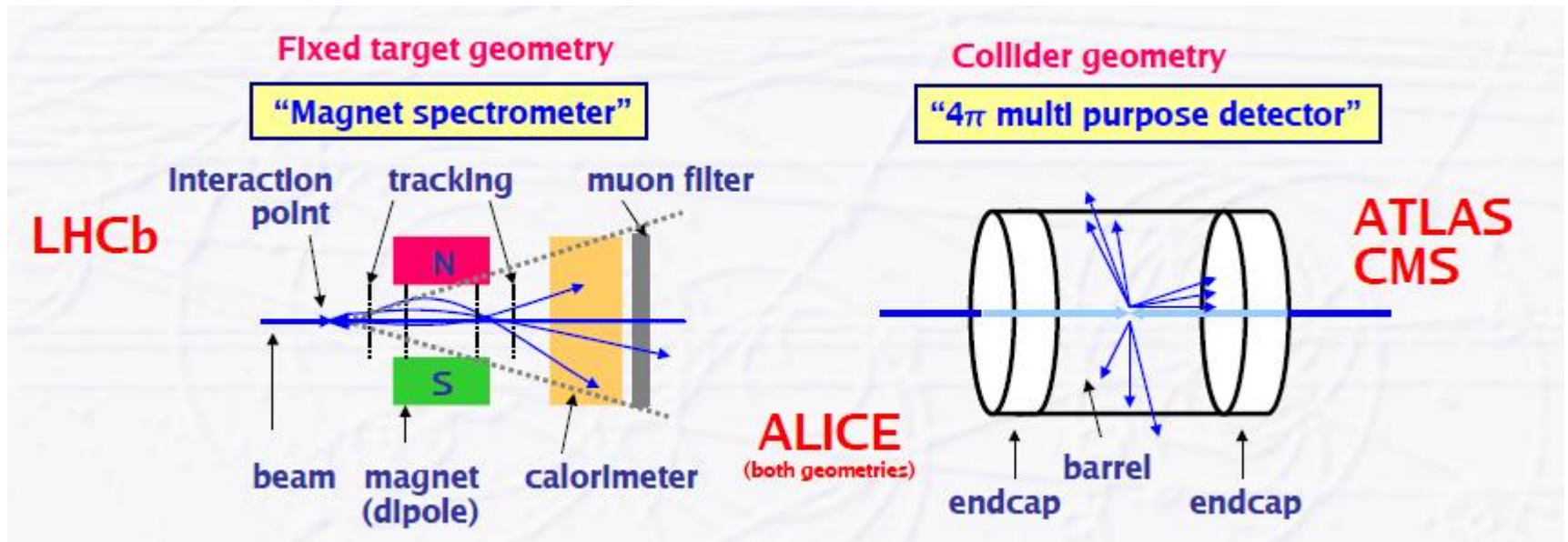
A detector cross-section, showing particle paths



Teilchenwechselwirkung im Kolliderdetektor

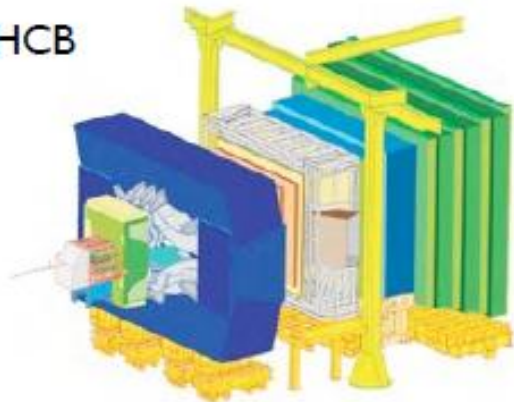


Fixed-Target und Kollider-Detektor



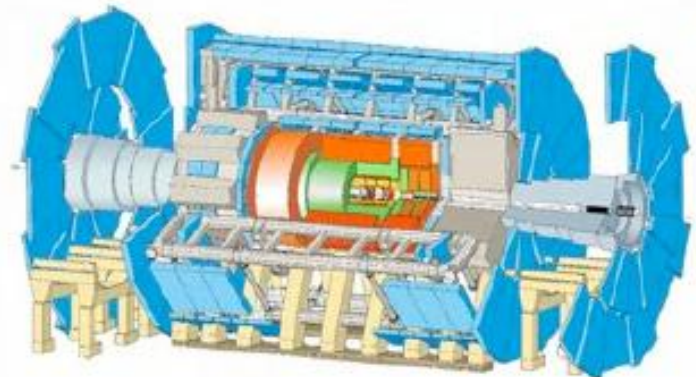
Fixed-Target Detector

LHCb

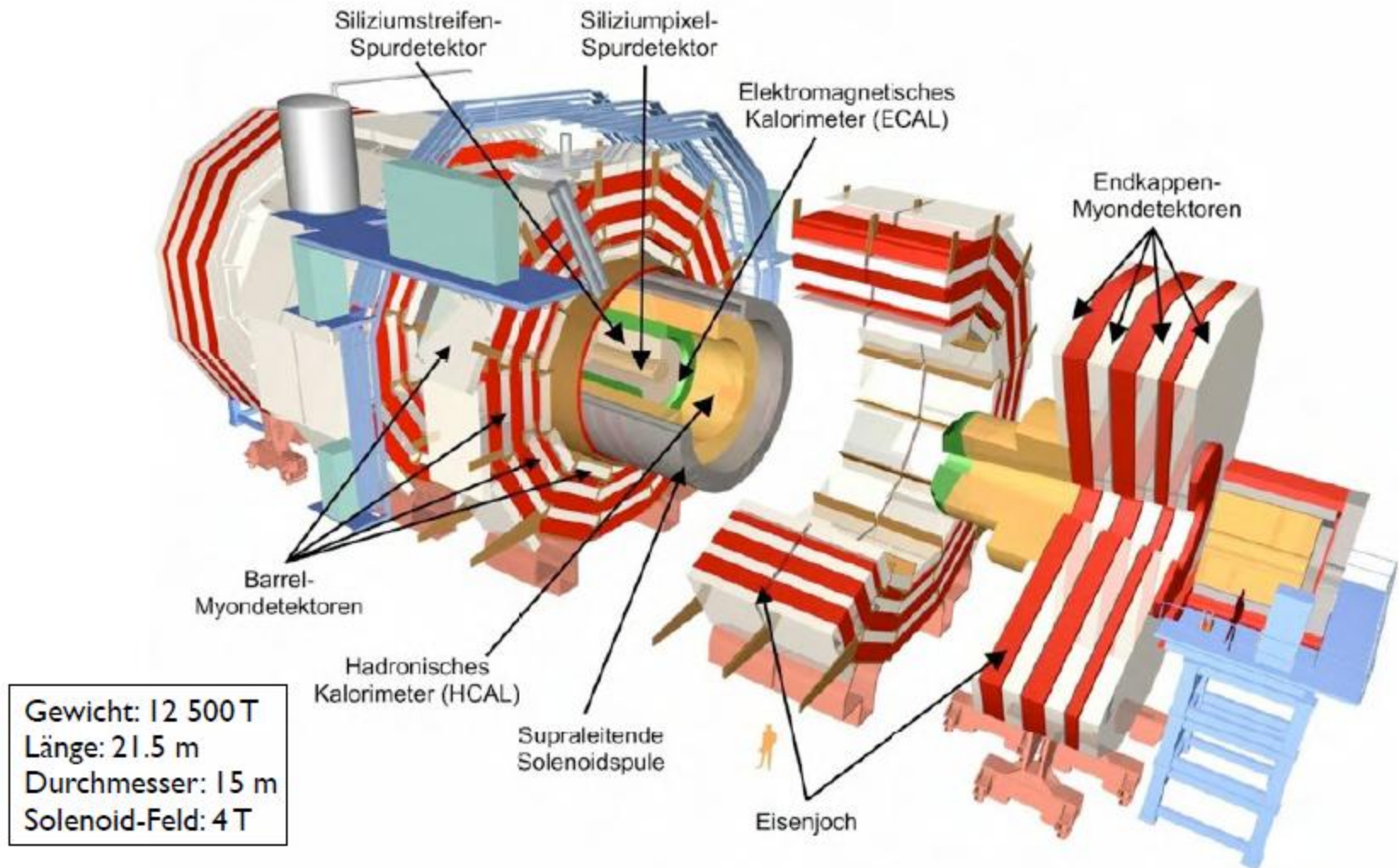


Collider Detector

ATLAS



Compact Muon Solenoid



Compact Myon Solenoid CMS

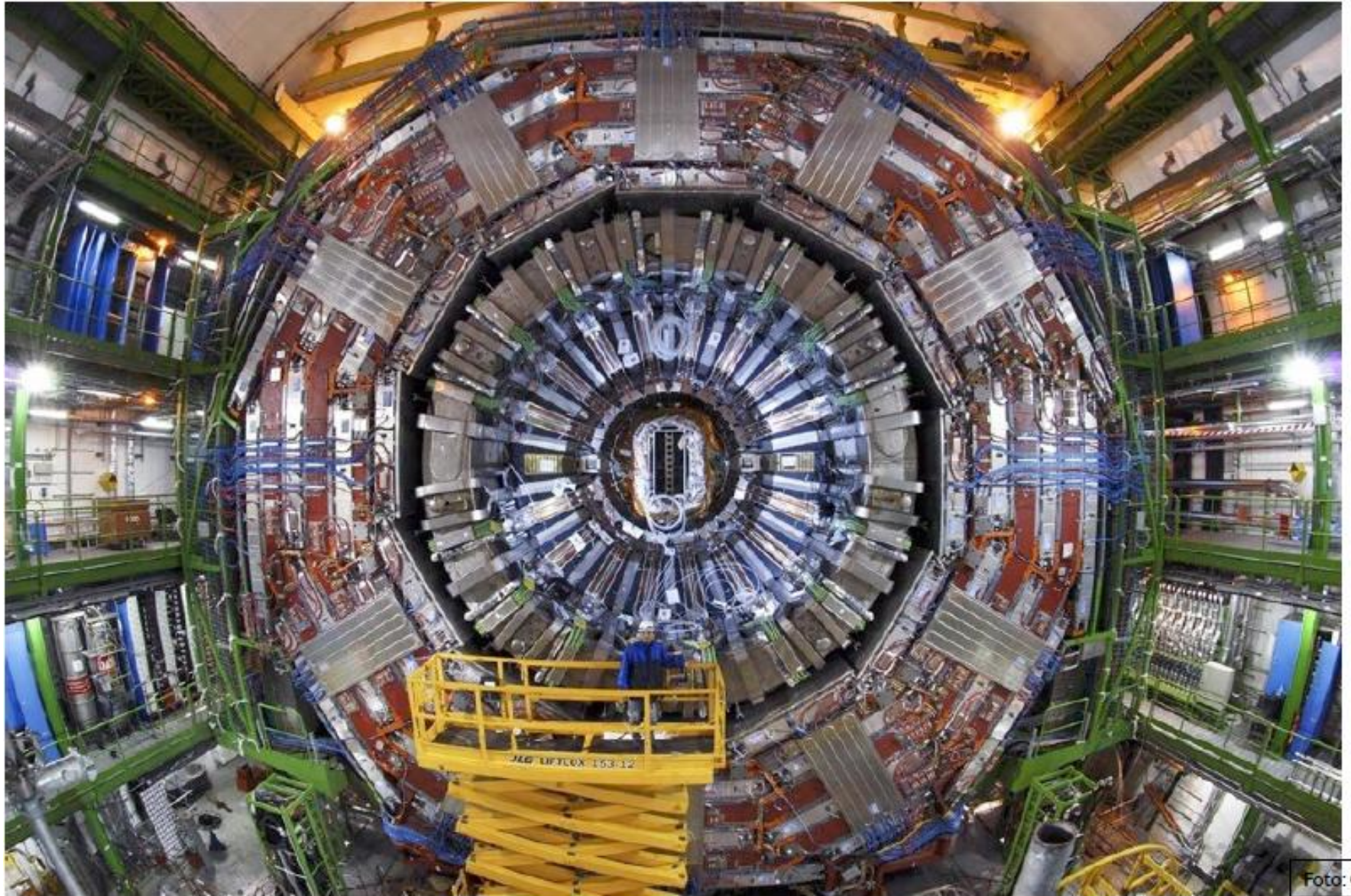
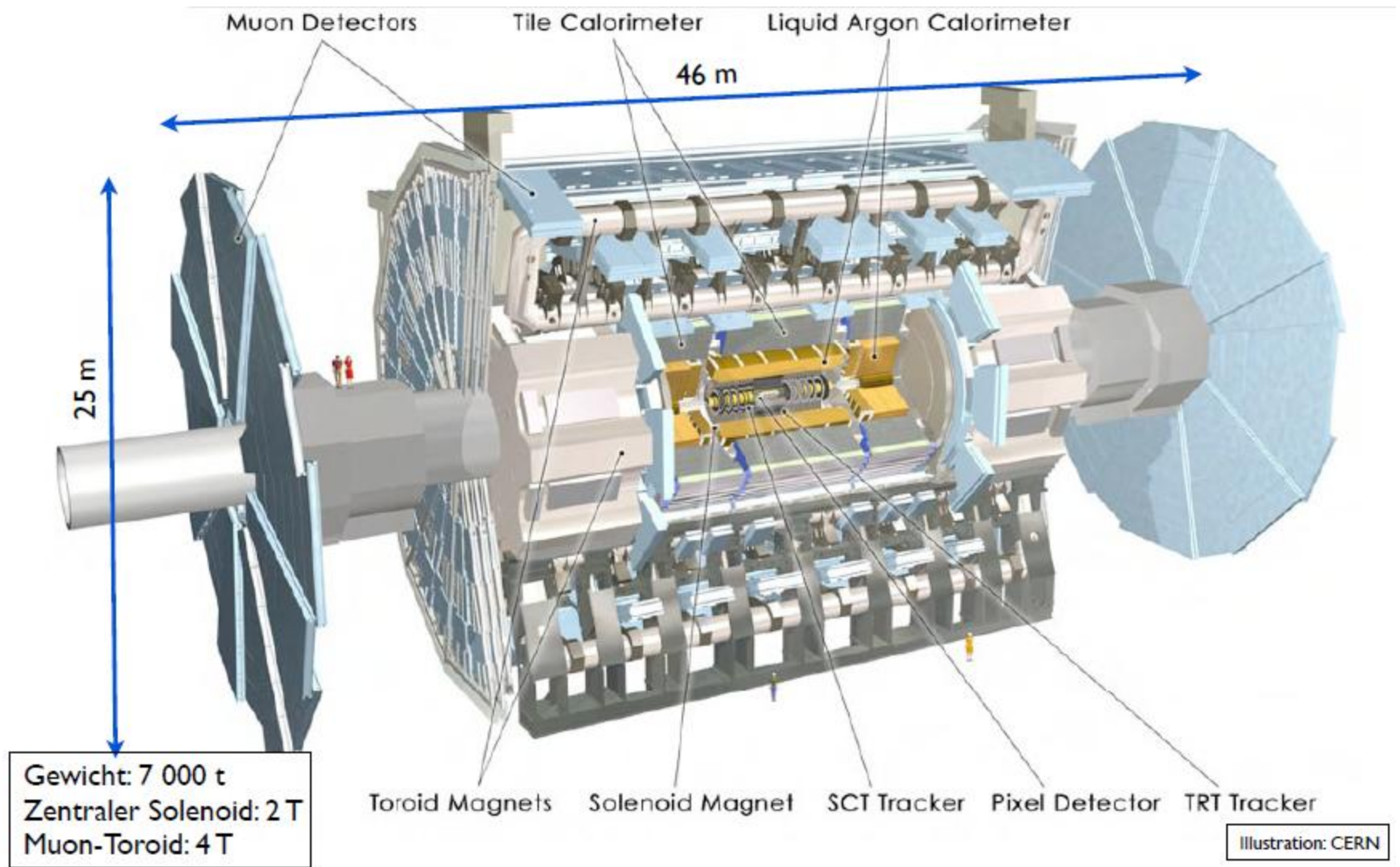


Foto: CERN

A Toridal LHC Apparatus ATLAS



A Toroidal LHC Apparatus ATLAS

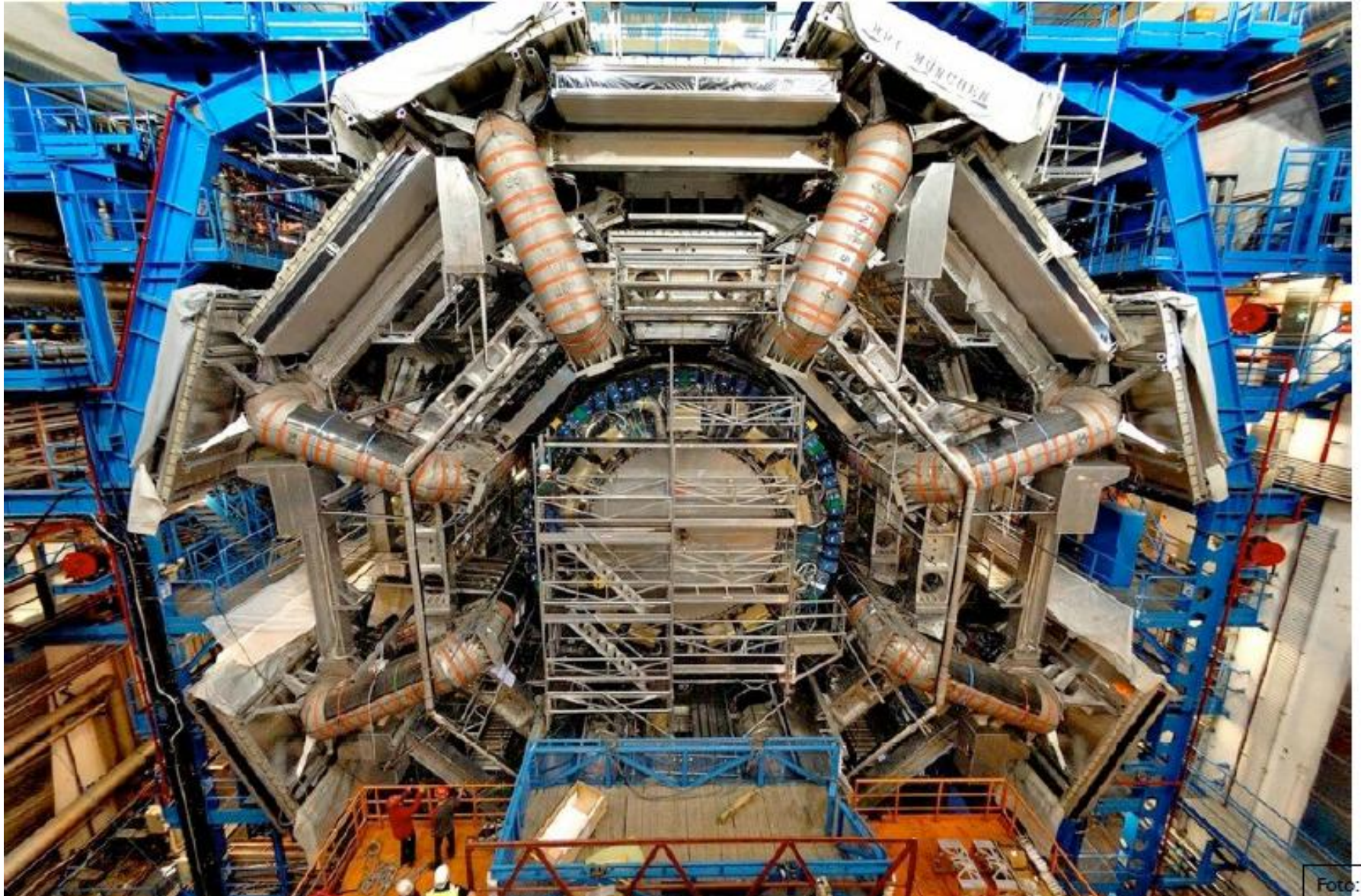
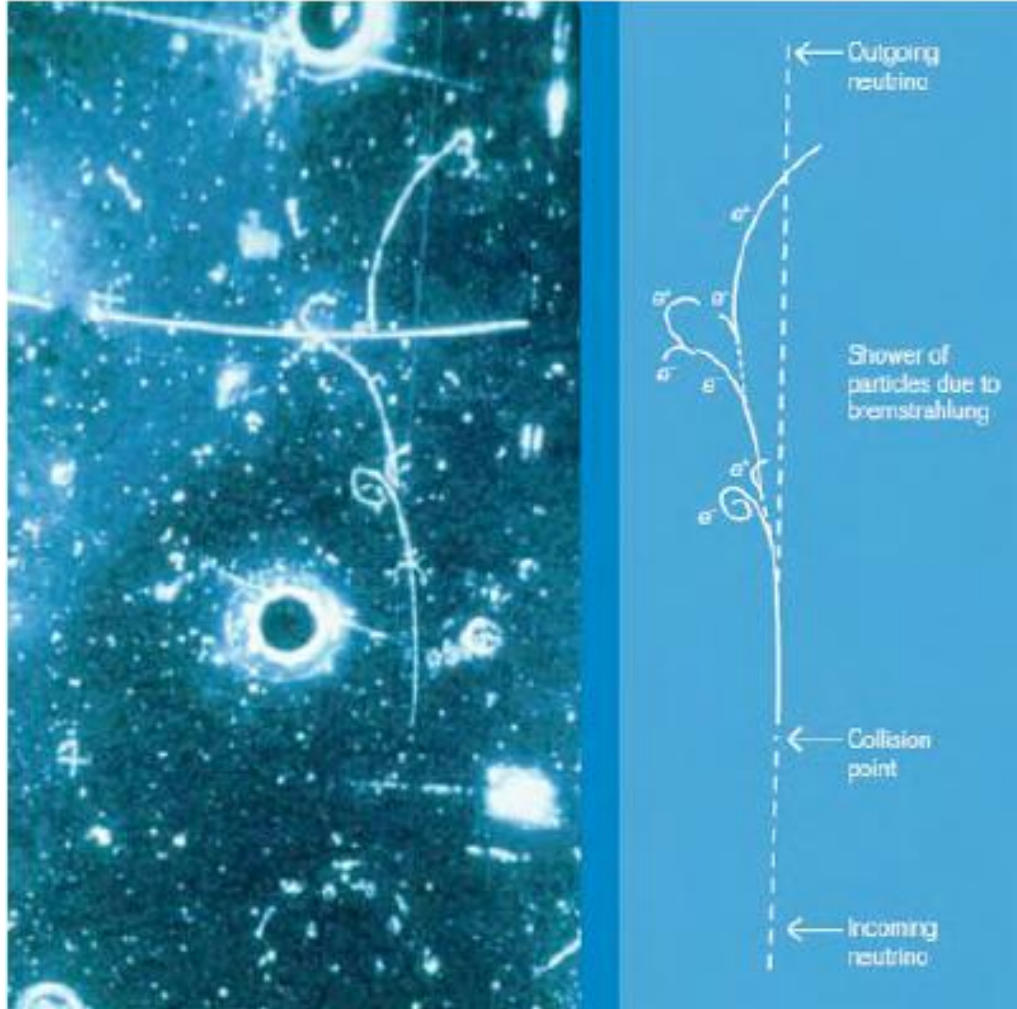


Foto: CERN

Ionisation in Blasenkammer

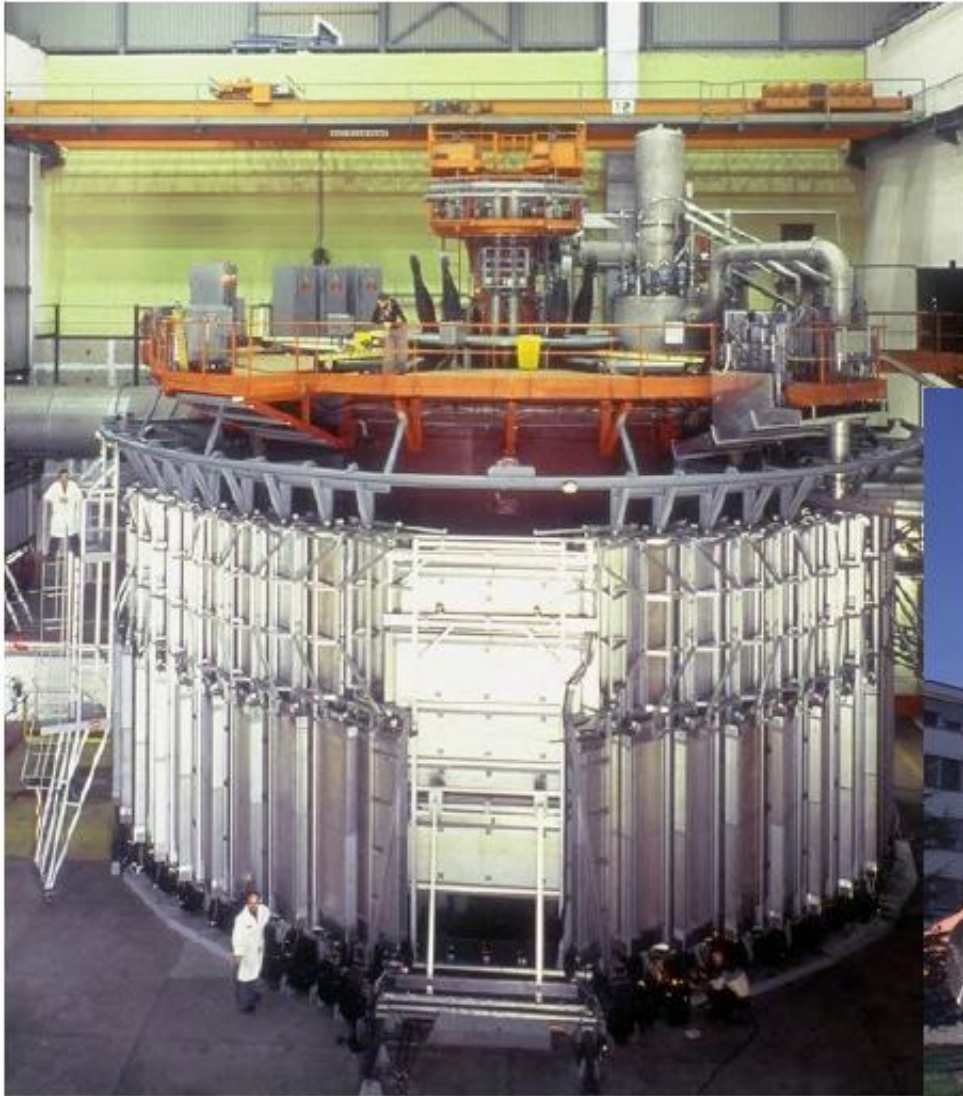


- Meistens mit überhitztem flüssigen H_2 gefüllte Kammer, in der Teilchenspuren durch Blasenbildung sichtbar werden
- Überhitzung wird durch schnelle Expansion erreicht

Donald Glasser 1952 (NP 1960)

Entdeckung der neutralen Ströme
Gargamelle, 1972

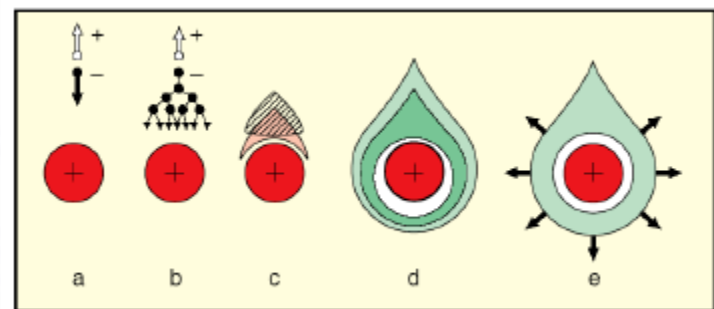
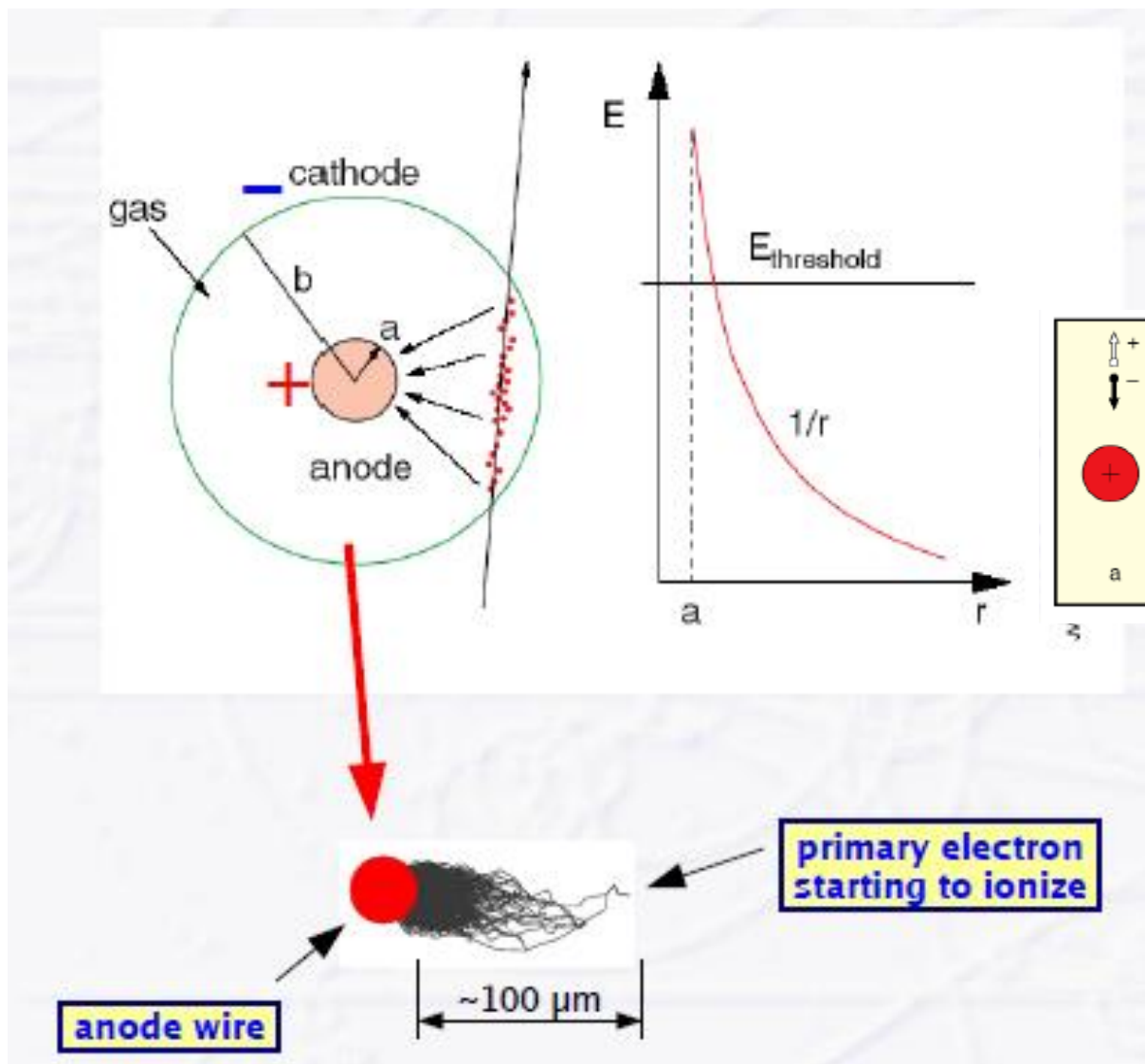
Beispiel für ein Blasenkammer: BEBC



- Big European Bubble Chamber
 - 3.7 m Durchmesser
- Bis 1984 am CERN in Betrieb zur Untersuchung von Neutrino- und Hadronreaktionen



Prinzip der Signalverstärkung



Nachweis der Ionisation

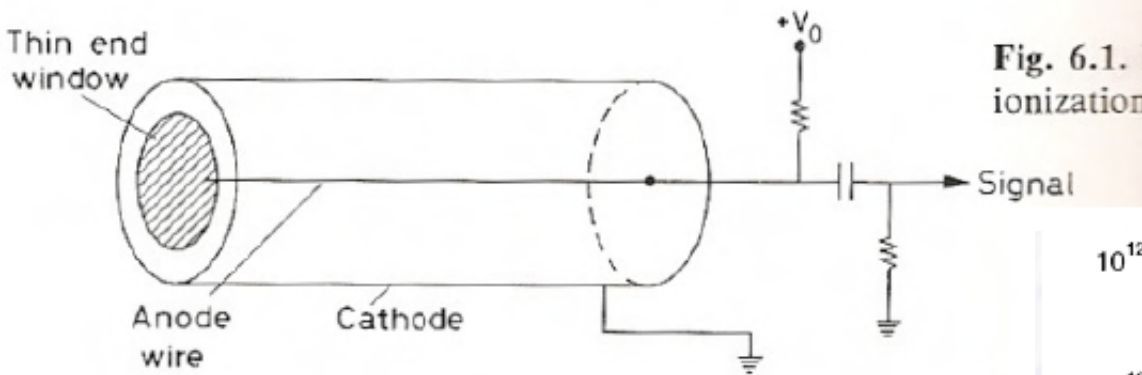
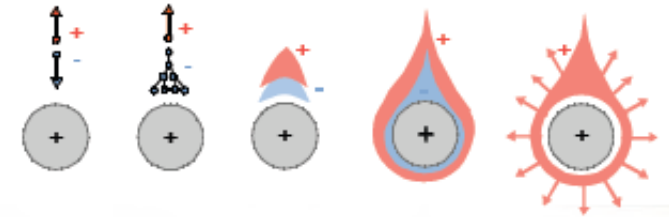
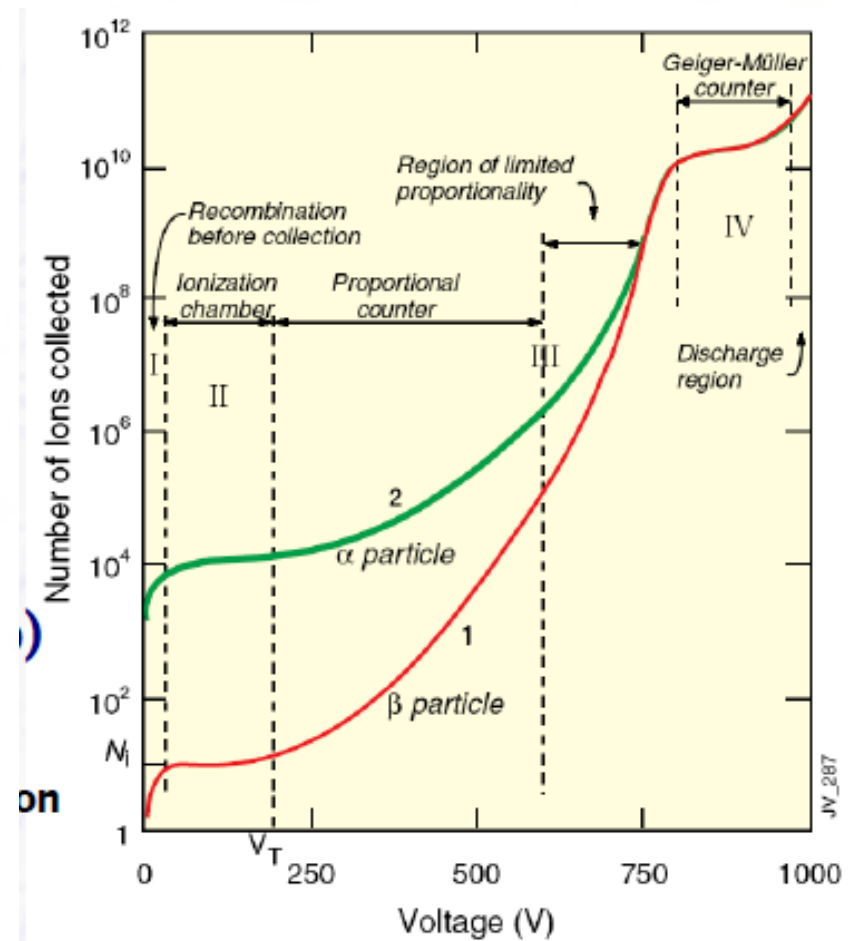


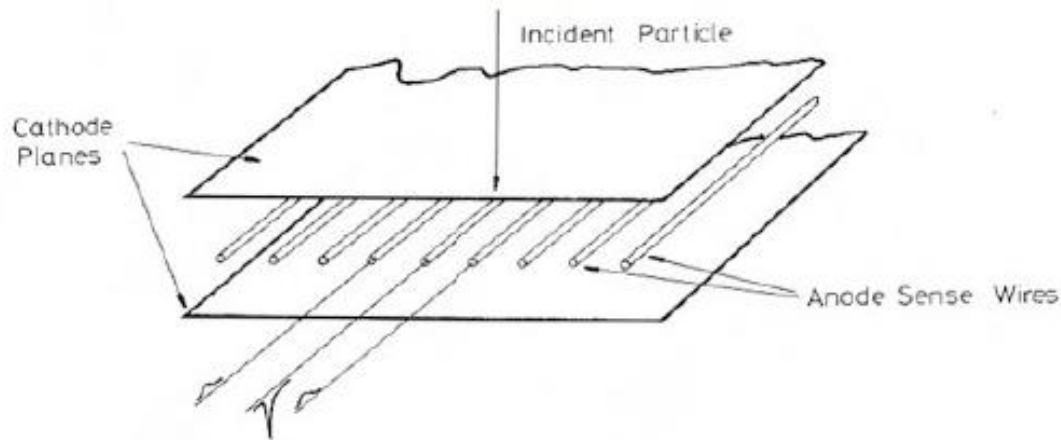
Fig. 6.1. Ionization



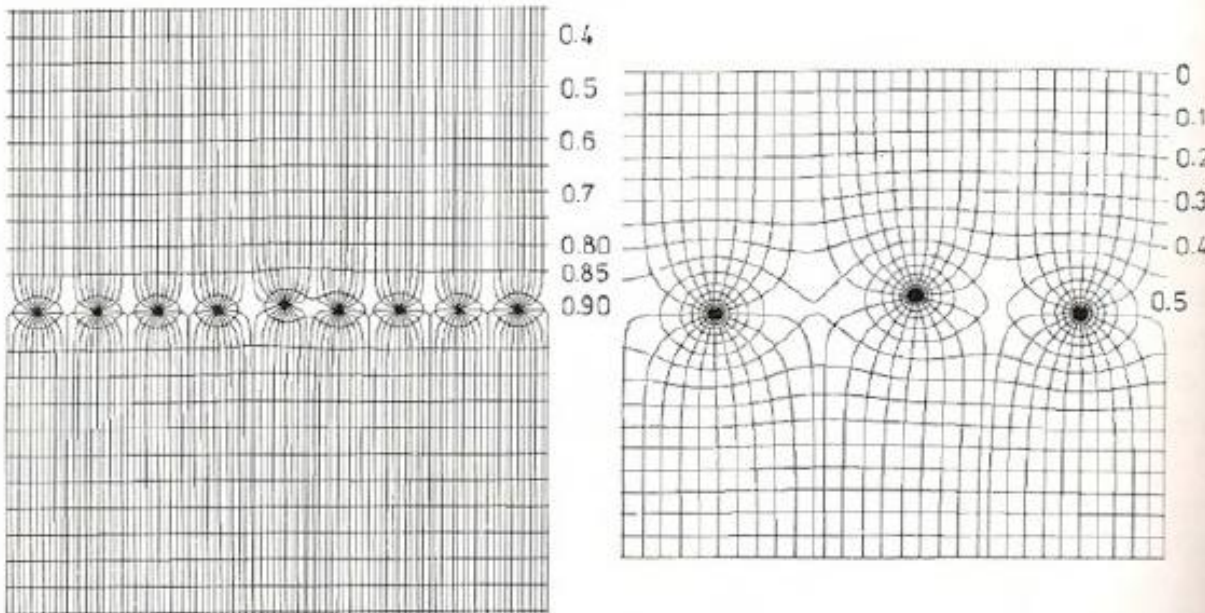
- Teilchendurchgang erzeugt Elektron-Ionen-Paare in Gasvolumen
- Elektronen werden in einem starken Elektrischen Feld beschleunigt, es kommt zu einer Lawinenverstärkung
- Je nach Spannung ist das Signal proportional zur ursprünglich deponierten Ladung oder geht in Sättigung



Vieldrahtproportionalkammer (MWPC)



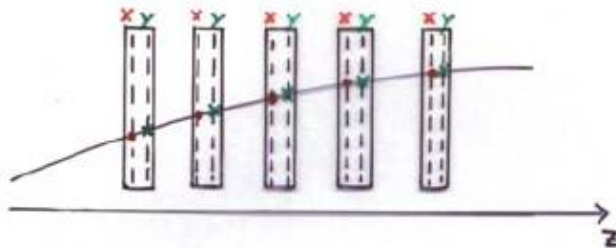
- Vieldraht-
Proportionalkammer
MWPC
- G. Charpak 1968
(Nobel-Preis 1992)



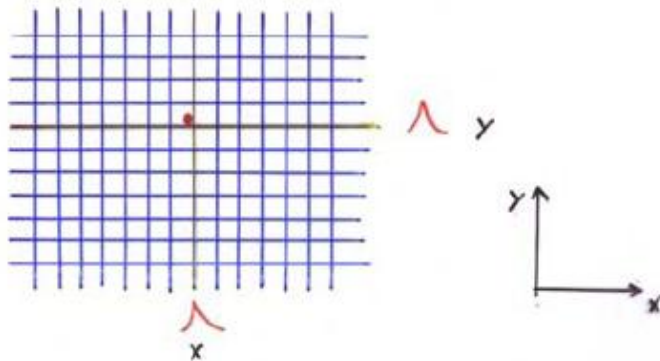
Vieldrahtproportionalkammer (MWPC)

Spurpunkte (x, y, z) ?

① Kombination mehrerer Kammern



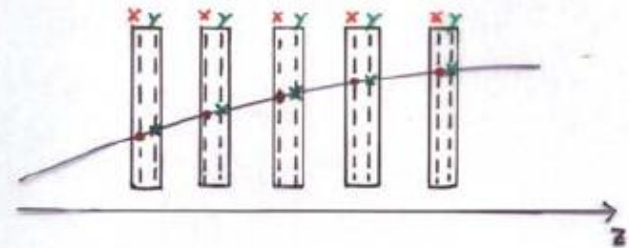
- z : Kammerposition, bekannt.
- x, y : gekreuzte Vieldraht prop. Kammern (90°)



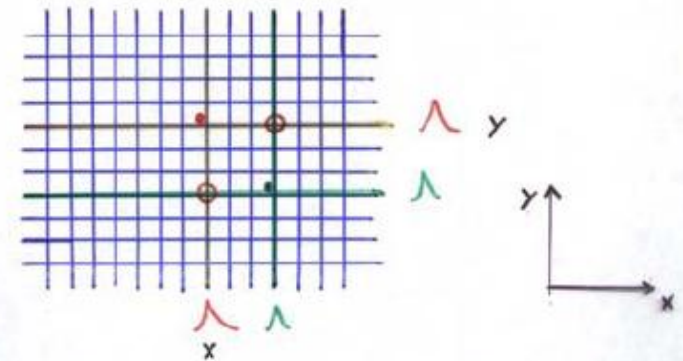
⇒ Auflösung in beiden Projektionen $\sim 600 \mu\text{m}$

Spurpunkte (x, y, z) ?

① Kombination mehrerer Kammern



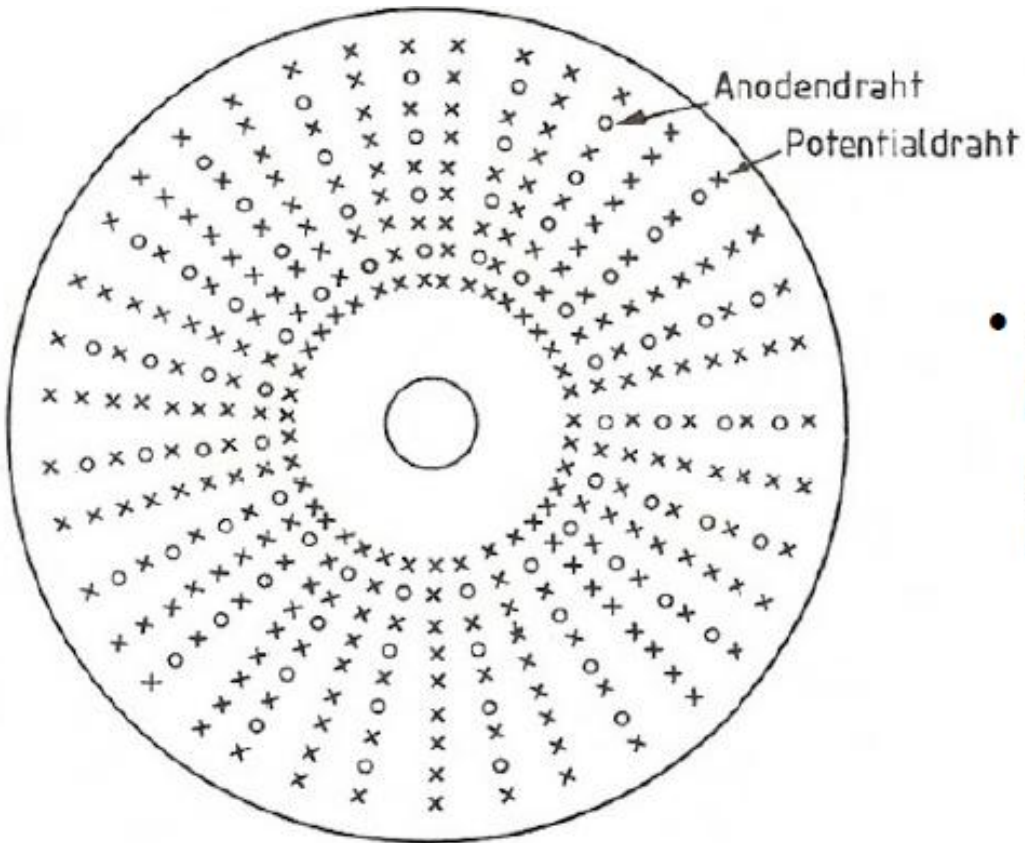
- z : Kammerposition, bekannt.
- x, y : gekreuzte Vieldraht prop. Kammern (90°)



⇒ Ambiguitäten bei mehreren Teilchen
→ 'Geisterpunkte'.

⇒ Auflösung in beiden Projektionen $\sim 600 \mu\text{m}$

Prinzip des Aufbaus einer Driftkammer

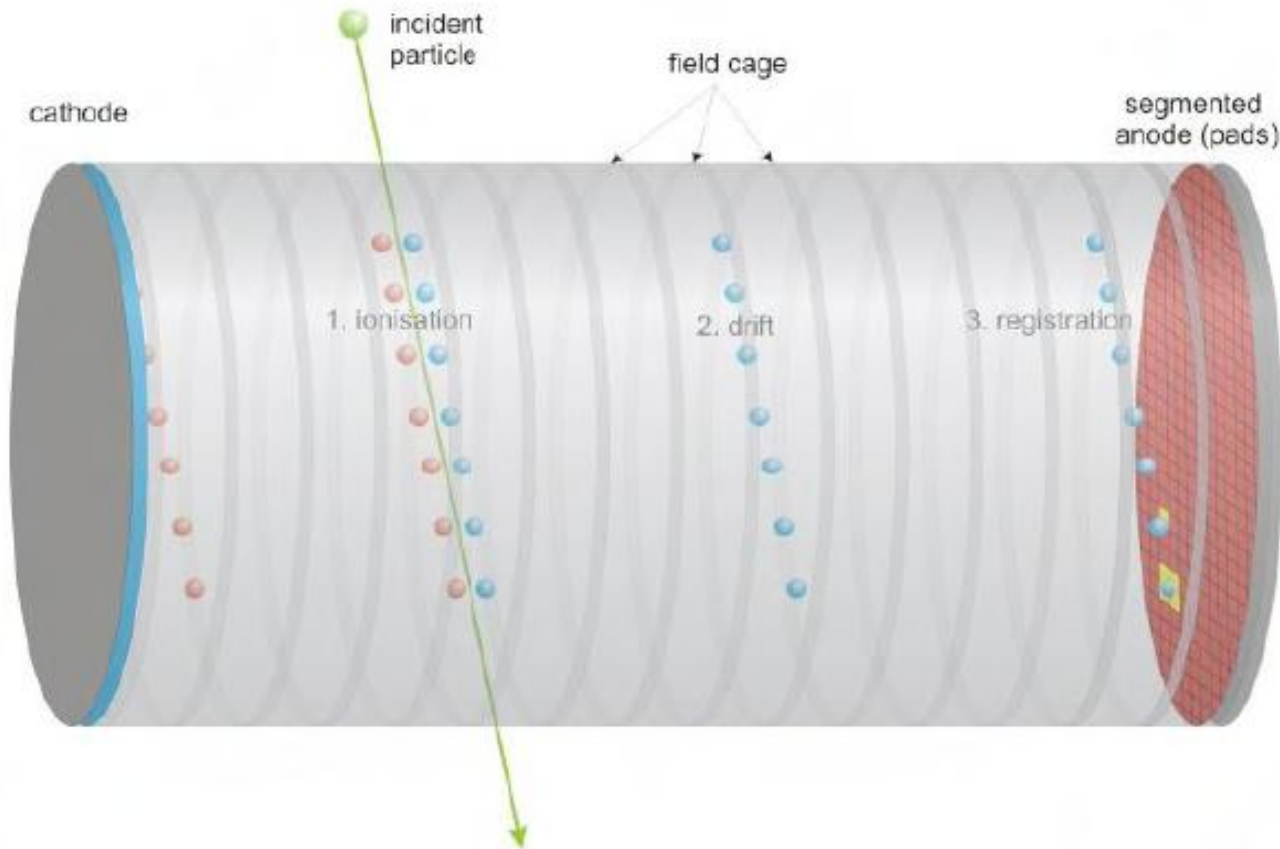


- Solenoid-Magnetfeld zur Impulsbestimmung parallel zu den Kammer-Drähten

Abb. 4.41 Prinzipieller Aufbau einer zylindrischen Driftkammer. Die Abbildung zeigt einen Schnitt durch die Kammer senkrecht zu den Drähten.

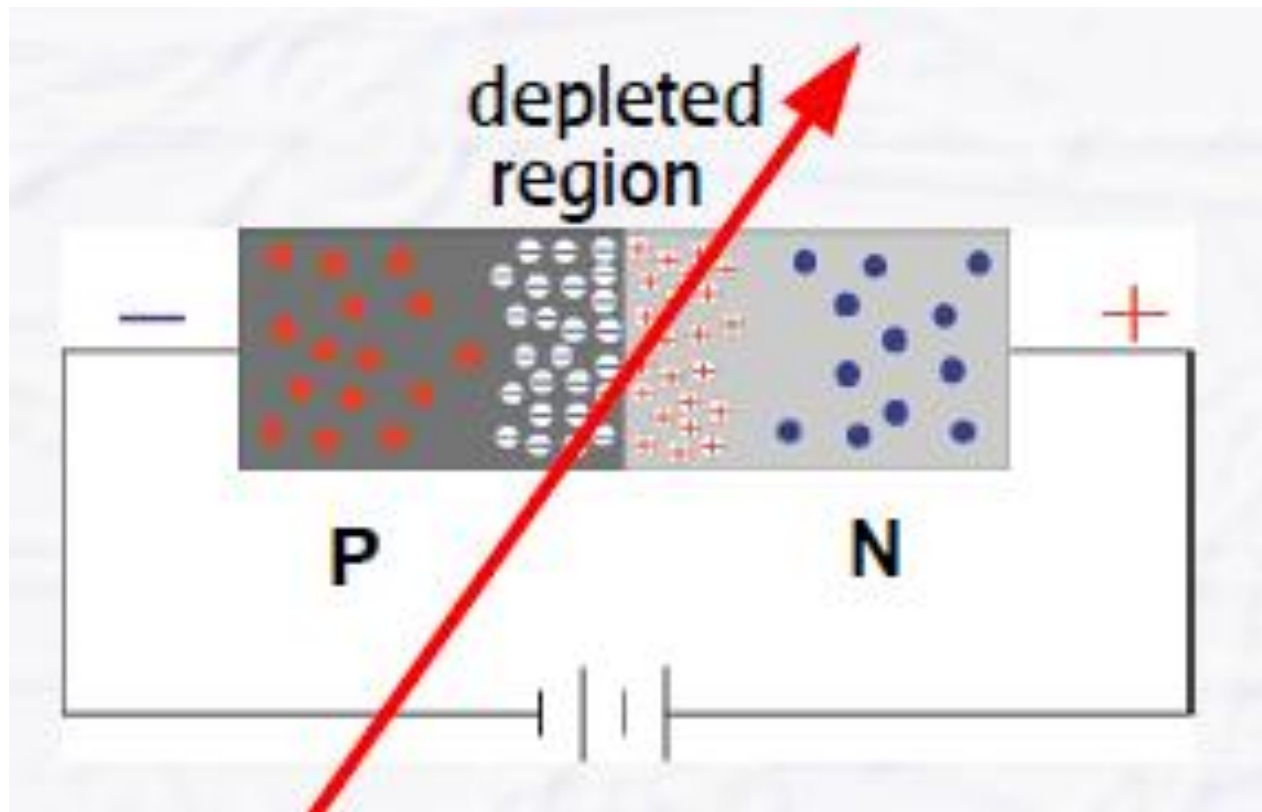
Prinzip des Aufbaus einer Zeitprojektionskammer TPC

- Das Driftkammer-Prinzip weitergedacht: Kombination von 2D-Ortsinformation und Zeit zur echten 3D-Punkt-Rekonstruktion



Auslese an der Anode meist über MWPCs, inzwischen auch neue Entwicklungen

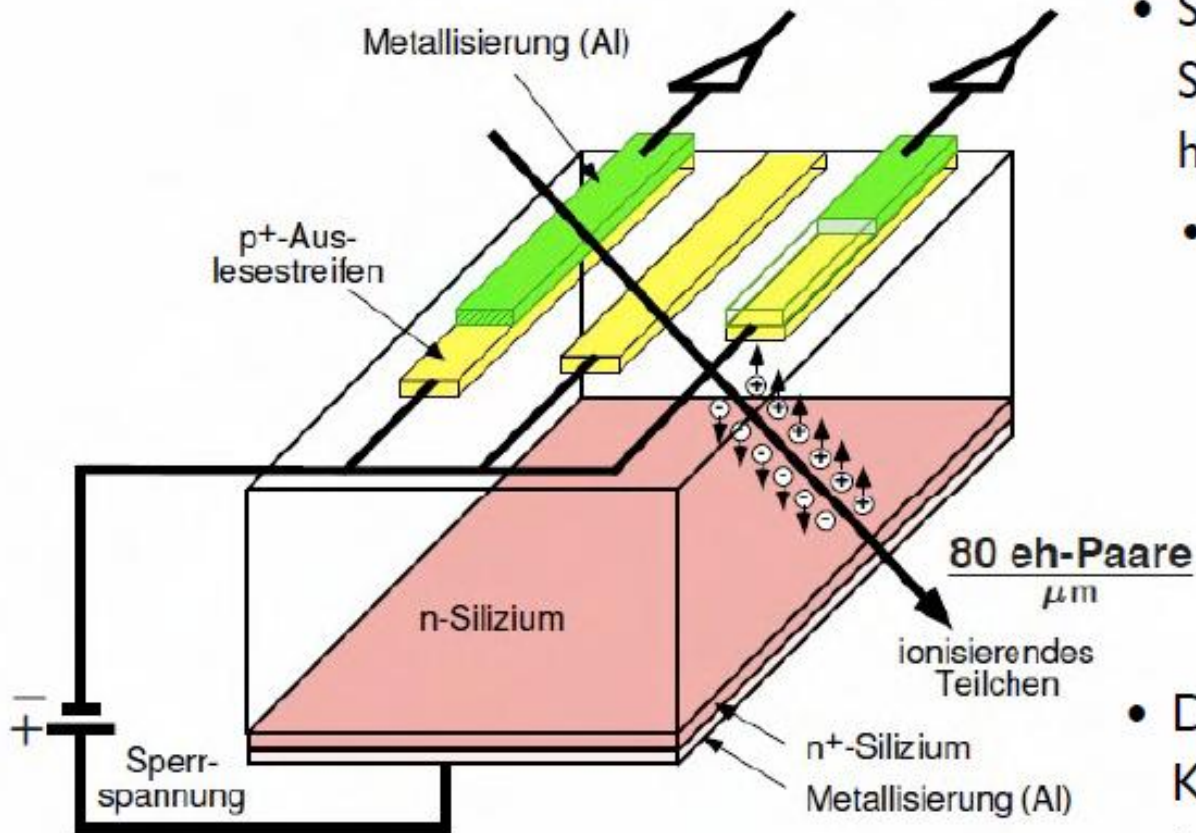
Prinzip des Halbleiterdetektors: Diode in Sperrrichtung



charged particle can create new electron/hole pairs in depletion area sufficient to create a signal

typically 20'000 – 30'000 electron/hole pairs in 300 μm thick material

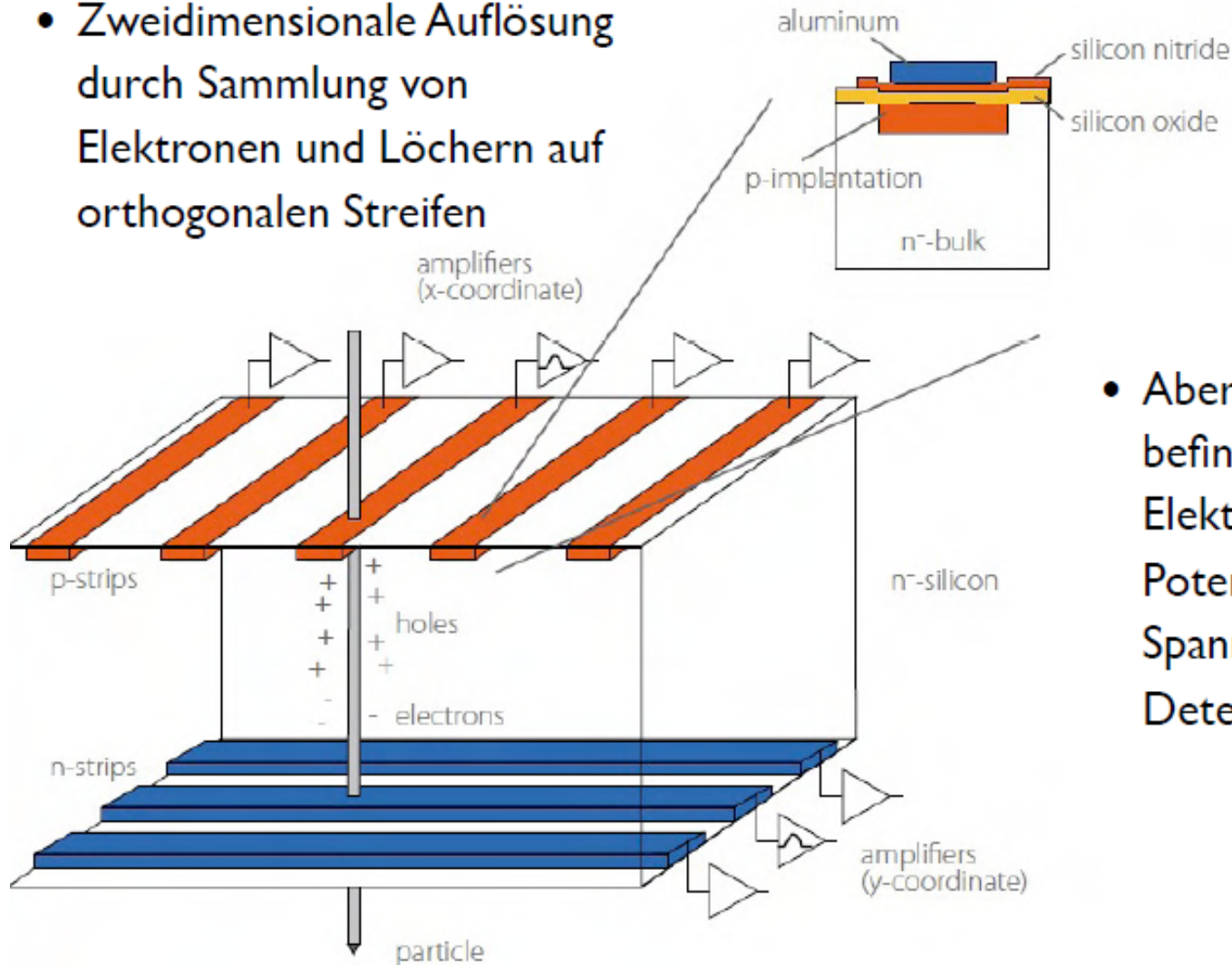
Prinzip des Streifendetektors



- Silizium erlaubt feinste Strukturen, und damit hervorragende Ortsauflösung
- typische Streifenabstände $50 \mu\text{m}$
- Der Preis: Extrem hohe Kanalzahlen, erfordert hoch integrierte Elektronik!

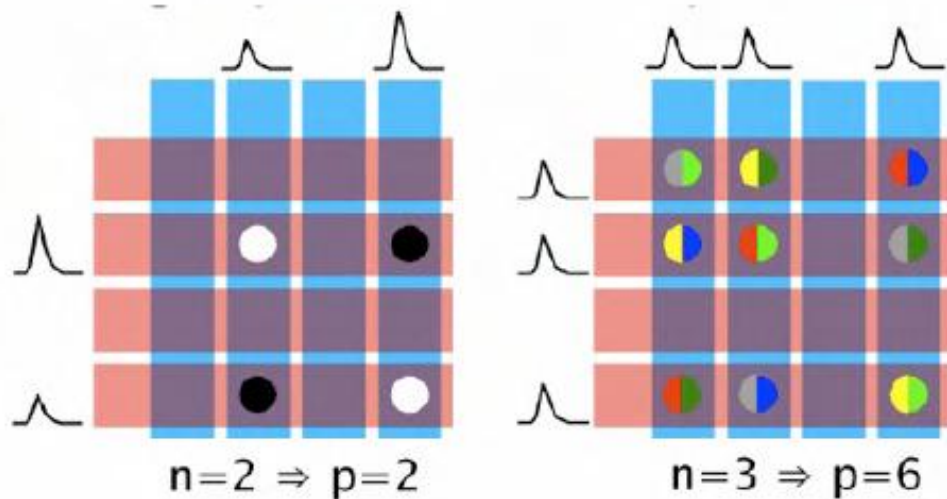
2D-Information: Doppelseitige Streifendetektoren

- Zweidimensionale Auflösung durch Sammlung von Elektronen und Löchern auf orthogonalen Streifen



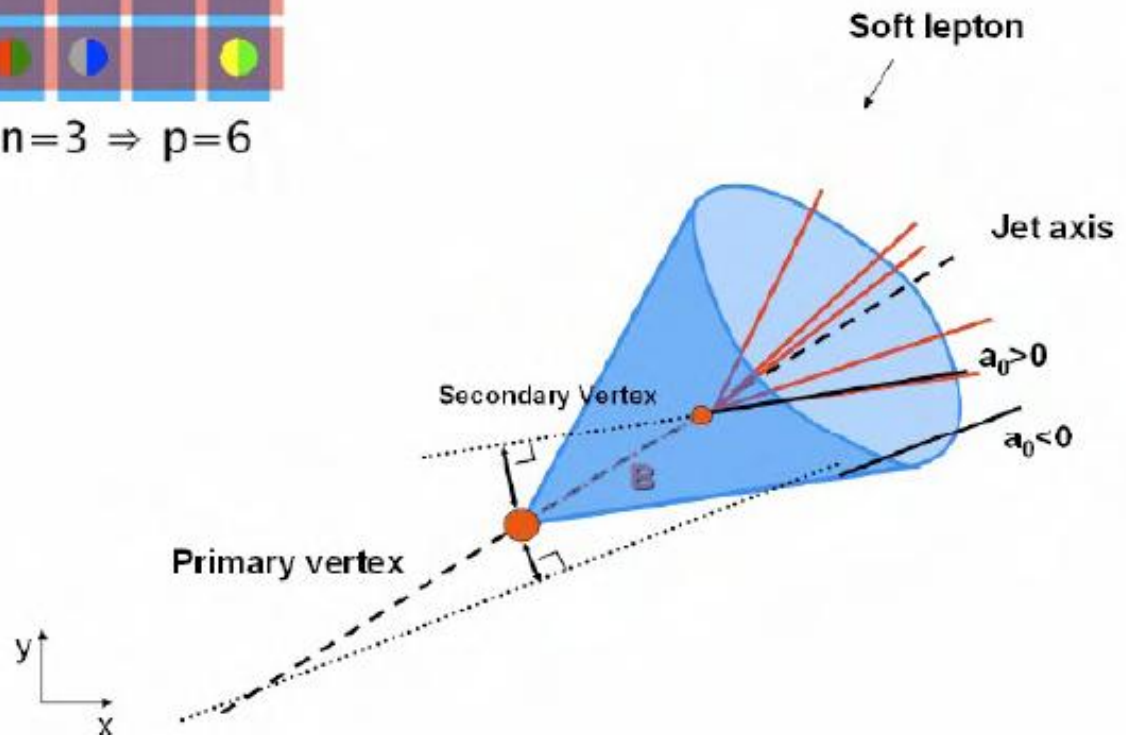
- Aber: Auf einer Seite befindet sich dann die Elektronik auf hohem Potential (durch Bias-Spannung über dem Detektor)

Limitierungen von Streifendetektoren

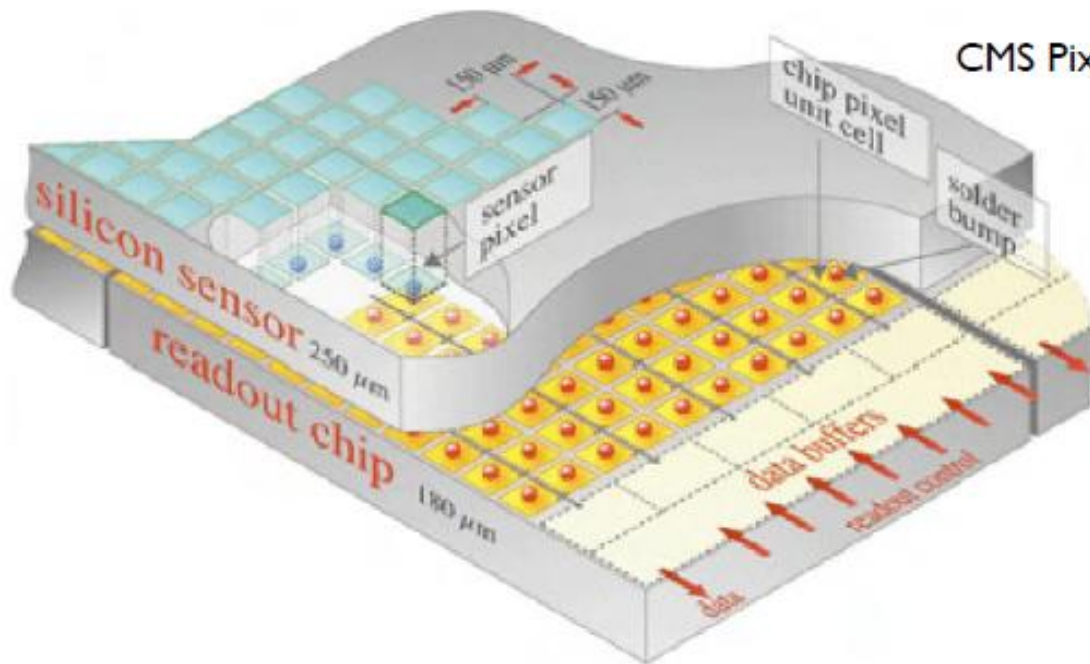


- Bei hoher Teilchendichte gibt es Ambiguitäten bei der Streifenauslese: Spurrekonstruktion bricht zusammen

- Ortsauflösung ist nur in einer Koordinate gut, meist nicht ausreichend, um sekundäre Zerfalls-Vertices zu rekonstruieren



Oprinzip des Pixeldetektors



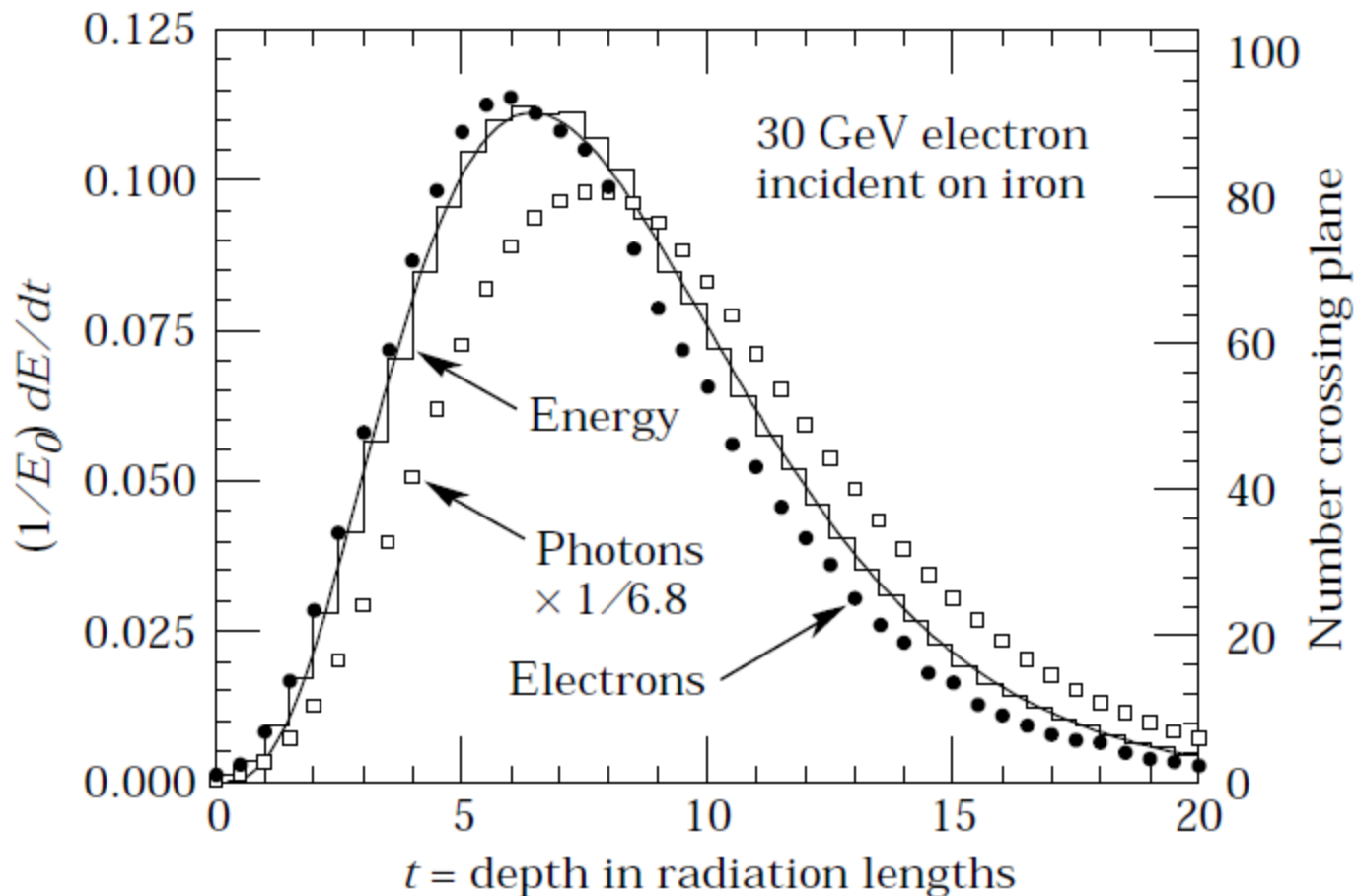
CMS Pixel Schema

“Hybrid Pixels”

- Pixel-Detektoren ermöglichen Spurrekonstruktion bei hoher Teilchendichte ohne Ambiguitäten
- Gute Ortsauflösung in zwei Koordinaten (abhängig von Pixelgröße und Ladungsteilung zwischen Pixeln)
- ▶ Extrem hohe Kanalzahl: Komplexe Auslese, vor allem wenn es schnell gehen muss

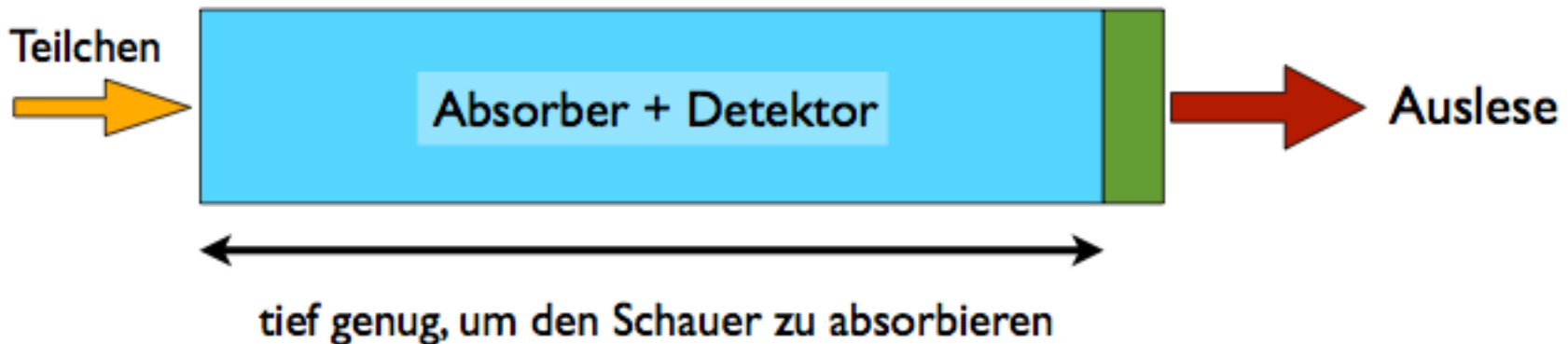
- CMS Pixels: ~65 M Kanäle
150 x 150 μm
- ATLAS Pixels: ~80 M Kanäle
50 x 400 μm (lang in z oder r)

Longitudinales Schauerprofil



Homogene Kalorimeter

- Grundsätzlich unterscheiden wir zwei Arten von Kalorimetern (je nach verwendeter Technik):
 - Homogene Kalorimeter
 - Das Absorber-Material ist aktiv; die gesamte deponierte Energie wird in ein Detektor-Signal umgewandelt
 - Pro: Sehr gute Energieauflösung
 - Kontra: Segmentierung schwierig, Wahl der Materialien eingeschränkt, sehr kompakte Kalorimeter meist nicht möglich



Sampling Kalorimeter

- Sampling-Kalorimeter
 - Eine Schichtstruktur aus passivem Absorber-Material und aktivem Detektor-Material; nur ein kleiner Teil der deponierten Energie wird “gesehen”
 - Pro: Segmentierung (transversal und lateral), kompakte Detektoren durch sehr dichte Absorber
 - Kontra: Energieauflösung wird durch Fluktuationen begrenzt



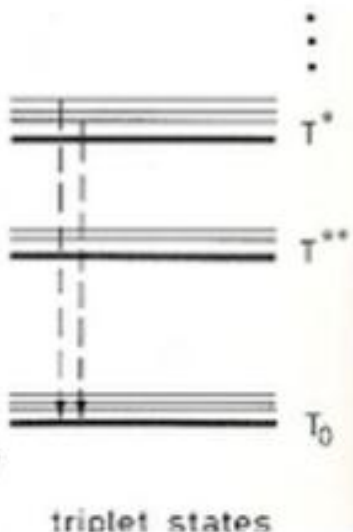
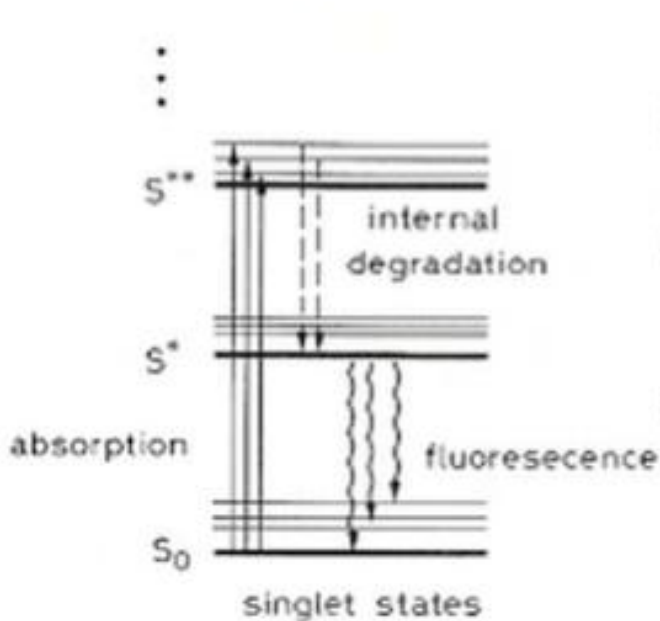
Wichtige Größe:
Sampling Fraction

Bestimmt, welcher Anteil der Energie eines durchgehenden Teilchens im aktiven Material gesehen wird.

Typischerweise im Prozentbereich

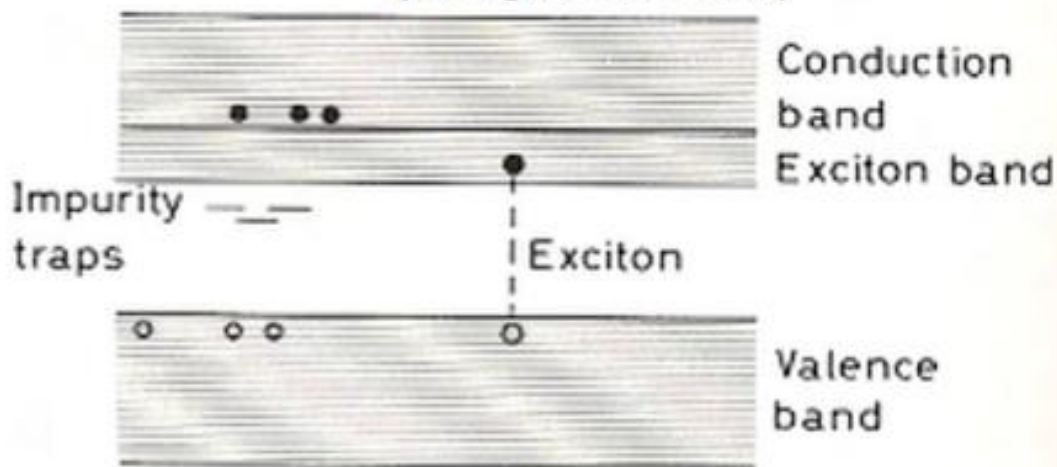
Energiemessung in Kalorimeter: Szintillator

- Am häufigsten angewendet: Messung der Energiedeposition durch Szintillation



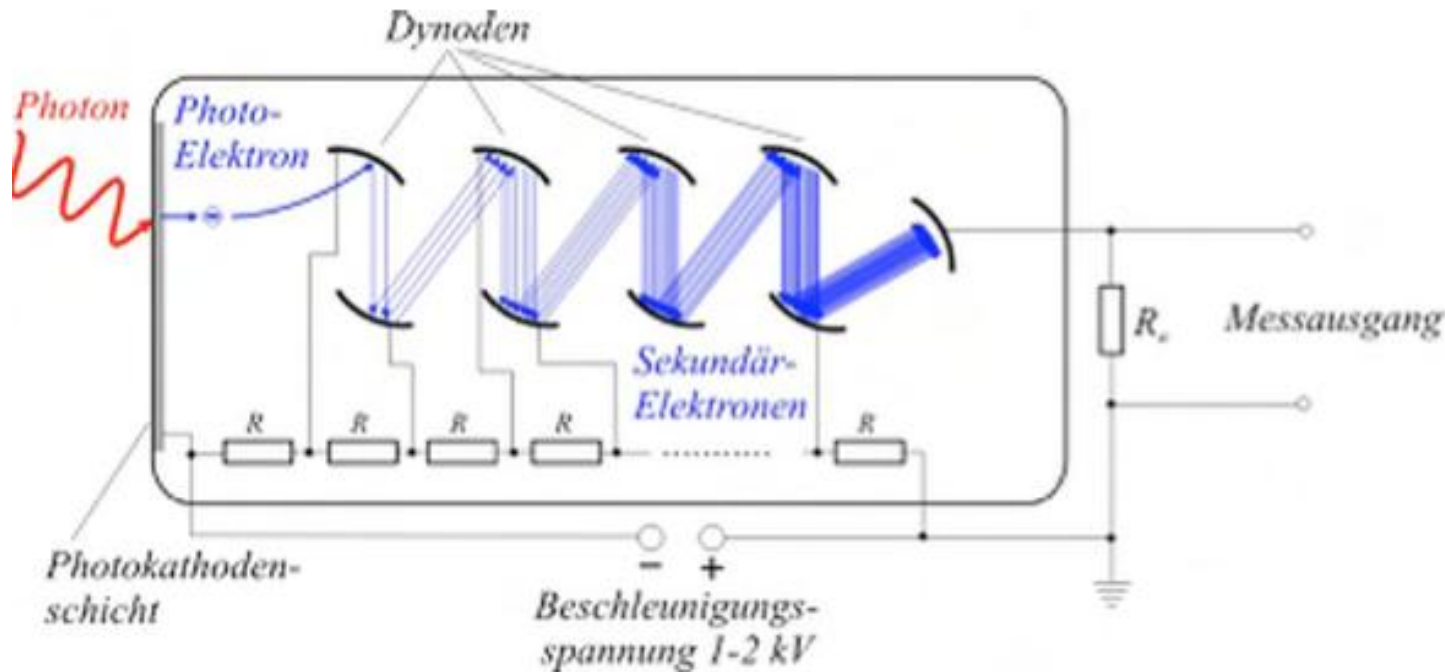
- Szintillatoren geben Licht ab, wenn sie von ionisierenden Teilchen durchquert werden
- Anregung von metastabilen Zuständen in Molekülen (organischer Szint) oder Störstellen in Kristallen (anorganische Szint)

anorganisch:



Energiemessung in Kalorimeter: Photomultiplier

- Die klassische Methode zum Nachweis von Photonen:



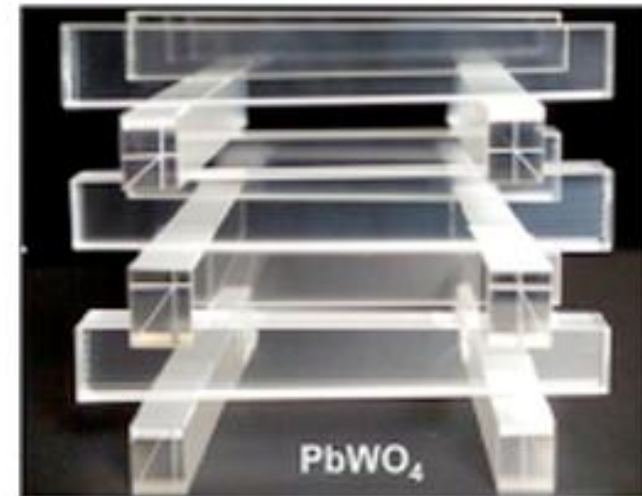
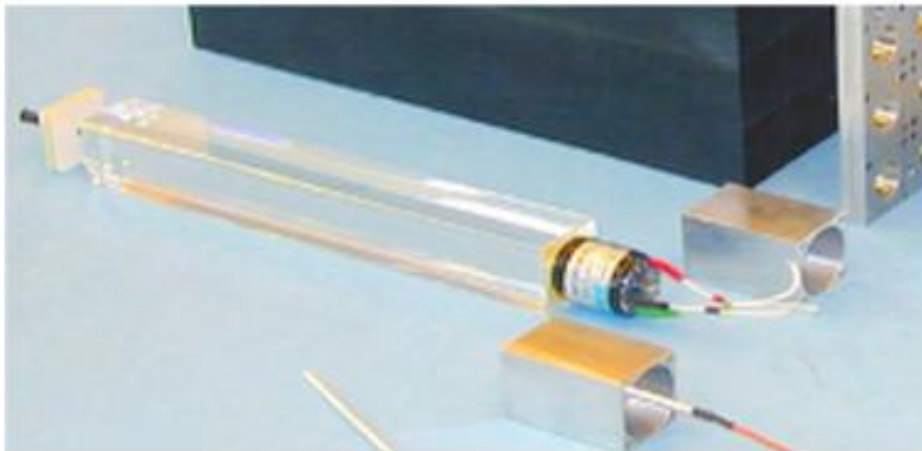
- Konversion des Photons in ein Elektron durch den Photo-Effekt auf der Photokathode, dann Verstärkung durch die Dynoden

- Einsetzbar in einem weiten Wellenlängenbereich, von UV bis IR, gute Effizienzen erreichbar: bis zu $\sim 25\%$, einzelne Photonen können detektiert werden
- Grosse aktive Flächen möglich: SuperKamiokande verwendet PMTs mit einer aktiven Fläche mit einem Durchmesser von 460 mm

Homogene Kalorimeter II

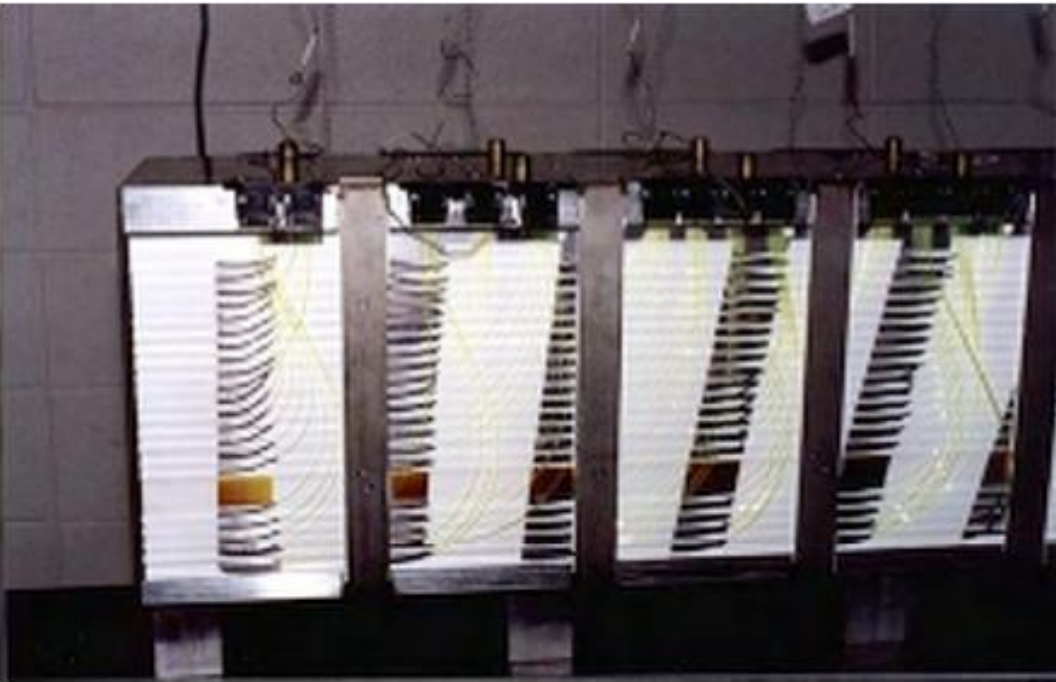
- Hohe Reinheit: Gute Transmission des Szintillationslichts
- Hohe Dichte: Bestimmt die Tiefe des Kalorimeters

Beispiel: CMS ECAL



- PbWO_4 : Schneller, dichter Szintillator,
 - Dichte $\sim 8.3 \text{ g/cm}^3$ (!)
 - ρ_M 2.2 cm, X_0 0.89 cm
 - niedrige Lichtausbeute: ~ 100 photons / MeV, Temperaturabhängigkeit $-2\%/^\circ\text{C}$

Sampling Kalorimeter II



- Scintillatorplatten zwischen Blei-Absorbern
- Das Licht jeder Platte wird von einer Wellenlängenschieber-Faser gesammelt
- Fasern leiten das Licht zu PMTs ausserhalb des Magnetfeldes

