

Schlüsselexperimente der Teilchenphysik: Die Entdeckung des W- und Z-Boson

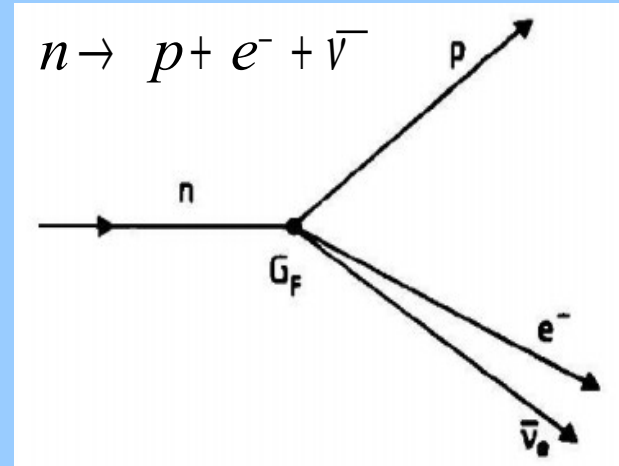
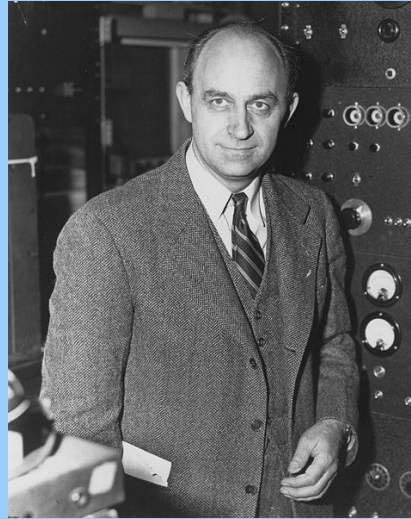
Patrick Schünke

Betreuer: Kai Schweda

04.06.2010

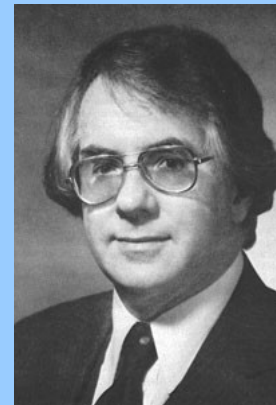
- Historischer Hintergrund
- Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung
- Die Entdeckung des W^{\pm} und Z^0 am CERN
 - Sp̄pS – Der Beschleuniger
 - Stochastische Kühlung der Antiprotonen
 - UA1 – Der Detektor
 - Event-Selektion und Datenanalyse
- weitere Messreihen und Ergebnisse
- Ausblick

- **1934: Fermi** stellt erste quantitative Theorie über β -Zerfall auf
 - punktförmige WW
 - Kopplungskonstante
 $G_F = 1,16637 \cdot 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$
 - versagt bei hohen Schwerpunktsenergien



$$G_F = 1,16637 \times 10^{-5} \pm 0,00001 \text{ GeV}^{-2}$$

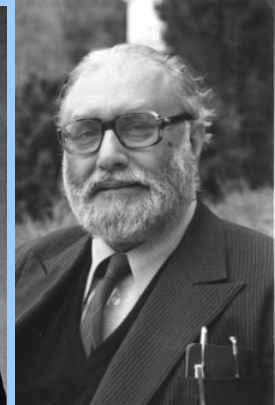
- **1967: Steven Weinberg, Sheldon Glashow** und Abdus **Salam** finden unabhängig voneinander eine Theorie, die die elektromagnetische- und die schwache Wechselwirkung zur **elektroschwachen WW** vereinigt
 - Model fordert neutrales Austauschboson (heute Z^0) und das sog. **Higgs-Boson**



S. Glashow



S. Weinberg



A. Salam

- **1979:** Nobelpreis für Steven Weinberg, Sheldon Glashow und Abdus Salam

- **1983:** Unter Leitung von Carlo Rubbia wurden erstmals die Austauschbosonen W^\pm und Z^0 in zwei Experimenten am Proton-Antiproton-Collider am CERN nachgewiesen



- **1984:** Nobelpreis für Carlo Rubbia und Simon van der Meer

- vereinheitlichende Theorie aus Quantenelektrodynamik und schwacher Wechselwirkung (**Glashow-Salam-Weinberg-Theorie**)
- neben **Quantenchromodynamik** ein Pfeiler des **Standardmodells**
- Vermittlung der Wechselwirkung durch 4 masselose **Eichbosonen**
 - 1 B^0 -Boson, 3 W-Bosonen W^1, W^2, W^3
- **reale** Austauscheteilchen sind Linearkombinationen aus diesen 4 Bosonen:

$$|W^\pm\rangle = |W^1\rangle \pm i|W^2\rangle$$

$$|\gamma\rangle = \cos\theta_W |B^0\rangle + \sin\theta_W |W^3\rangle$$

$$|Z^0\rangle = -\sin\theta_W |B^0\rangle + \cos\theta_W |W^3\rangle$$

θ_W : Weinbergwinkel

- Messung des **Weinbergwinkels** θ_w über das Verhältnis der Wirkungsquerschnitte von geladenen und neutralen Strömen:

$$\frac{\sigma_{NC}}{\sigma_{CC}} = \frac{1}{2} - \sin^2 \theta_w + \frac{20}{27} \sin^4 \theta_w$$

mit CC: $\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + \text{Hadronen}$

NC: $\nu_\mu + N \rightarrow \nu_\mu + \text{Hadronen}$



damals: $\sin^2 \theta_w \approx 0,3 - 0,4$

heute: $\sin^2 \theta_w = 0,23122(15)$

- Voraussage der Massen des \mathbf{W}^\pm und \mathbf{Z}^0 :

$$m_W^2 = \frac{g^2 \sqrt{2}}{8G_F} = \frac{e^2 \sqrt{2}}{8G_F \sin^2 \theta_W}$$

$$\frac{m_W}{m_Z} = \cos \theta_W \Rightarrow m_Z = \frac{m_W}{\cos \theta_W}$$

mit: $e \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; $G_F \approx 1,17 \cdot 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$; $\sin^2 \theta_W \approx 0,35$



$$m_W \approx 80 \text{ GeV}$$

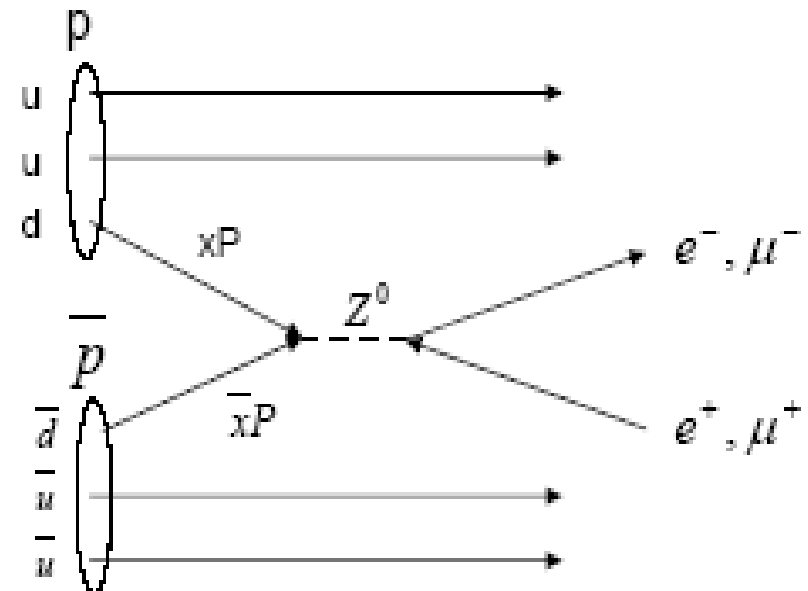
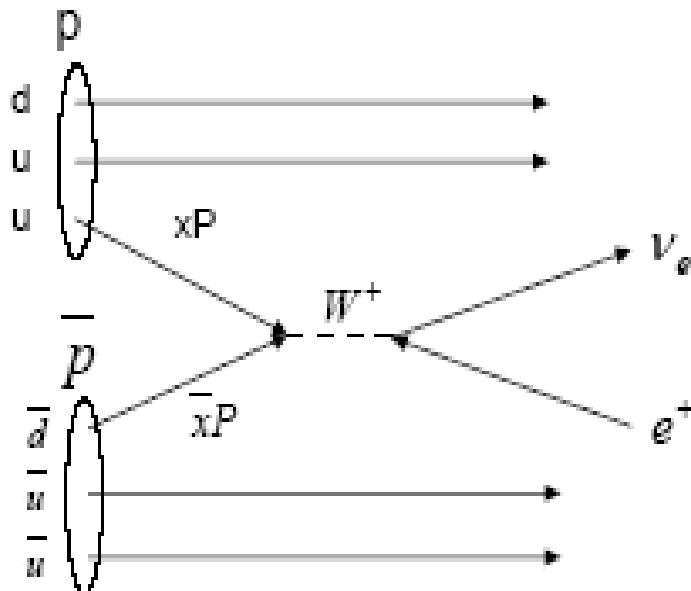
$$m_Z \approx 90 \text{ GeV}$$

- **vorhanden: SPS (Super Proton Synchrotron) am CERN**

- Protonen werden auf maximal $E_p \approx 300\text{GeV}$ beschleunigt

➡ „fixed-target“ Energien von $\sqrt{s} \approx 25\text{ GeV}$

- **Idee: Protonen (p) und Antiprotonen (\bar{p}) kollidieren:**



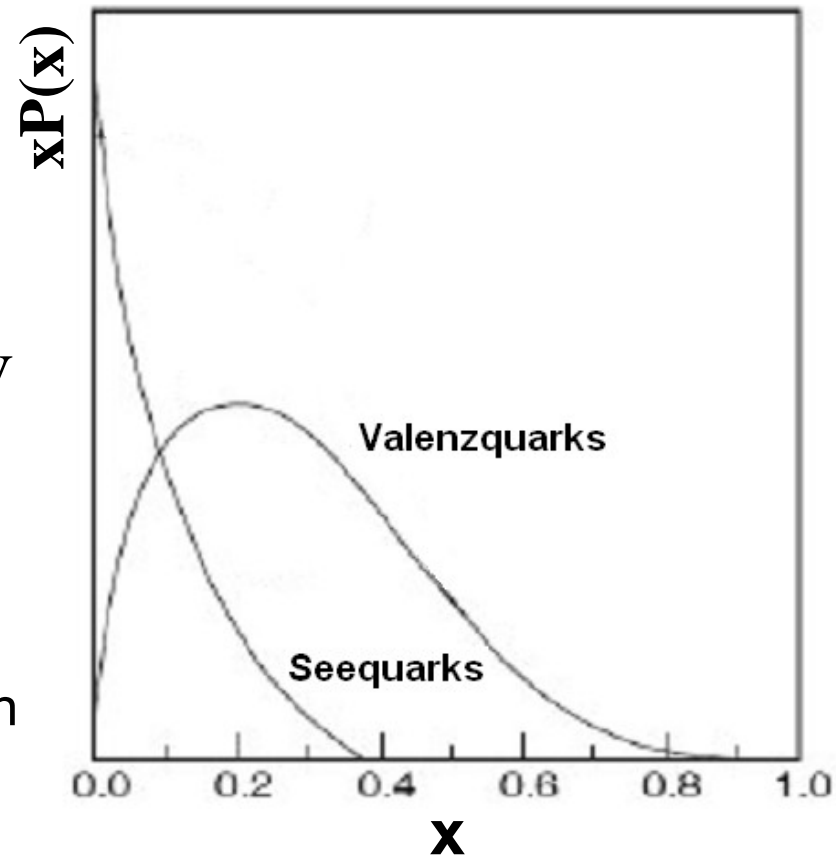
- nur ein Beschleuniger nötig (**SppS**)
- hohe Schwerpunktsenergien möglich:

$$\sqrt{s_{p\bar{p}} \text{ max}} \approx 600\text{GeV}$$

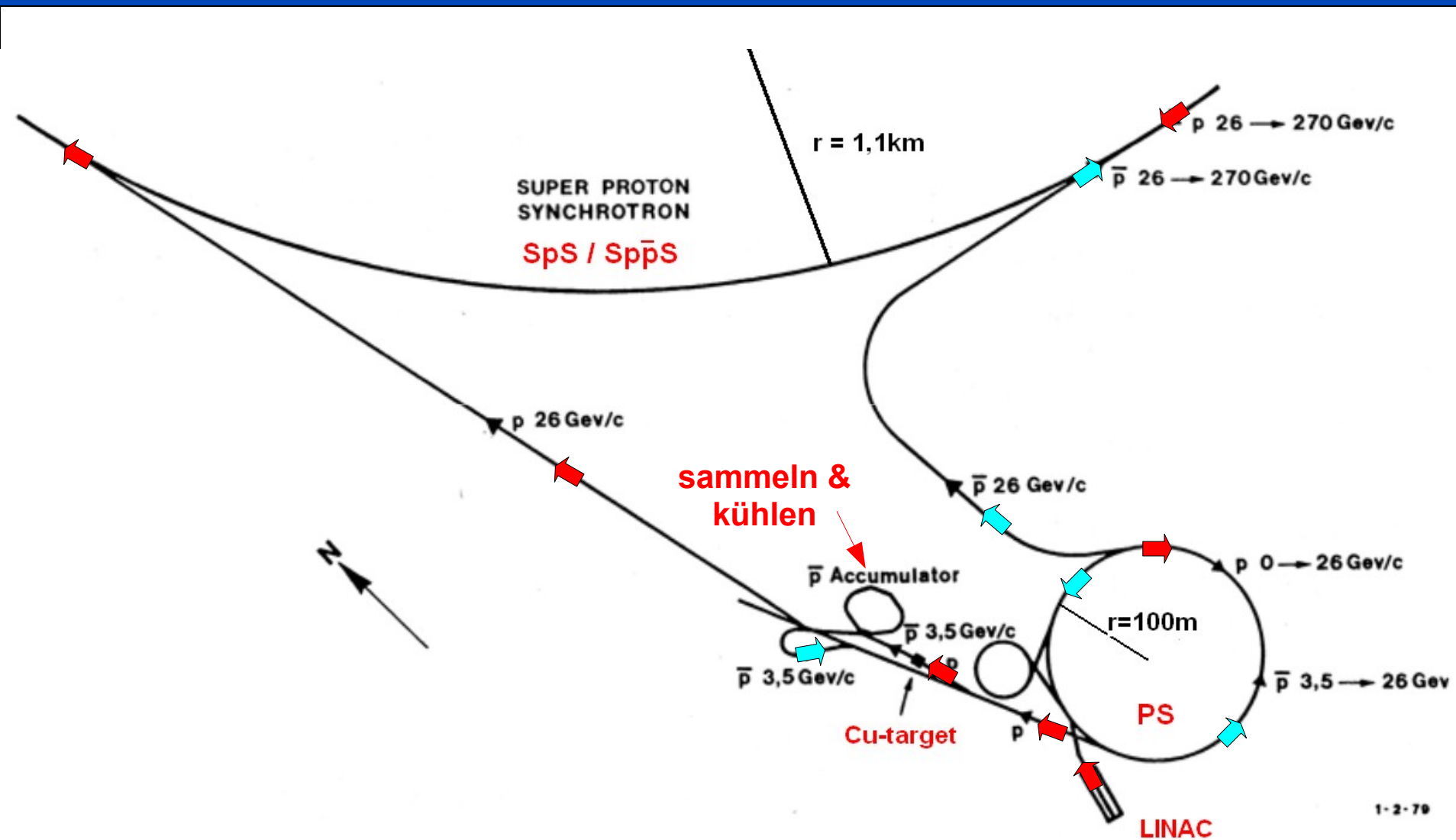
- Quarks tragen nur einen Anteil x der Energie:

$$\sqrt{s_{q\bar{q}} \text{ max}} \approx 0,2 * \sqrt{s_{p\bar{p}}} \approx 120\text{GeV}$$

- Erzeugung der Antiprotonen durch Protonen-Beschuss eines Cu-Targets
 - 1 Antiproton pro 10^6 Protonen
 - Antiprotonen in Speicherring sammeln
 - Antiprotonen sind „heiß“
→ Stochastische Kühlung

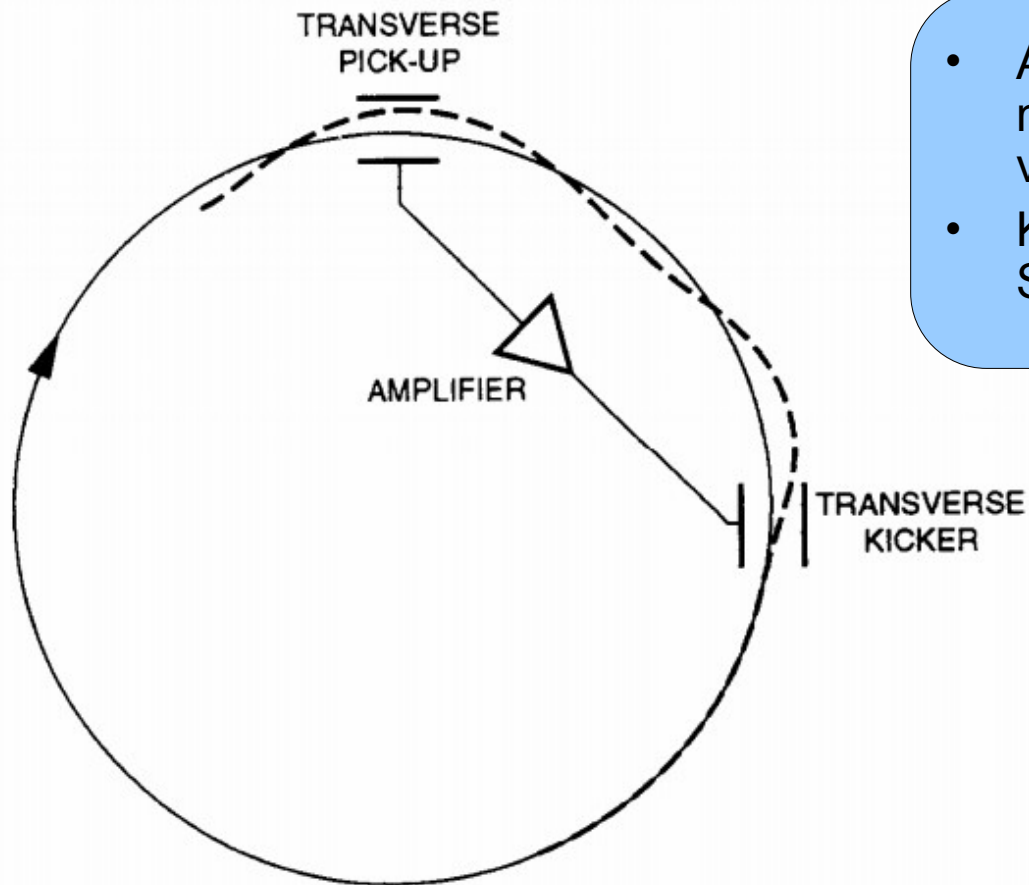


Spp̄S - Der Beschleuniger





Der Tunnel des Super-Proton-Synchrotron (1976)



- Abtaster („pick – ups“) am Ring messen Abweichung der Teilchen von idealer Bahn
- Korrektur auf gegenüberliegender Seite durch EM – Feld („kicker“)



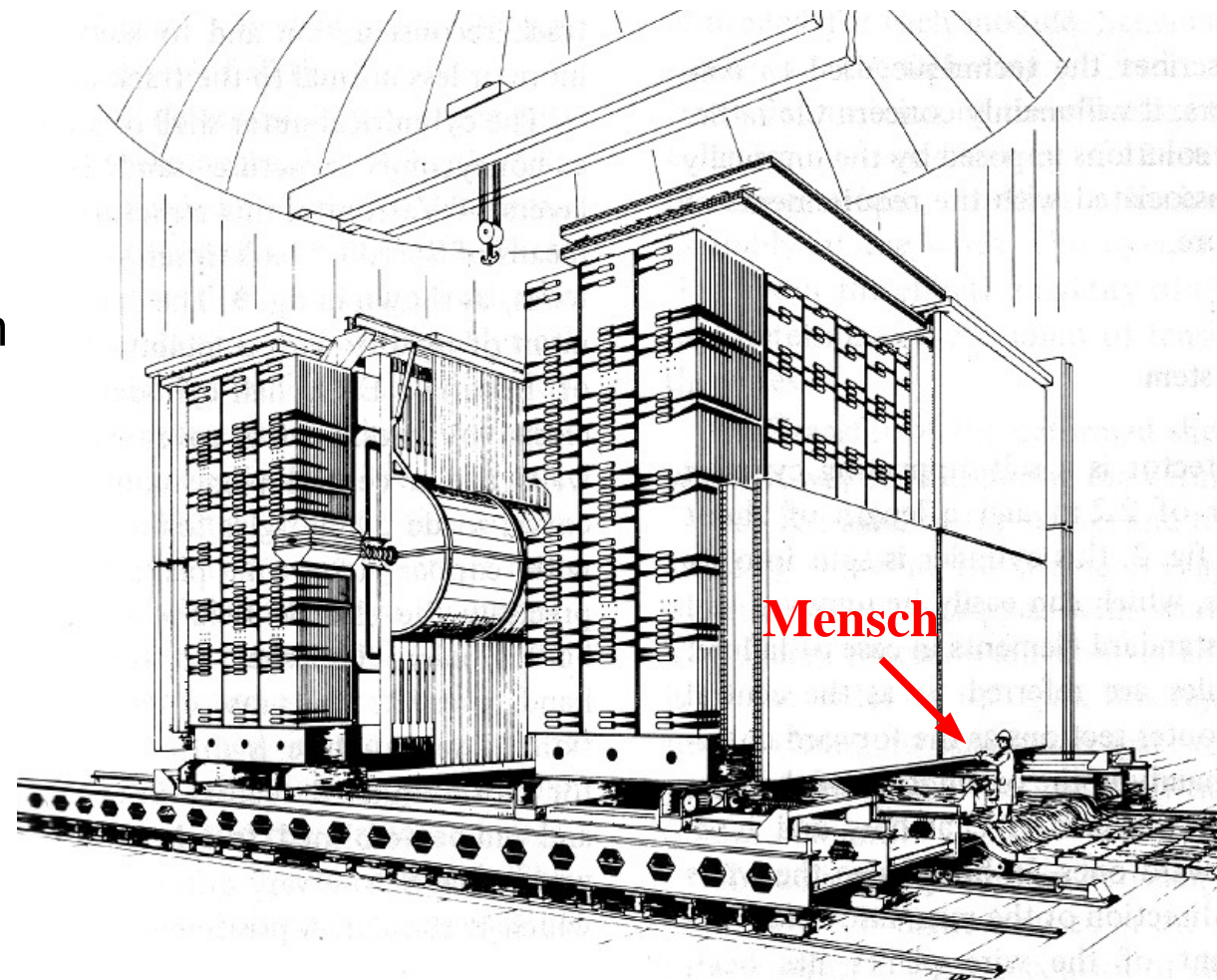
Nobelpreis 1984



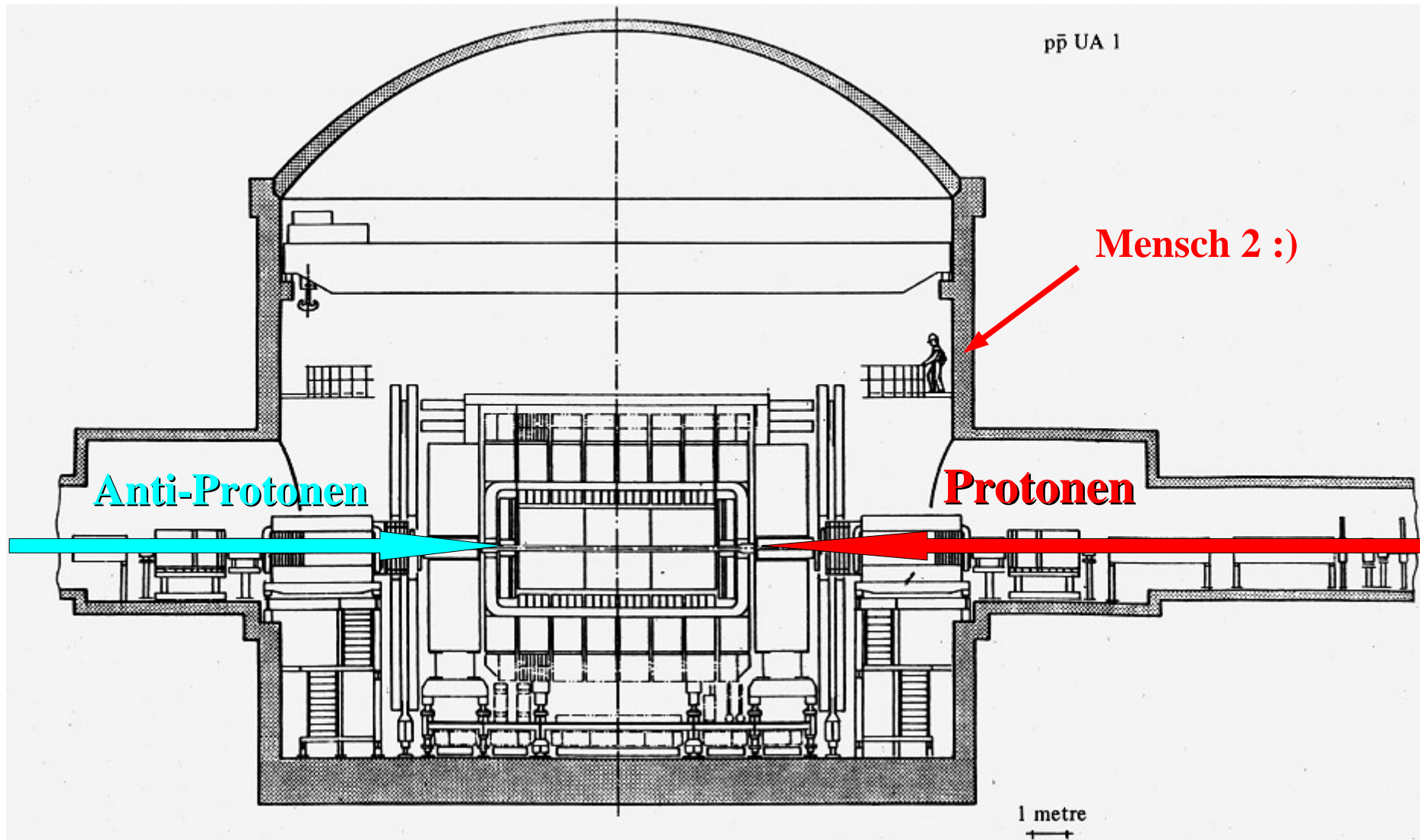
Simon van der Meer

Komplettansicht

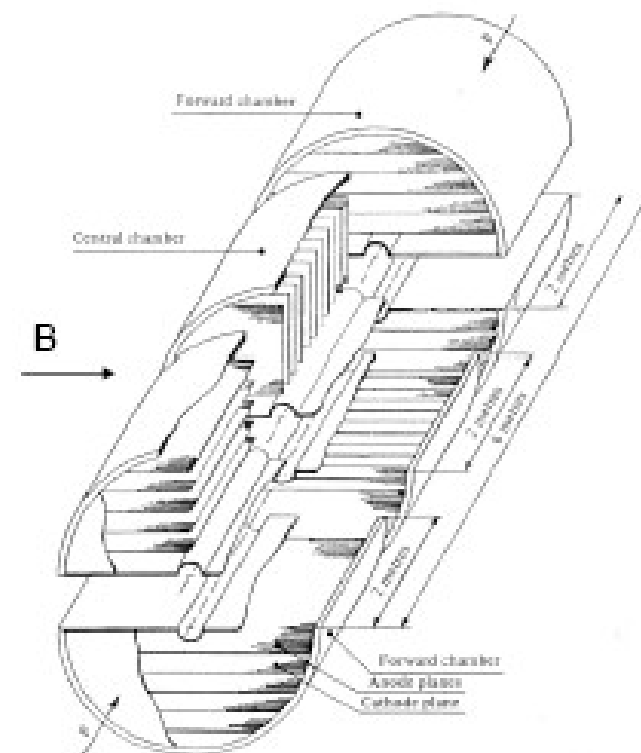
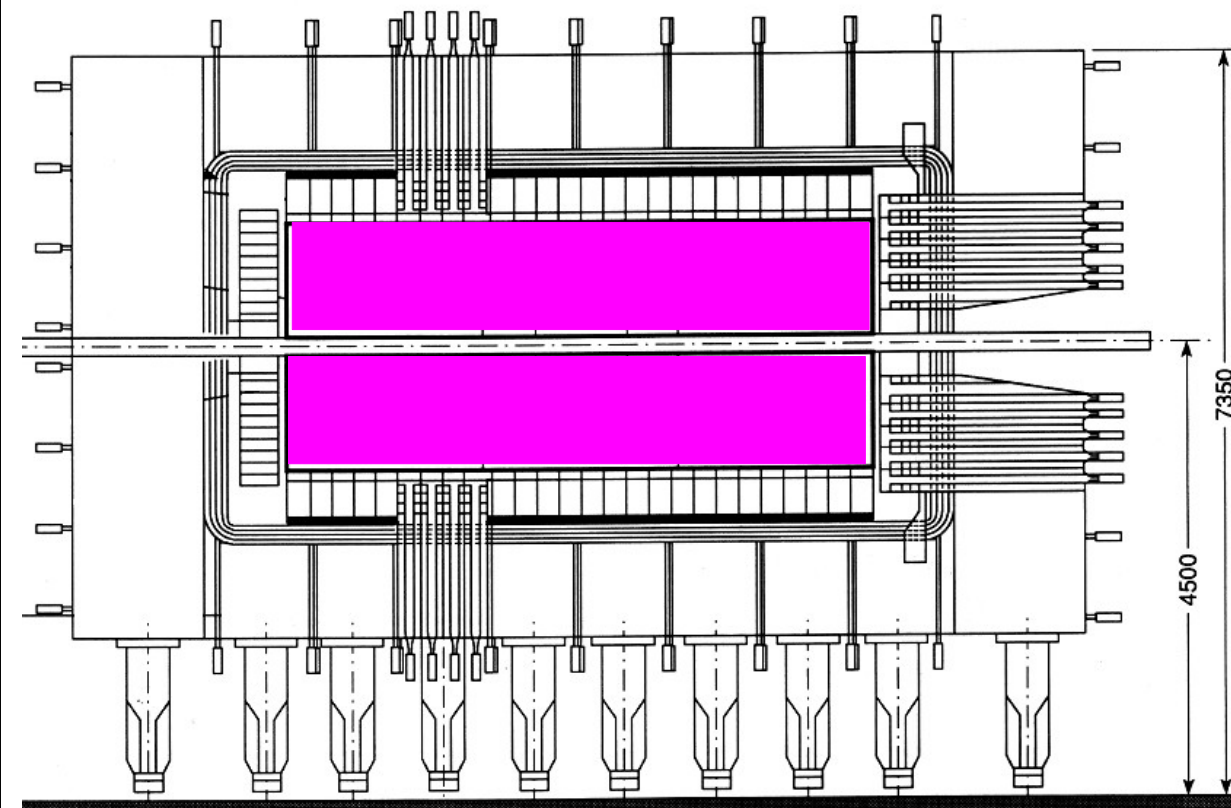
- Maße: 6 x 6 x 10 m
- Gewicht: 2000 t
- Aufbau konzentrisch um das Kollisionszentrum:
 - zentrale Driftkammer
 - elektrom. Kalorimeter
 - hadron. Kalorimeter
 - Magnetfeld von $\approx 0.7\text{T}$
 - Myonen-Detektor



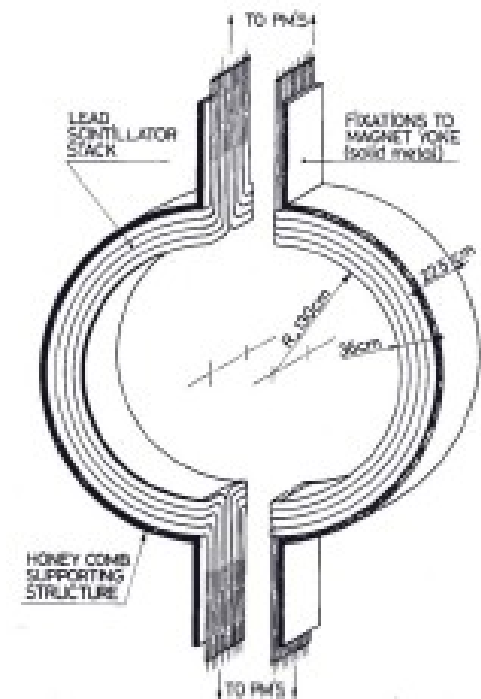
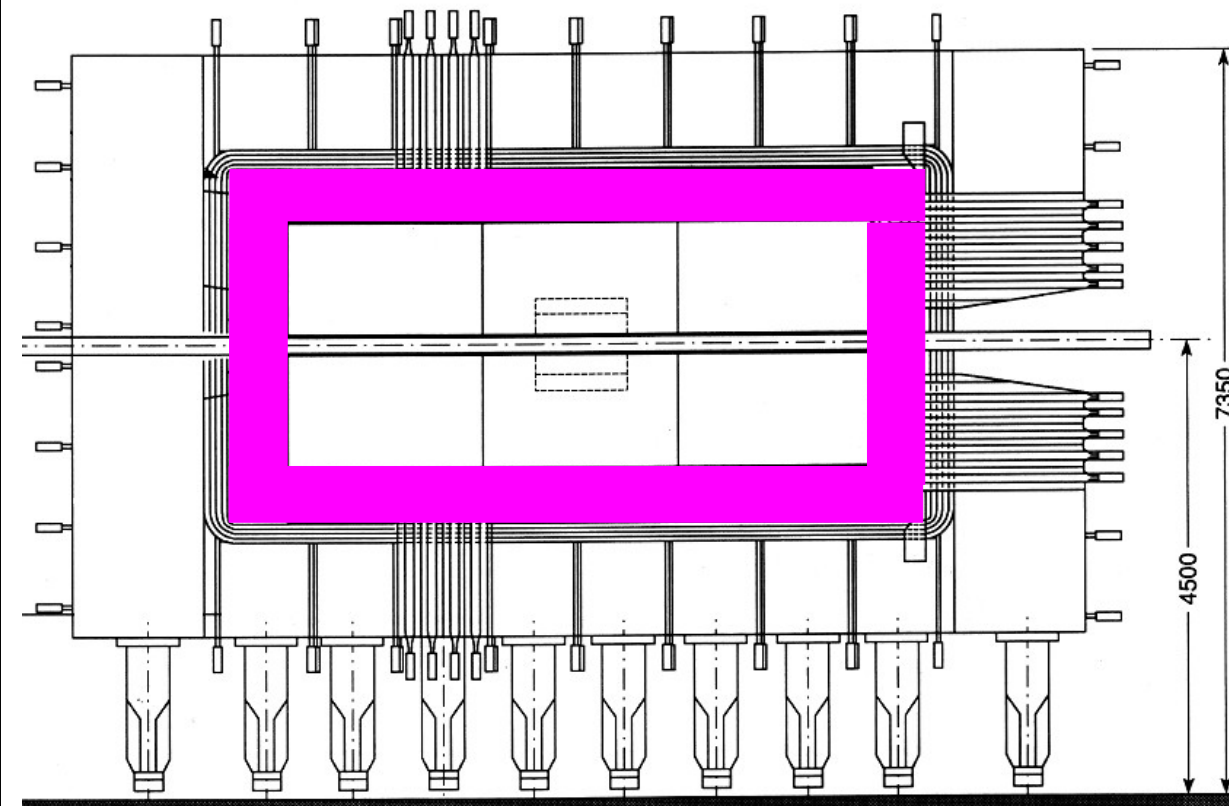
Underground Area 1 (UA1)– Der Detektor



- dient der Verfolgung von Teilchenspuren
- Ortsauflösung $\approx 300\mu\text{m}$
- Länge $\approx 6\text{m}$; Außendurchmesser $\approx 2,3\text{m}$

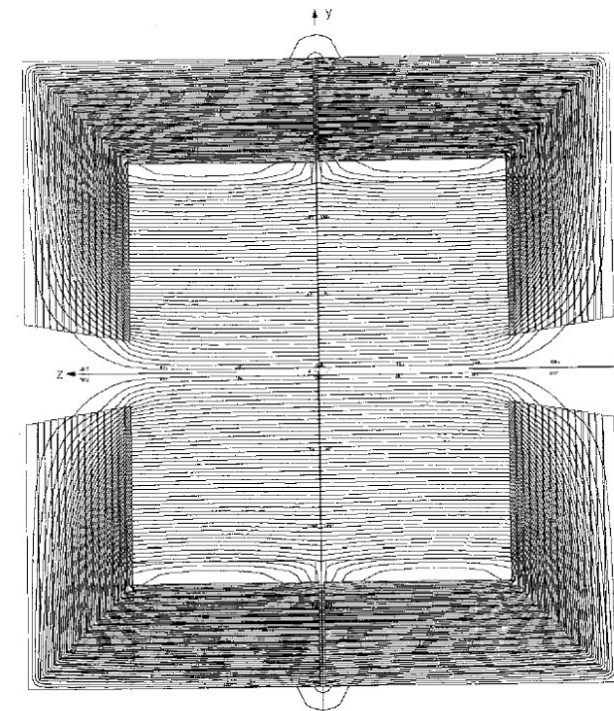
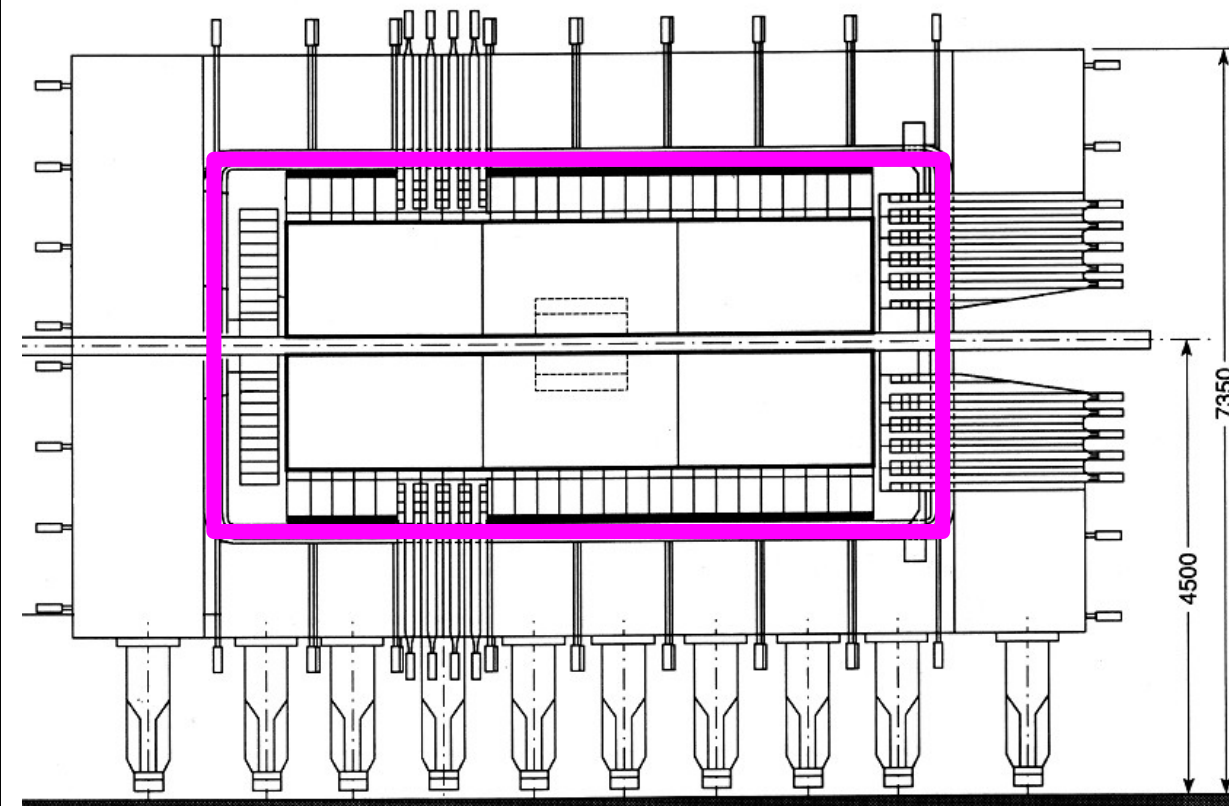


- Bestimmung der Teilchenenergien (Elektron/Positron/Photon)
- aufgebaut aus 48 „gondolas“ aus Blei-Absorbern und Szintillatoren
- über Faseroptik mit Photomultipliern verbunden

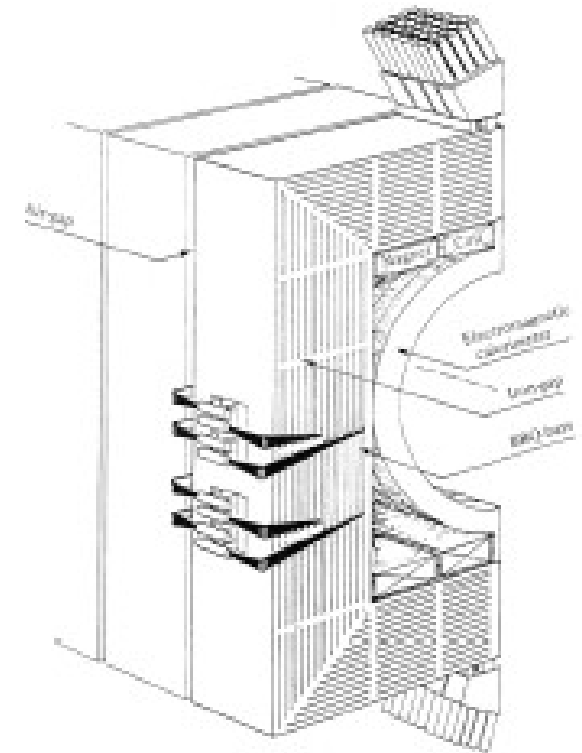
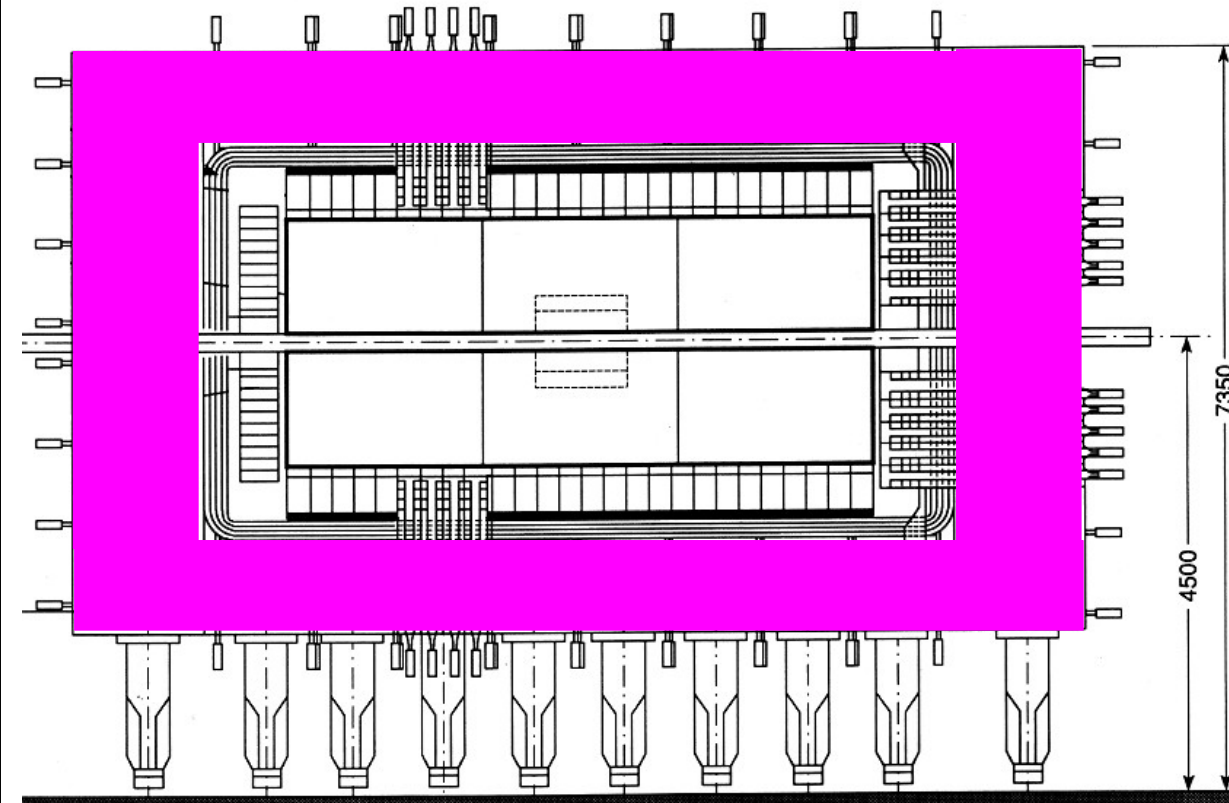


„gondola“

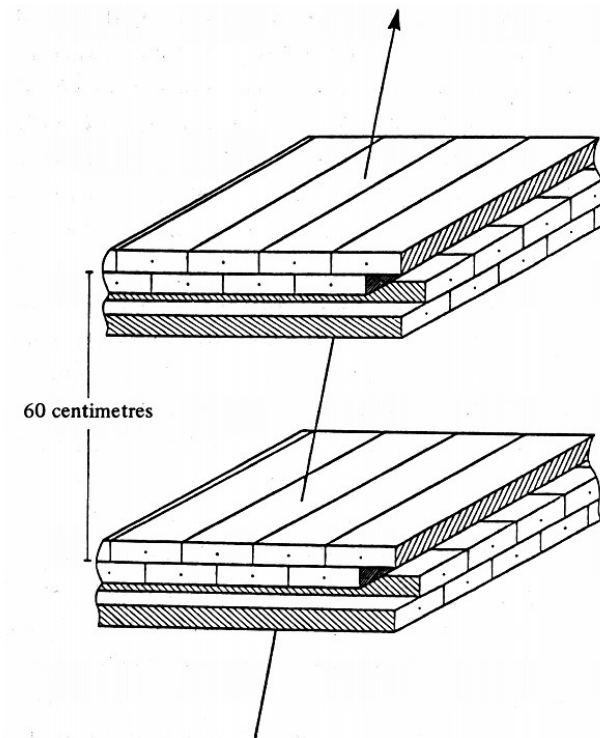
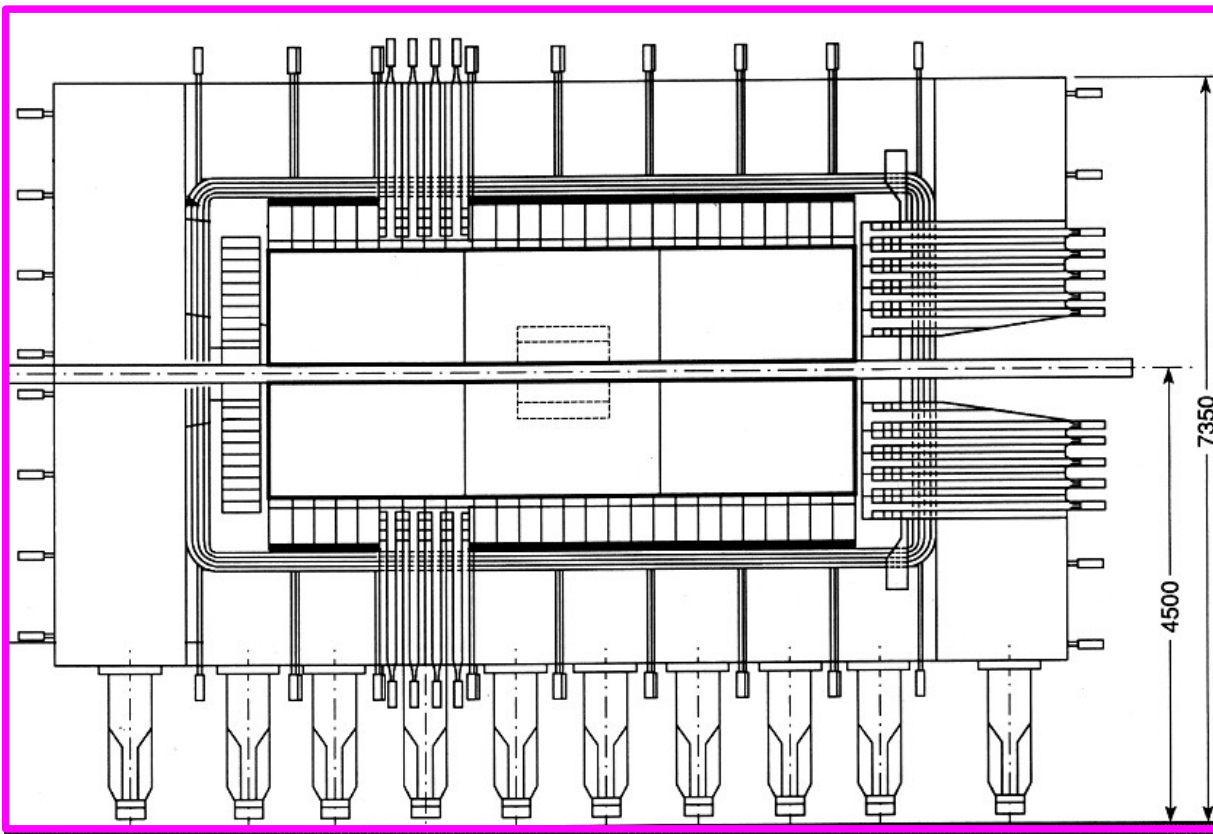
- Magnetisches Dipol-Feld von $\approx 0,7\text{T}$ senkrecht zur Strahlrichtung
- Wicklungen bestehen aus Aluminium

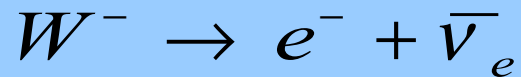


- Bestimmung der Teilchenenergien (Hadronen)
- Rückflussjoch des Magneten als Absorber + Szintillatoren
- über Faseroptik mit Photomultipliern verbunden



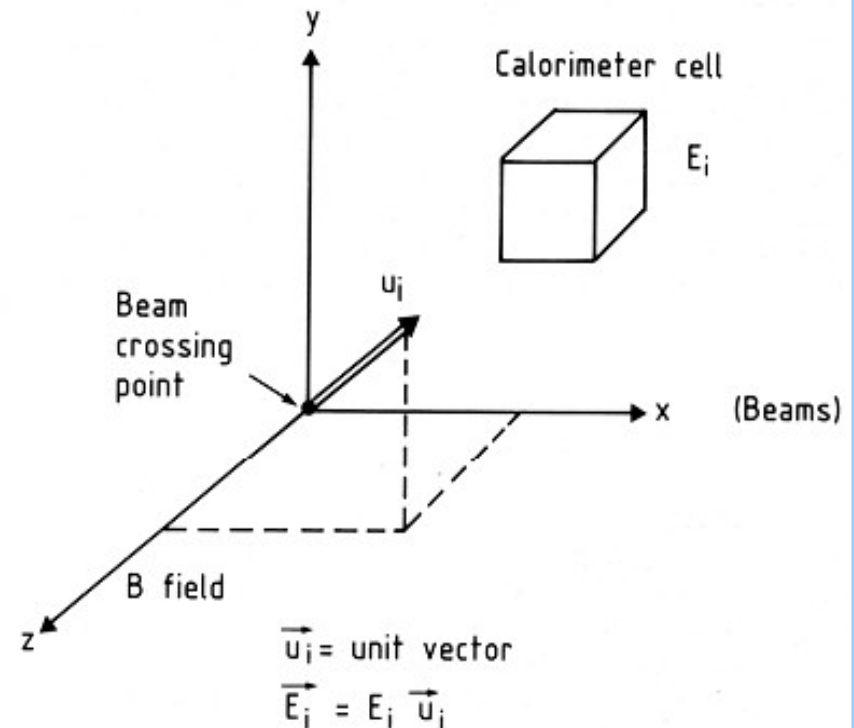
- Myonen durchdringen die Kalorimeter
→ kompletter Detektor von Myonen-Detektoren umgeben
- 2 Ebenen aus je 4 Lagen Driftröhren





- Impulse werden über die Krümmung im Magnetfeld bestimmt und zum „energy-flow-vector“ E_i addiert
- Neutrino-Impuls kann nicht gemessen werden
 - aus dem fehlenden Impuls kann auf den Impuls des Neutrinos zurück geschlossen werden

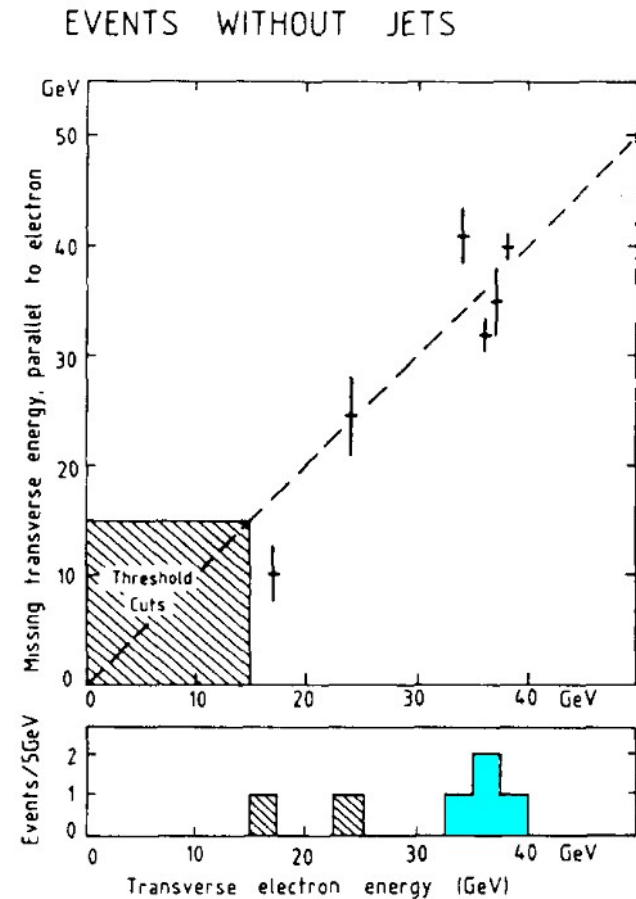
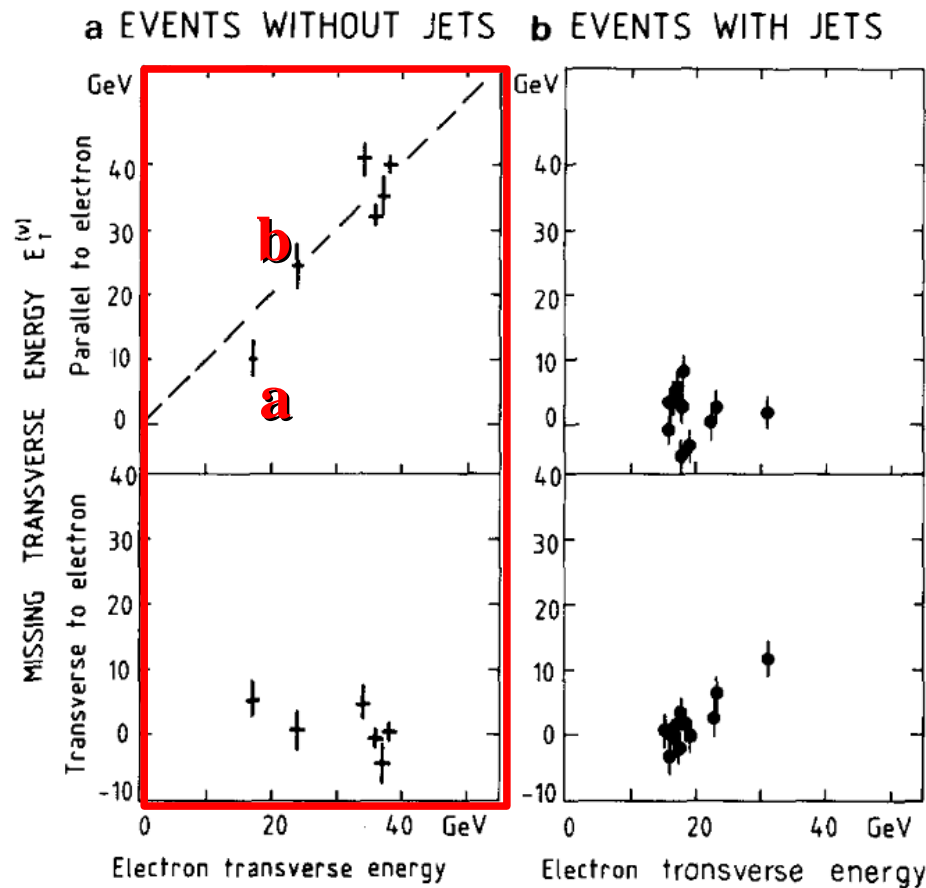
CONSTRUCTION OF ENERGY VECTORS



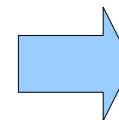
Momentum conservation $\rightarrow \sum_i \vec{E}_i = 0$
(ideal detector)

- Datenaufnahme im November/Dezember 1982
→ **10^9 $p\bar{p}$ -Kollisionen**
- Elektronen-Trigger ausgelöst
→ **$9,75 * 10^5$ Ereignisse**
- Transversalenergie E_T in zwei „gondola“ oder „bouchon“ muss zusammen größer als 15GeV sein
→ **28.000 Ereignisse**
- die Spur muss einen Transversalimpuls $p_T > 7$ GeV/c haben
→ **2125 Ereignisse**
- die Spur mit $p_T > 7$ GeV/c muss zwei benachbarte „gondolas“ mit $E_T > 15$ GeV treffen
→ **1106 Ereignisse**
- andere Spuren, die das selbe „gondola-Paar“ treffen, dürfen nicht mehr als 2GeV/c Transversalimpuls (p_T) besitzen
→ **276 Ereignisse**

- Die Winkelinformation aus den Photomultipliern muss mit den Winkelinformationen aus der Driftkammer innerhalb der dreifachen Auflösung übereinstimmen
→ **167 Ereignisse**
- Im hadronischen Kalorimeter in Spurrichtung darf maximal eine Energie von 600MeV deponiert werden ($E_c < 600\text{MeV}$)
→ **72 Ereignisse**
- Die in den „gondolas“ deponierte Energie muss mit der aus der Spur berechneten übereinstimmen
→ **39 Ereignisse**
 - **11 Ereignisse** mit Jet in entgegengesetzter Richtung zur Spur
 - **23 Ereignisse** mit zwei Jets
 - **5 Ereignisse** ohne Jet-Aktivitäten
- Ein weiteres Ereignis aus alternativer Event-Selektion
→ **6 Ereignisse**

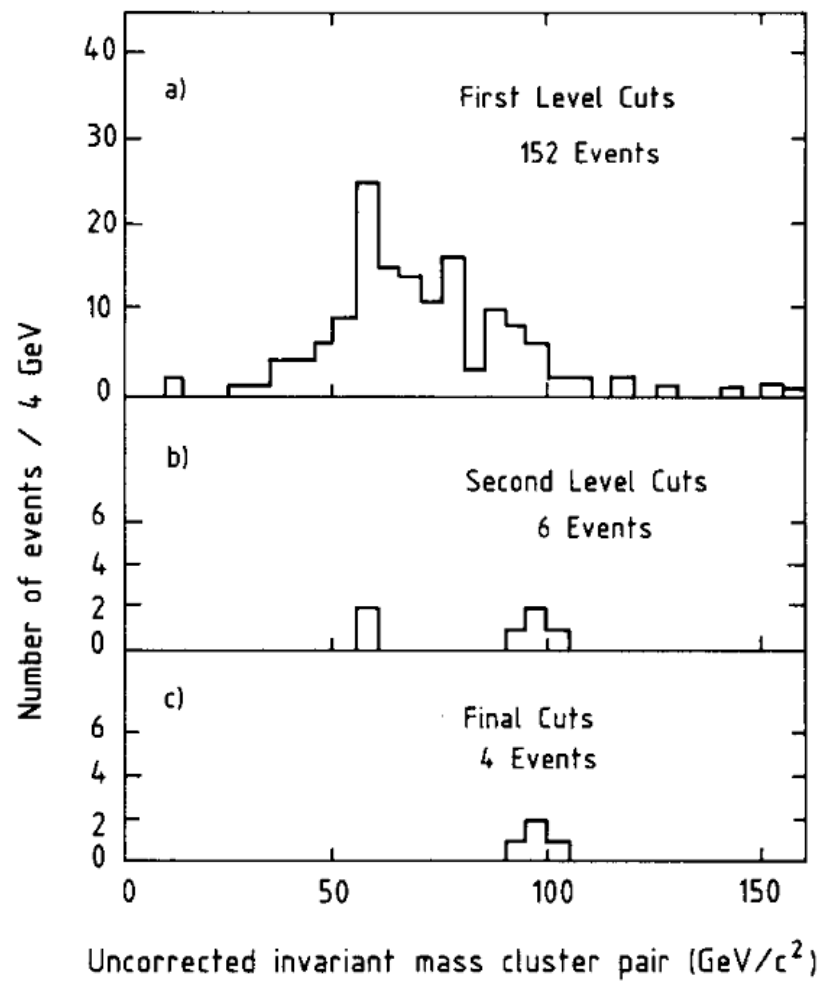


Ereignis **a** wird als Jet-Ereignis identifiziert und **b** wegen diversen Unsicherheiten nicht weiter beachtet



$$m_W = (81 \pm 5) \text{ GeV}/c^2$$

Die Suche nach dem Z^0 - Datenanalyse



$$Z^0 \rightarrow e^+ + e^-$$

$$E_T > 25 \text{ GeV}$$



$$p_T > 7 \text{ GeV}/c$$



$$E_{\text{hadron.}} < 800 \text{ MeV}$$



$$m_Z = (95,2 \pm 2,5) \text{ GeV}/c^2$$

	m_W [GeV]	m_Z [GeV]
Vorhersage	$82 \pm 2,4$	$94 \pm 2,5$
SppS 1982	81 ± 5	$95,2 \pm 2,5$
SppS 1983	$80,9 \pm 1,5$	$95,6 \pm 1,4$
LEP 1995	$80,412 \pm 0,029$	$91,1875 \pm 0,0021$
heutiger Stand	$80,425 \pm 0,038$	$91,1876 \pm 0,0021$



Z^0 wird heute zur Kalibrierung von
ATLAS und CMS benutzt!

- Suche nach dem Higgs-Boson am LHC am CERN
- Erweiterung der ESW um schwere WW (QCD) zu einer „Grand Unified Theory“ (GUT) ?!
- Erweiterung der GUT um Gravitation zur „Weltformel“ ?!

- The discovery of the W and Z, D. Denegri, Phys. Rept. 403-404 (2004) 107 – 145
- UA1 Collaboration, G. Arnison et al., Phys. Lett. B122 (1983) 103
- UA1 Collaboration, G. Arnison et al., Phys. Lett. B126 (1983) 398
- http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1984/
- http://de.wikipedia.org/wiki/Elektroschwache_Wechselwirkung
- <http://de.wikipedia.org/wiki/UA1-Detektor>
- web.physik.rwth-aachen.de/~hebbeker/lectures/pp34/ua1.pdf

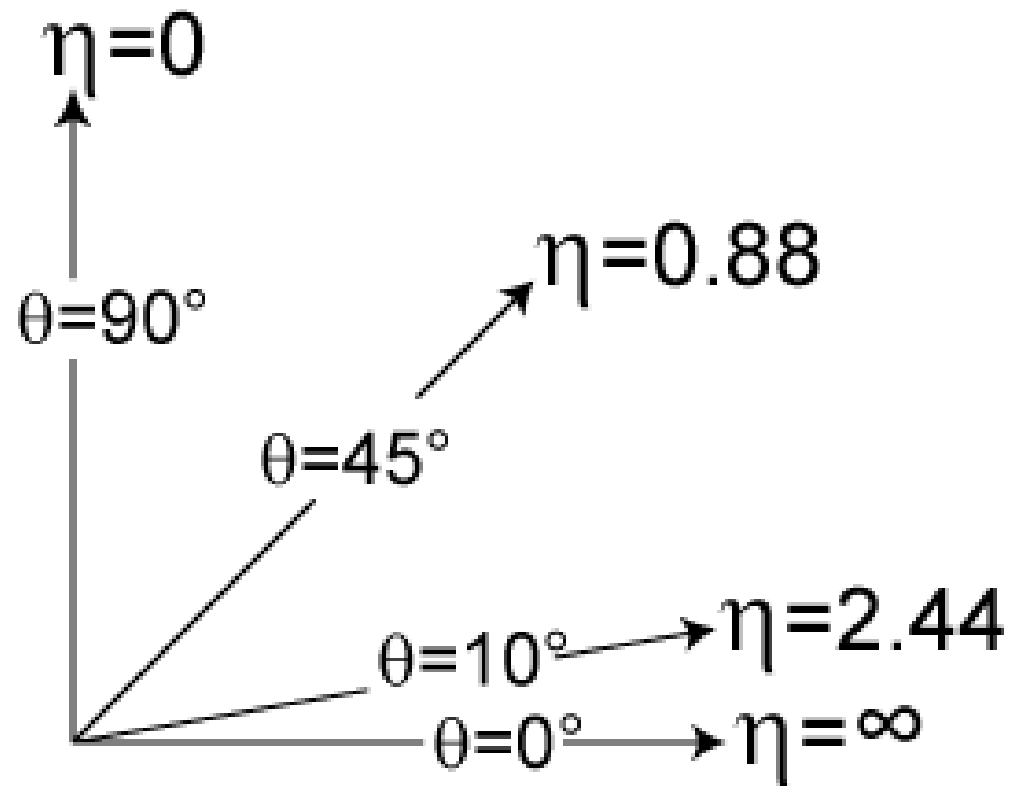
**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit**

- Transversale Masse : $m_T \leq m_W$

$$m_T^2 = (E_T^e + E_T^{\nu})^2 - (\vec{p}_T^e + \vec{p}_T^{\nu})^2 = 2\vec{p}_T^e \cdot \vec{p}_T^{\nu} \cdot (1 - \cos(\Phi_{e\nu}))$$

- m_W wird über den Wirkungsquerschnitt bestimmt:

$$\frac{d\sigma}{dp_T^e} = \frac{d\sigma}{d\cos\theta} \cdot \frac{d\cos\theta}{dp_T^e} = \frac{d\sigma}{d\cos\theta} \cdot \frac{2p_T^e}{m_w \cdot c} \cdot \frac{1}{\sqrt{(m_w \cdot c/2)^2 - (p_T^e)^2}}$$



$$\eta = -\ln \left[\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right]$$

theoretisch mögliche Zerfälle des W^\pm :

$$\begin{array}{l}
 \boxed{W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e \quad W^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu} \quad W^- \rightarrow \tau^- + \bar{\nu}_\tau \\
 W^- \rightarrow d\bar{u} \quad W^- \rightarrow s\bar{c}
 \end{array}$$

theoretisch mögliche Zerfälle des Z^0 :

$$\begin{array}{l}
 \boxed{Z^0 \rightarrow e^- + e^+ \quad Z^0 \rightarrow \mu^- + \mu^+} \quad Z^0 \rightarrow \tau^- + \tau^+ \\
 Z^0 \rightarrow \nu + \bar{\nu} \quad Z^0 \rightarrow q + \bar{q}
 \end{array}$$