

# Die Weltmaschine LHC

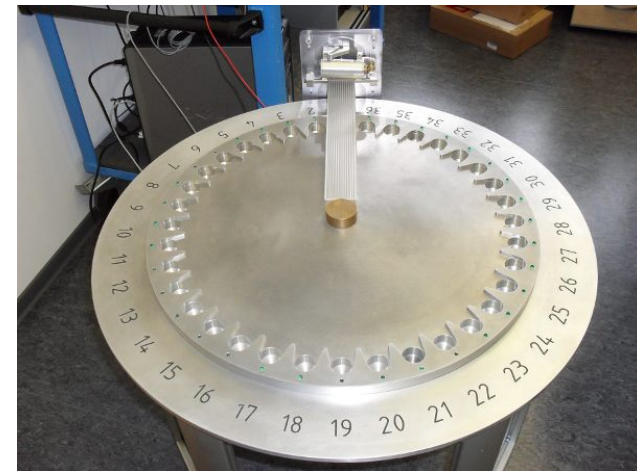
Grundlagen von Teilchenbeschleunigern

Wolfgang Wagner

20. Dezember 2016

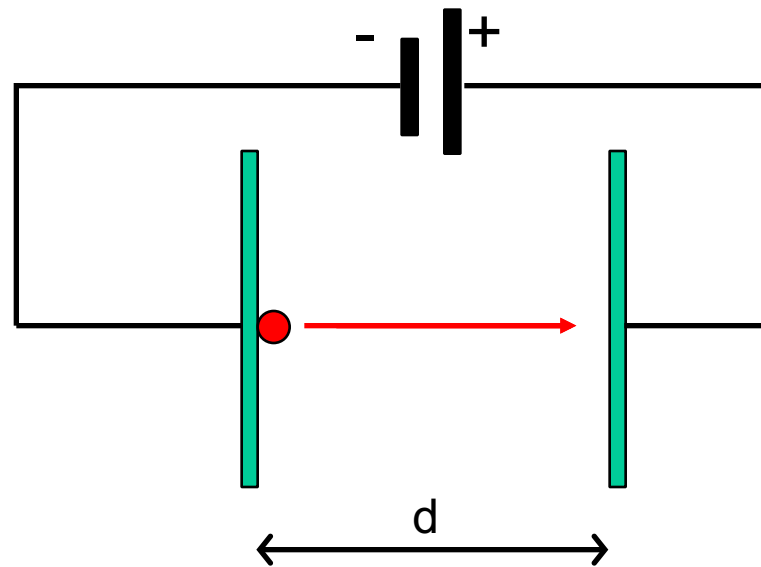
Bergische Universität Wuppertal

- 1) Auftaktveranstaltung an der Bergischen Universität ✓  
Folien: <http://www.atlas.uni-wuppertal.de/~wagner/Outreach/Outreach.html>
- 2) Einführung in die Welt der Elementarteilchen ✓
- 3) Einführung in Streuexperimente: Das mechanische Streuexperiment ✓
- 4) Vorlesung zum Large Hadron Collider (LHC) ✓
- 5) Starke und schwache Wechselwirkung
- 6) Der Rutherford-Versuch (im Praktikum)
- 7) Zusammenstellung eines Teilchenquartetts
- 8) Schulvorlesung zur Teilchenidentifikation
- 9) Einblick in die Astroteilchenphysik
- 10) Schülerversuche: Myonnachweis mit Kamiokanne und Szintillationszähler
- 11) Schauerdetektion: Experimente an der Universität
- 12) Analyse von LHC-Kollisionsdaten
- 13) Abschlussveranstaltung an der Universität:  
„Die offenen Fragen der Teilchenphysik“



z.B. Elektron im  
Plattenkondensator

$U = 10000 \text{ V}$ $d = 1 \text{ m}$ $q = e_0$ $\Delta E = 10000 \text{ eV}$
--



Energiegewinn:  $E_{\text{neu}} = E_{\text{alt}} + \Delta E$  ist unabhängig von

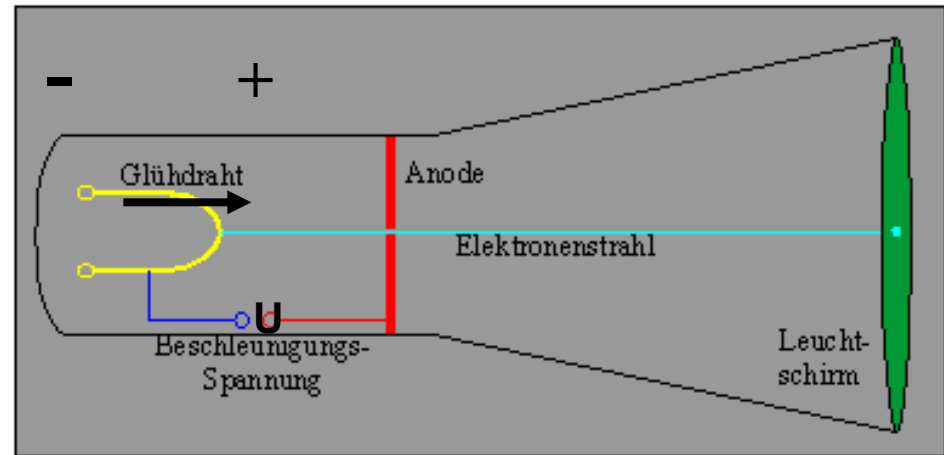
- der Anfangsenergie,
- der Geschwindigkeit des Teilchens,
- der Länge der durchlaufenen Strecke.

**Definition der Einheit „eV“:** Ein Teilchen mit der Ladung  $e_0$ , welches eine Spannung von einem Volt durchläuft, gewinnt die Energie von einem eV (Elektronenvolt). Es gilt:  $1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$

## DIE BRAUNSCHE RÖHRE

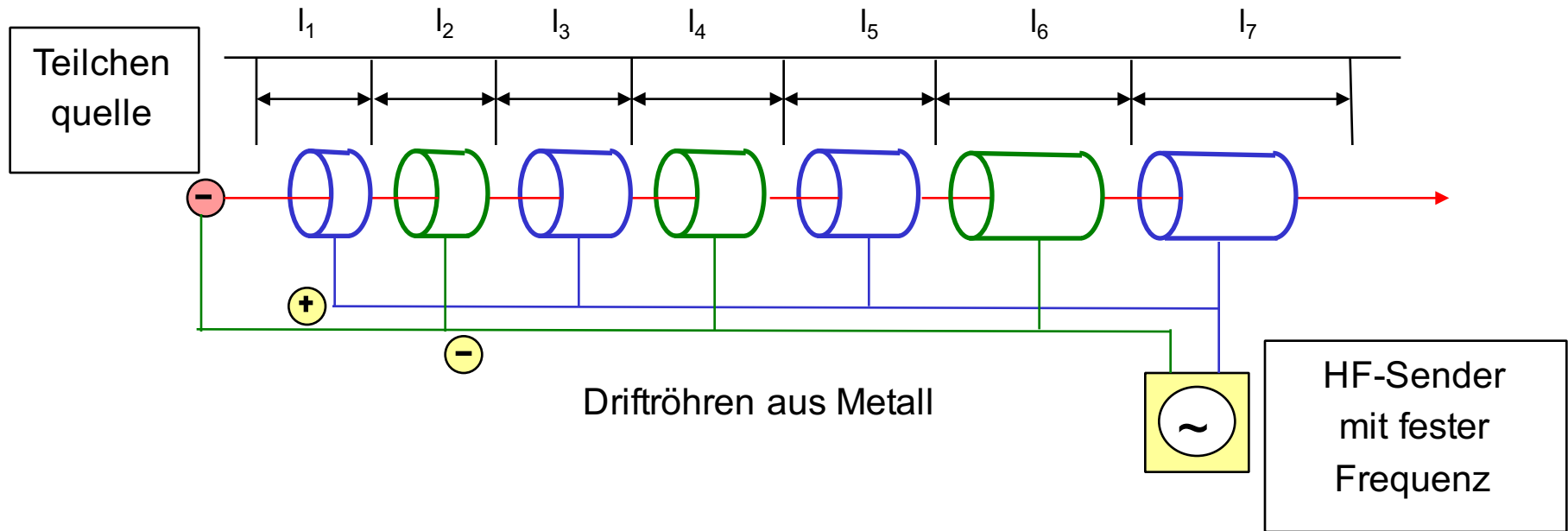
Beschleunigungsspannung  $U = 1$  Volt  
⇒ kinetische Energie = 1 eV

Beschleunigungsspannung  $U = 1000$  Volt  
⇒ kinetische Energie = 1 keV



**MODERNE ANFORDERUNGEN:**

**$1.000.000.000.000 \text{ eV} = 10^{12} \text{ eV} = 1 \text{ TeV}$**



- Teilchen treten aus der Quelle aus und werden vom Potential der ersten Driftröhre beschleunigt
- Während die Teilchen durch die erste Driftröhre laufen, kehrt sich das Vorzeichen des Potentials um
- Teilchen treten aus der ersten Driftröhre aus und werden durch das Potential der 2ten Driftröhre beschleunigt
- Da die Geschwindigkeit der Teilchen steigt, werden die Abstände zwischen den Röhren länger.

Beschleunigung von  $H^-$  Ionen  
auf 400 MeV am Fermilab.



Linac ist 150 m lang

Driftröhren im Linac



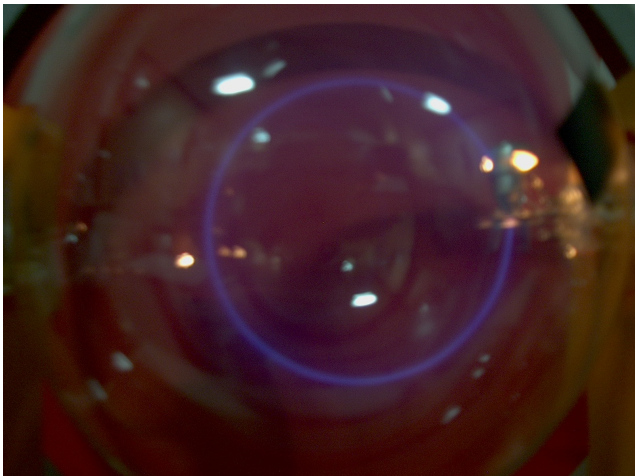
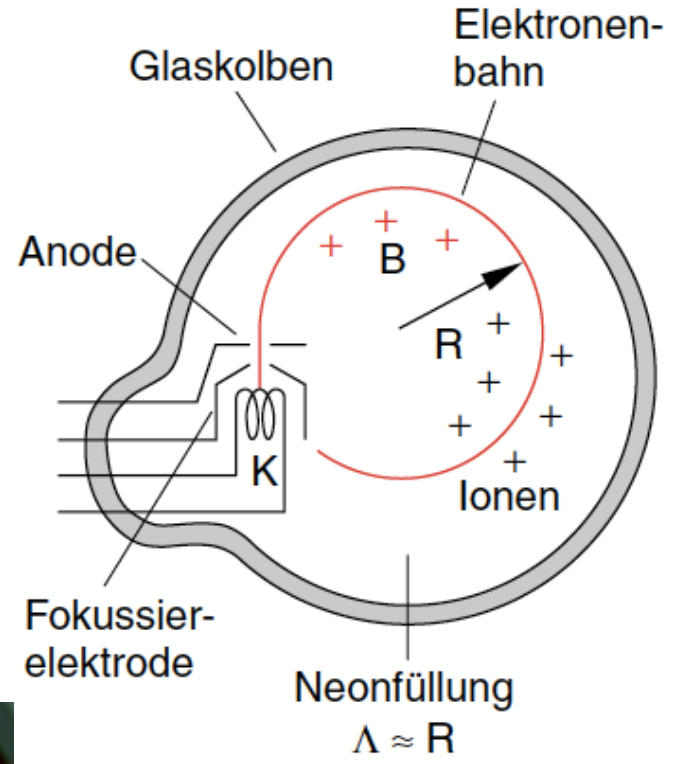
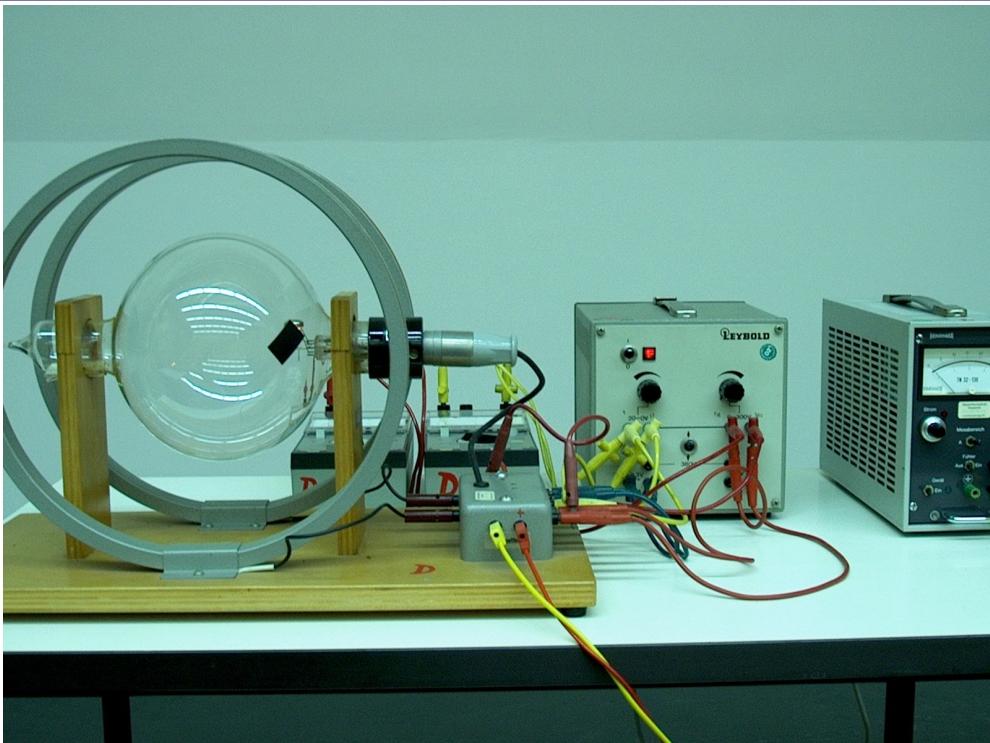
## bisher größter Linerbeschleuniger

Länge: ca. 3 km

Energie: 46 GeV  
 $e^+$  und  $e^-$



# Experiment: e/m-Messung im Fadenstrahlrohr







# Die Lorentzkraft

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

Lorentzkraft

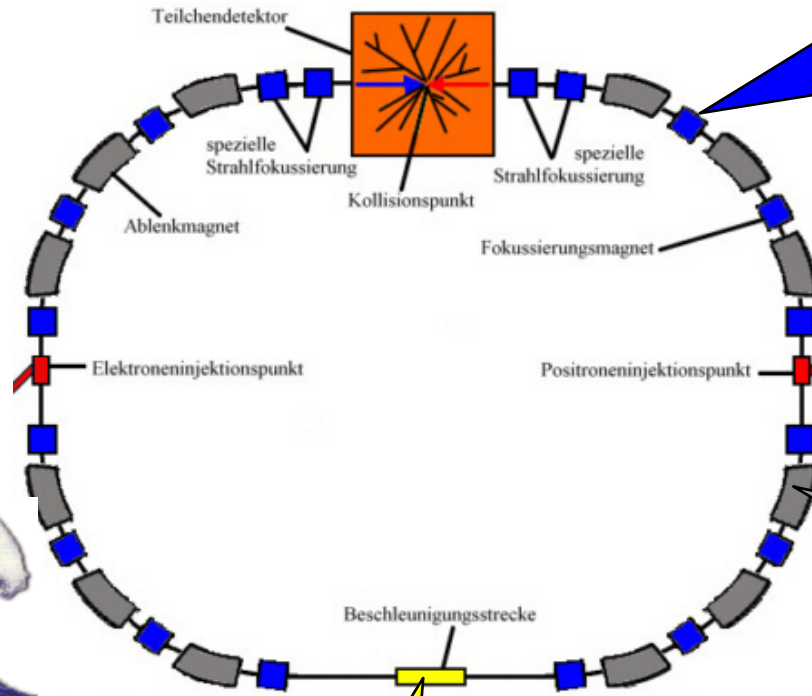
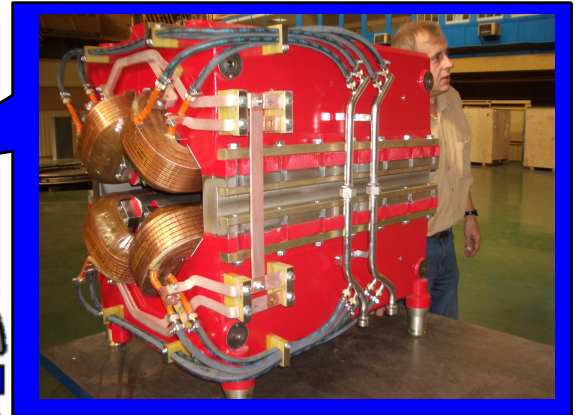
Erhöhung des Betrags  
der Geschwindigkeit

Ablenkung der  
geladenen Teilchen

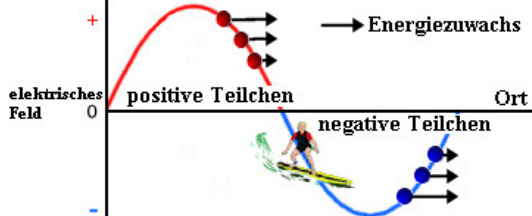


# Schema eines Synchrotrons

## Strahlfokussierung



## Bahnkrümmung



## Beschleunigung

Teilchen mit Masse erreichen nie genau die Lichtgeschwindigkeit.

– Beispiel: Elektron mit Impuls  $p = 1 \text{ GeV}/c$

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{pc}{E} = \frac{pc}{\sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}} = \frac{10^9}{\sqrt{10^{18} + 25 \cdot 10^{10}}} = 0.999999875$$

↑
↑

Quadrat von  $1 \text{ GeV}/c$ 
↑
↑

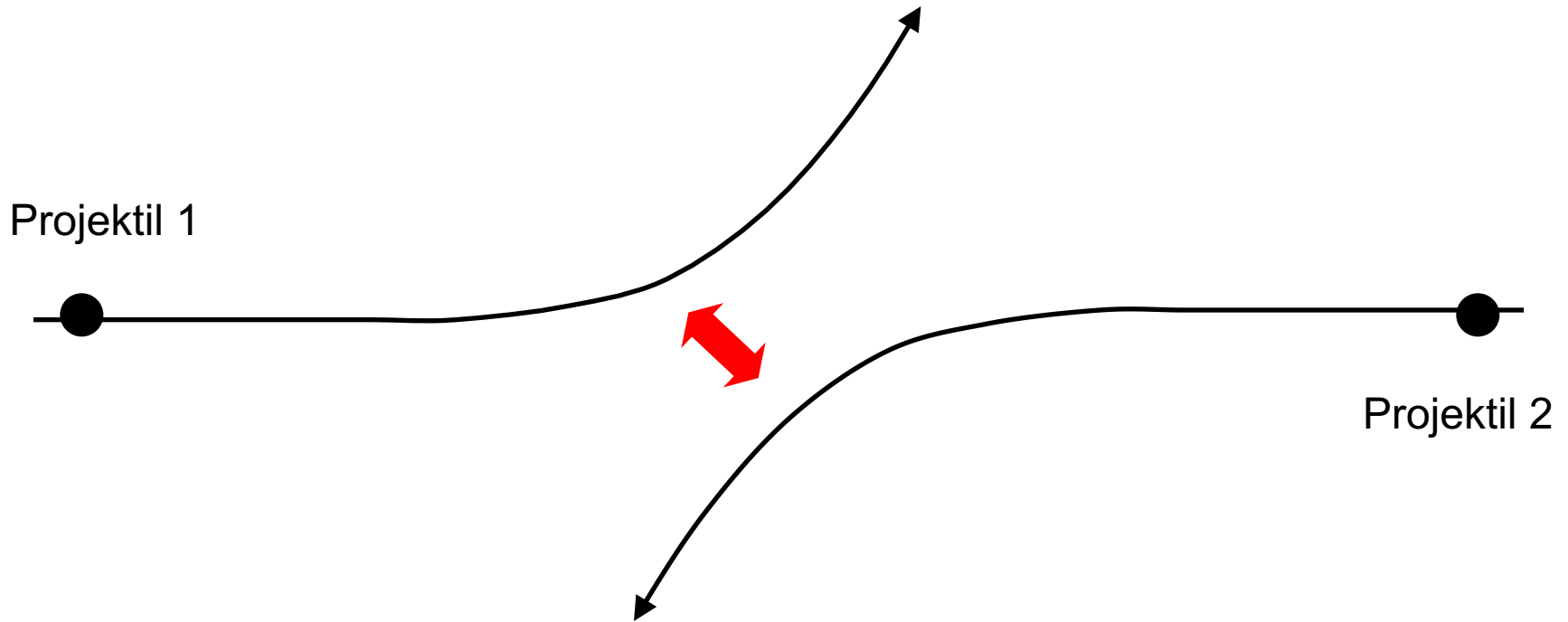
Impuls  $1 \text{ GeV}/c$

Quadrat der Masse des Elektrons

- d.h. das Elektron fliegt „fast“ mit Lichtgeschwindigkeit:  $c - 135 \text{ km/h}$ .
- Für ein Proton (Masse  $\sim 1 \text{ GeV}/c^2$ ) mit  $p = 1 \text{ GeV}/c$  ergibt sich lediglich:  
 $v = 0,71 c$

# Der „Collider-Trick“

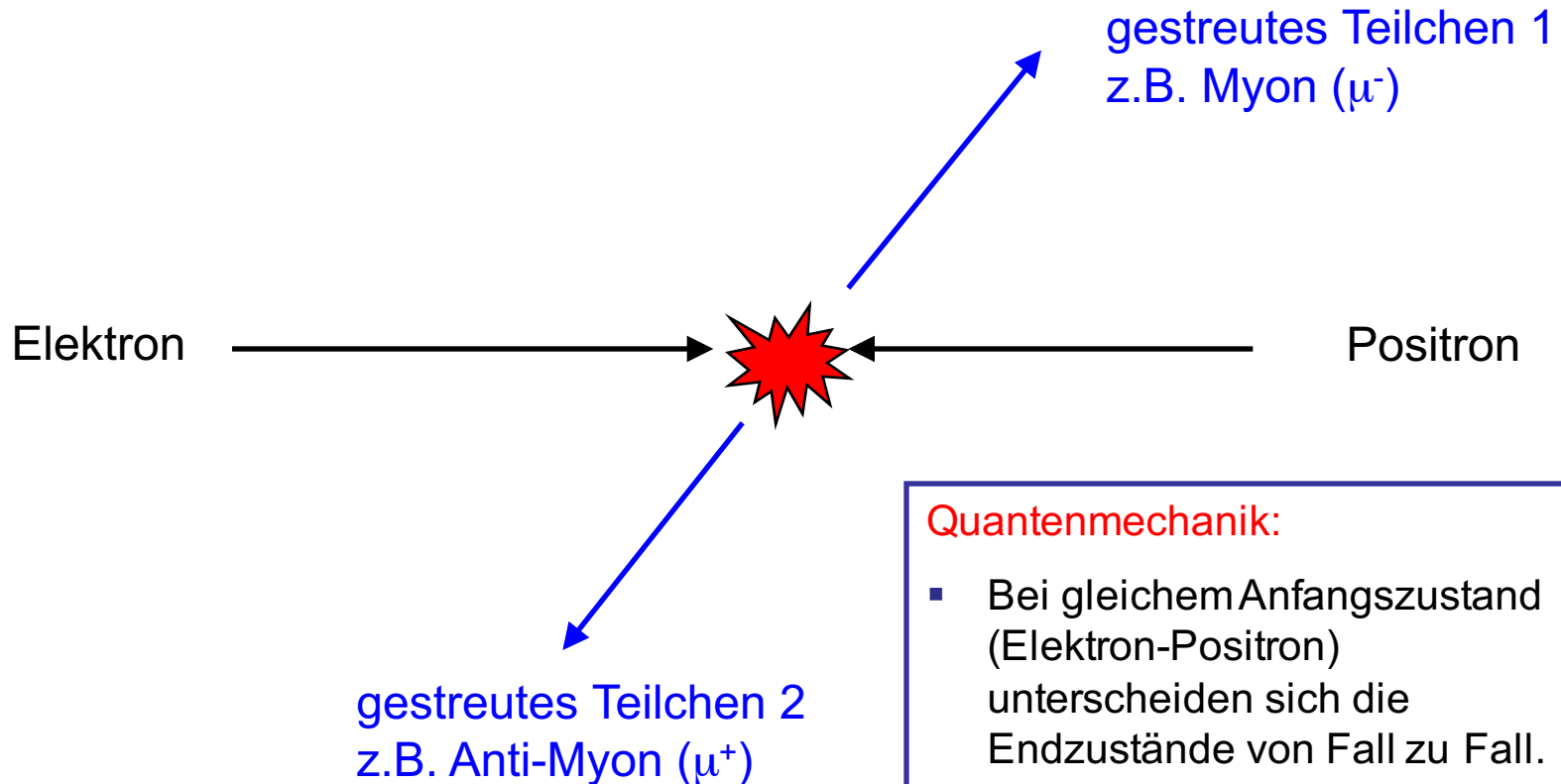
## Streuexperimente mit kollidierenden Strahlen



- Energie im Schwerpunktssystem:  $E_{CMS} = E_1 + E_2$
- Im Gegensatz zu:  
Streuung am stationärem Streuzentrum (fixed target):  $E_{CMS} = \sqrt{2mc^2 E}$

# Annihilation in Kollisionen

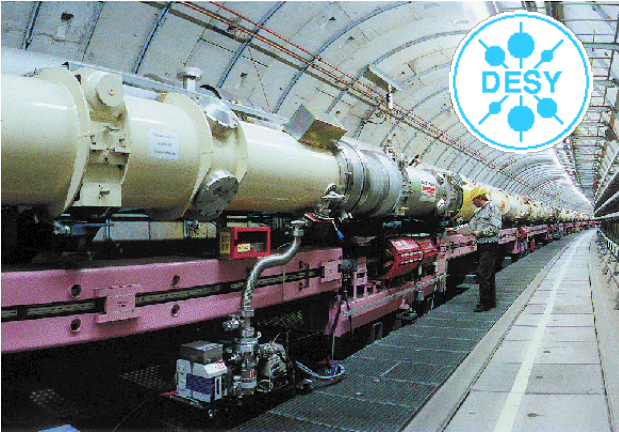
Lasse Teilchen und Antiteilchen kollidierenden.



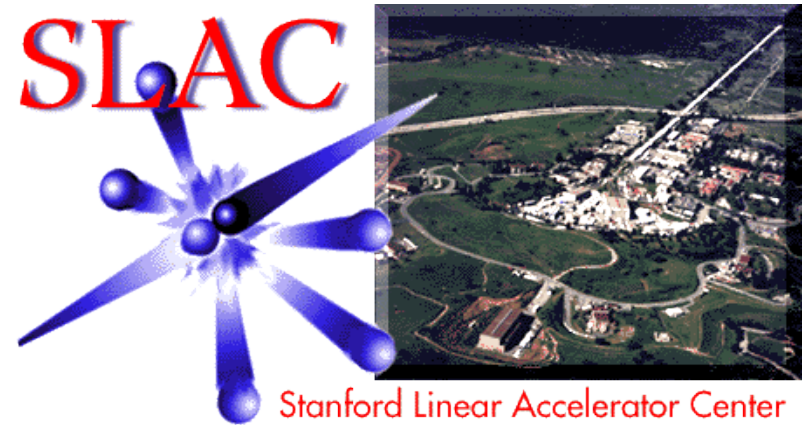
## Quantenmechanik:

- Bei gleichem Anfangszustand (Elektron-Positron) unterscheiden sich die Endzustände von Fall zu Fall.
- Nur statistische Aussage über Impuls- und Winkelverteilung und Teilchensorten möglich.

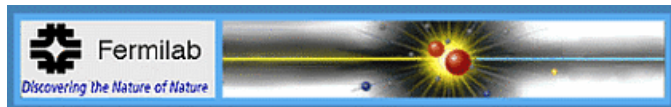
# Beschleunigerzentren



Deutsches-Elektronen-Synchrotron (DESY), Hamburg



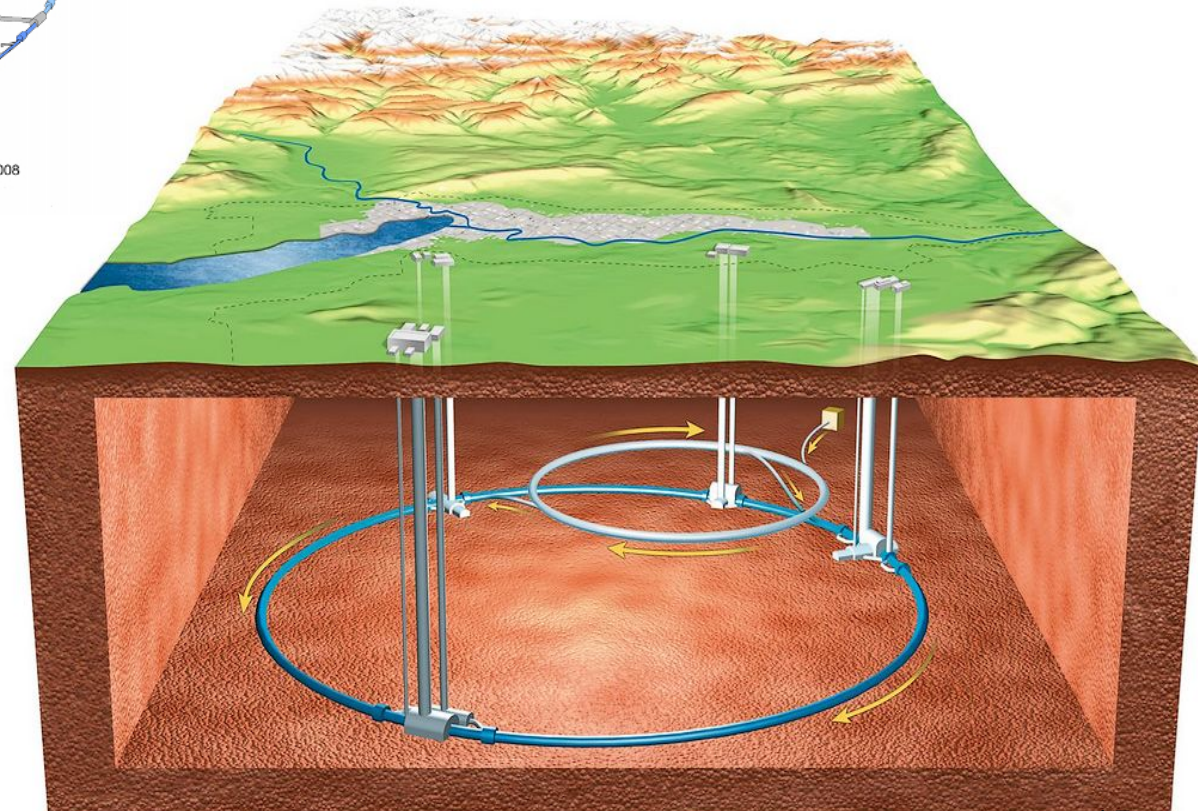
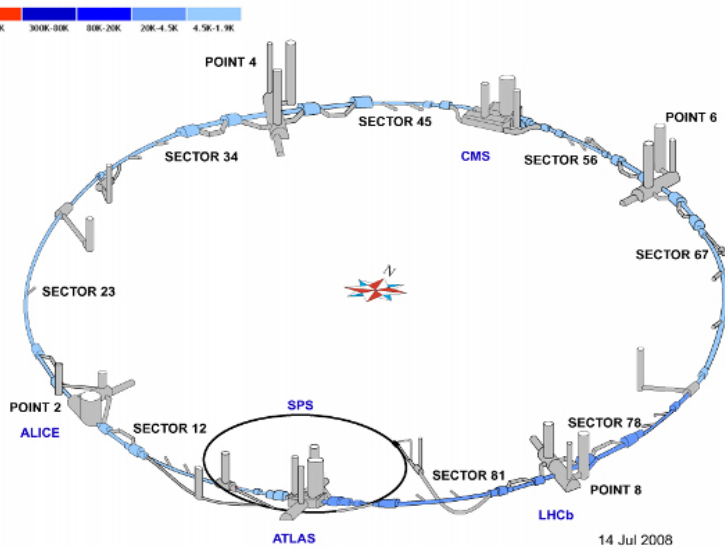
Fermi-National-Accelerator-Laboratory (FNAL), USA



Conseil-Européenne-pour la-Recherche-Nucléaire (CERN), CH/F

## Proton-Proton-Beschleuniger

- in Tunnel am CERN mit 27 km Umfang
- Protonen machen 10000 Runden/Sekunde
- 7 TeV pro Kollision, d.h Bedingungen wie zu Zeiten  $10^{-13}$  -  $10^{-14}$  s nach dem Urknall, Abstände bis  $10^{-19}$  m



## Vier Teilchendetektoren:

- **ATLAS**
- **ALICE**  
Pb-Pb-Kollisionen
- **CMS**
- **LHC-B**  
Physik der b-Quarks

# *CERN*

An aerial photograph of the CERN particle accelerator complex in Switzerland. The image shows a vast landscape of agricultural fields and forests, with several large, circular and oval-shaped tracks overlaid in white, representing the paths of the particle accelerators. The tracks are interconnected, forming a complex network. The text 'CERN' is prominently displayed at the top in a white, italicized font. Below it, a semi-transparent dark box contains the text 'das europäische Labor für Elementarteilchenphysik'. At the bottom, another semi-transparent dark box contains the text 'Gegründet 1954' and 'eines von Europas ersten Gemeinschaftsprojekten'.

**das europäische Labor für  
Elementarteilchenphysik**

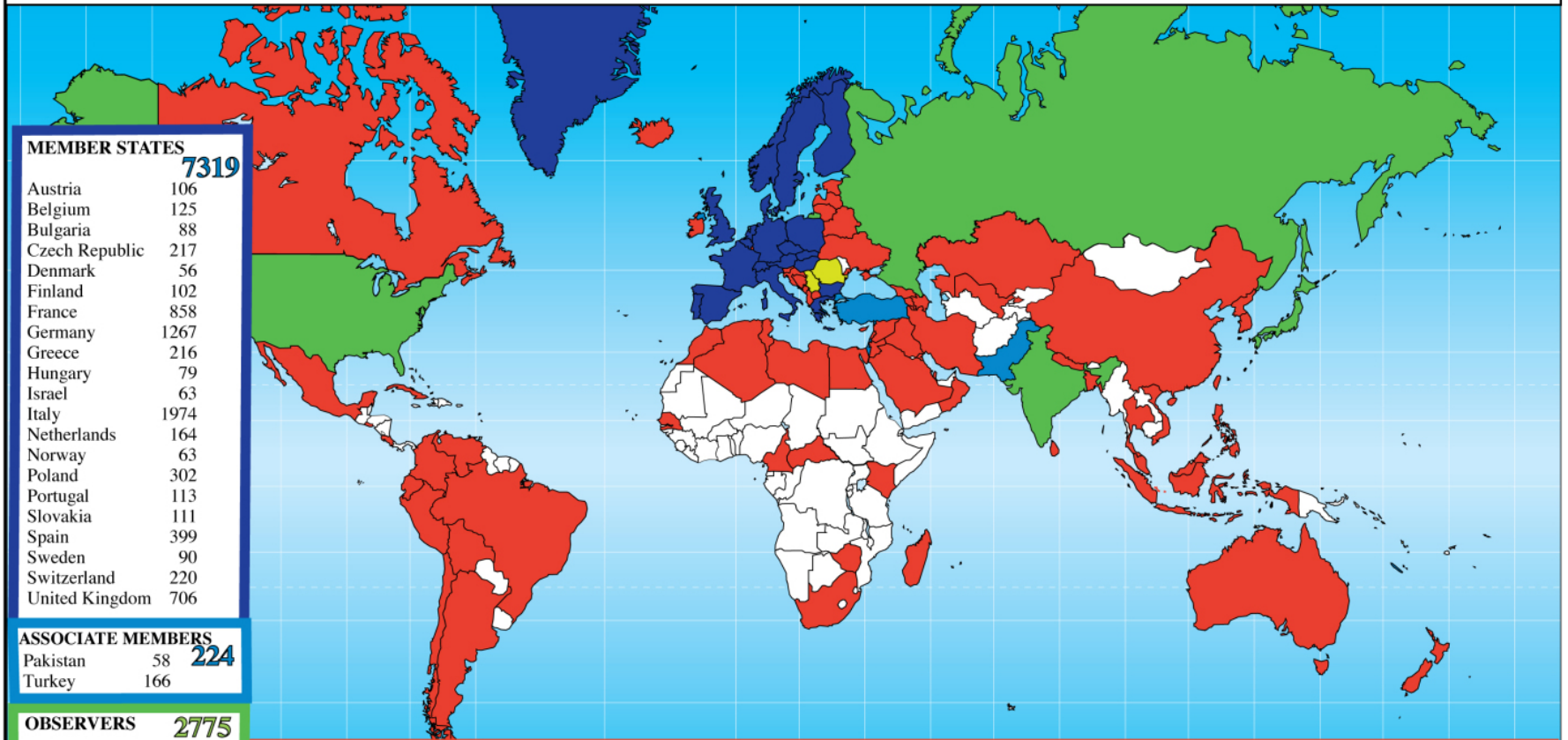
**Gegründet 1954  
eines von Europas ersten Gemeinschaftsprojekten**





# CERN Nutzer nach Nationen

## Distribution of All CERN Users by Nationality on 12 January 2016



MEMBER STATES		7319
Austria	106	
Belgium	125	
Bulgaria	88	
Czech Republic	217	
Denmark	56	
Finland	102	
France	858	
Germany	1267	
Greece	216	
Hungary	79	
Israel	63	
Italy	1974	
Netherlands	164	
Norway	63	
Poland	302	
Portugal	113	
Slovakia	111	
Spain	399	
Sweden	90	
Switzerland	220	
United Kingdom	706	

ASSOCIATE MEMBERS		224
Pakistan	58	
Turkey	166	

OBSERVERS		2775
India	284	
Japan	316	
Russia	1071	
USA	1104	

STATES IN ACCESSION TO MEMBERSHIP		195
Cyprus	19	
Romania	131	
Serbia	45	

OTHERS												1803
Bosnia & Herzegovina	1	Ecuador	4	Kazakhstan	1	Malta	5	Qatar	1	Thailand	20	
Brazil	135	Egypt	24	Kenya	2	Mauritius	1	San Marino	1	T.F.Y.R.O.M.	2	
Albania	4	El Salvador	1	Korea, D.P.R.	4	Mexico	84	Saudi Arabia	1	Tunisia	3	
Algeria	8	Canada	154	Korea Rep.	151	Montenegro	2	Senegal	1	Ukraine	88	
Argentina	24	Central African Rep.	1	Latvia	1	Morocco	13	Singapore	3	Uzbekistan	5	
Armenia	27	Chile	20	Iceland	4	Lebanon	12	Sint Maarten	1	Venezuela	11	
Australia	31	China	421	Indonesia	10	Libya	1	New Zealand	6	Slovenia	27	
Azerbaijan	11	Colombia	38	Iran	54	Lithuania	30	Oman	1	South Africa	31	
Bangladesh	7	Costa Rica	1	Iraq	1	Luxembourg	2	Palestine (O.T.)	7	Sri Lanka	3	
Belarus	50	Croatia	38	Ireland	20	Madagascar	4	Peru	6	Syria	1	
Bolivia	2	Cuba	13	Jordan	8	Malaysia	18	Philippines	4	Taiwan	56	

**Supraleitende Magnete** halten die Protonen auf der Kreisbahn.



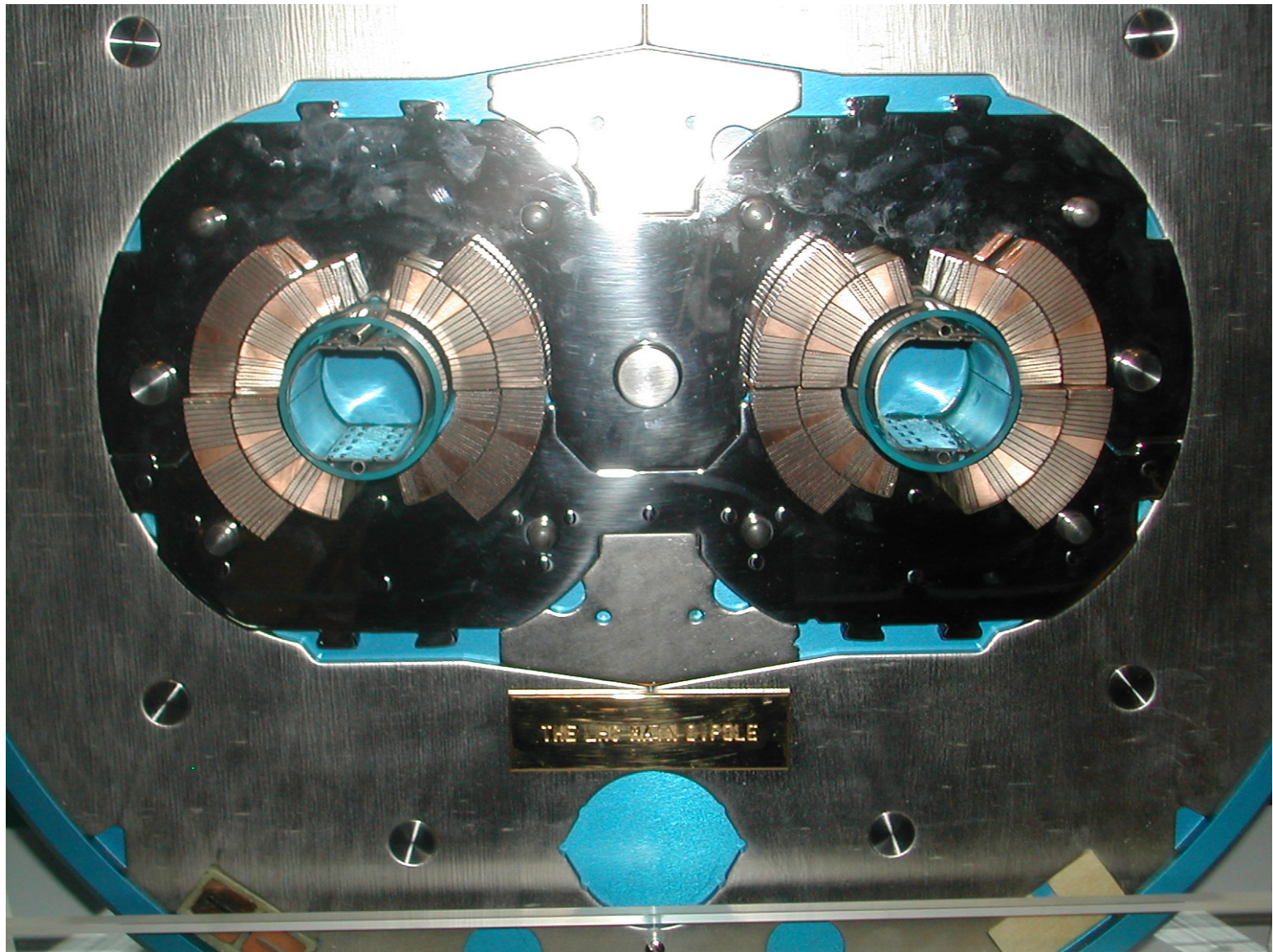
größte Herausforderung:

Magnetfeld von 8,3 Tesla

Betrieb bei einer Temperatur von 1.9 K



# LHC-Dipole



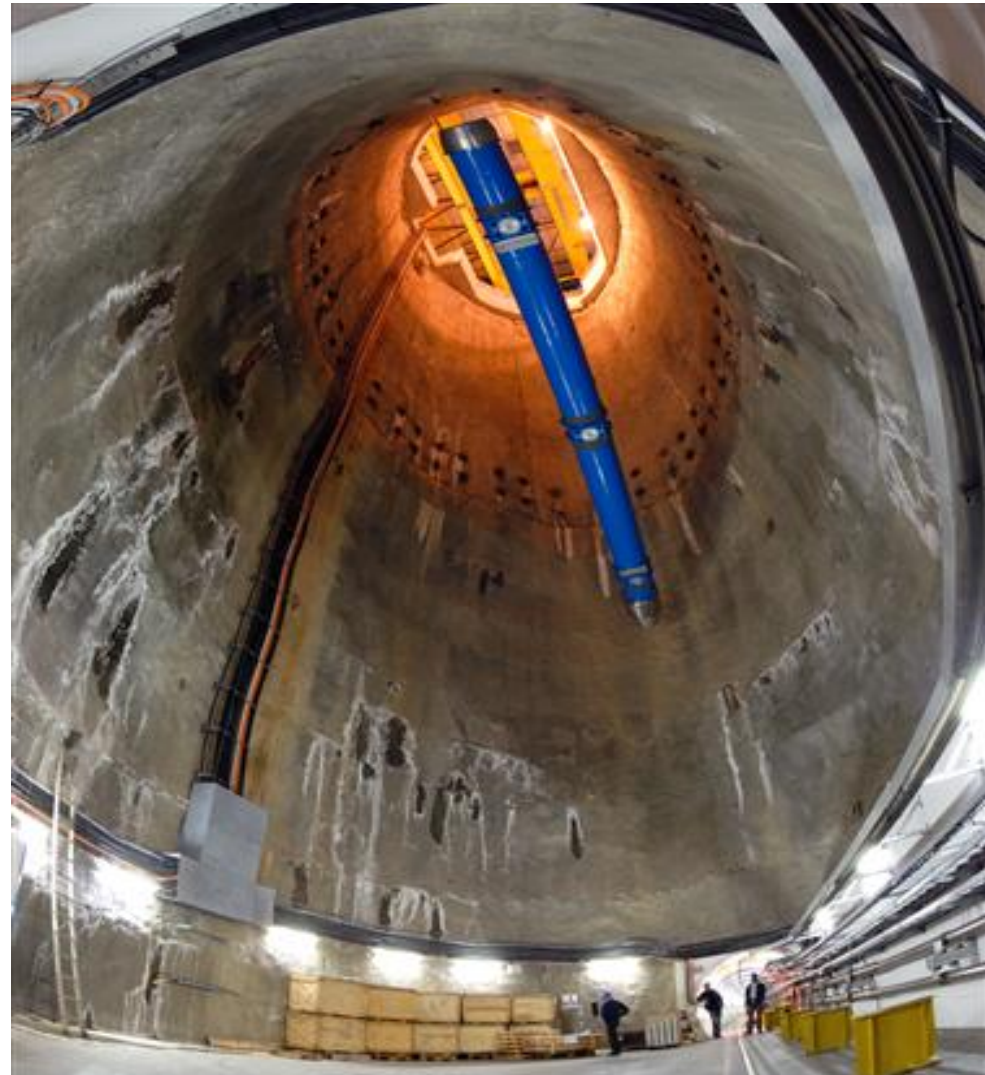
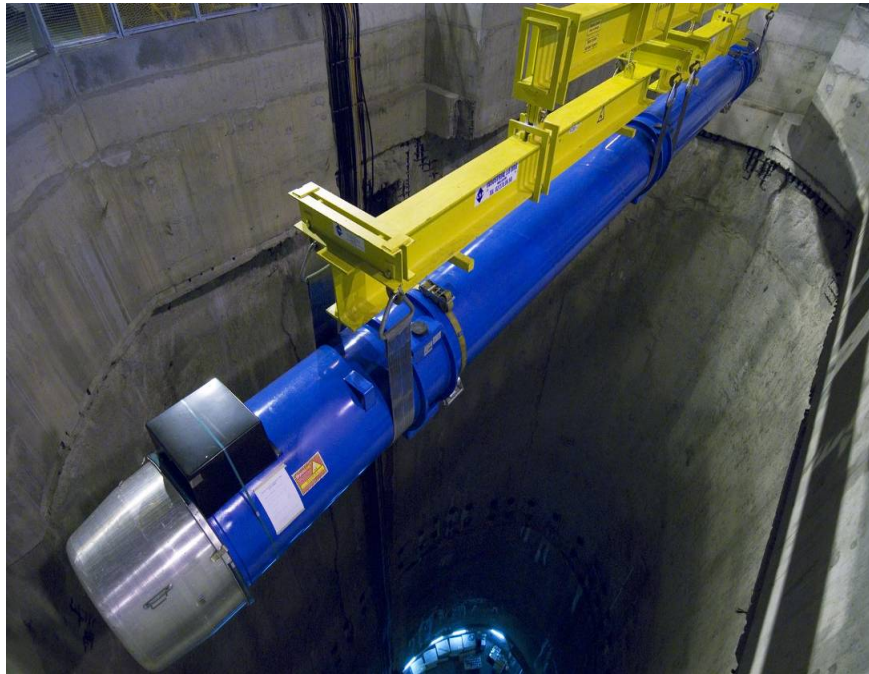
# 1232 Dipol-Magnete

15 m lang





# Magnete auf dem Weg in den Tunnel



Insgesamt 30.000 km Transportweg  
unter der Erde bei 2 km/h!

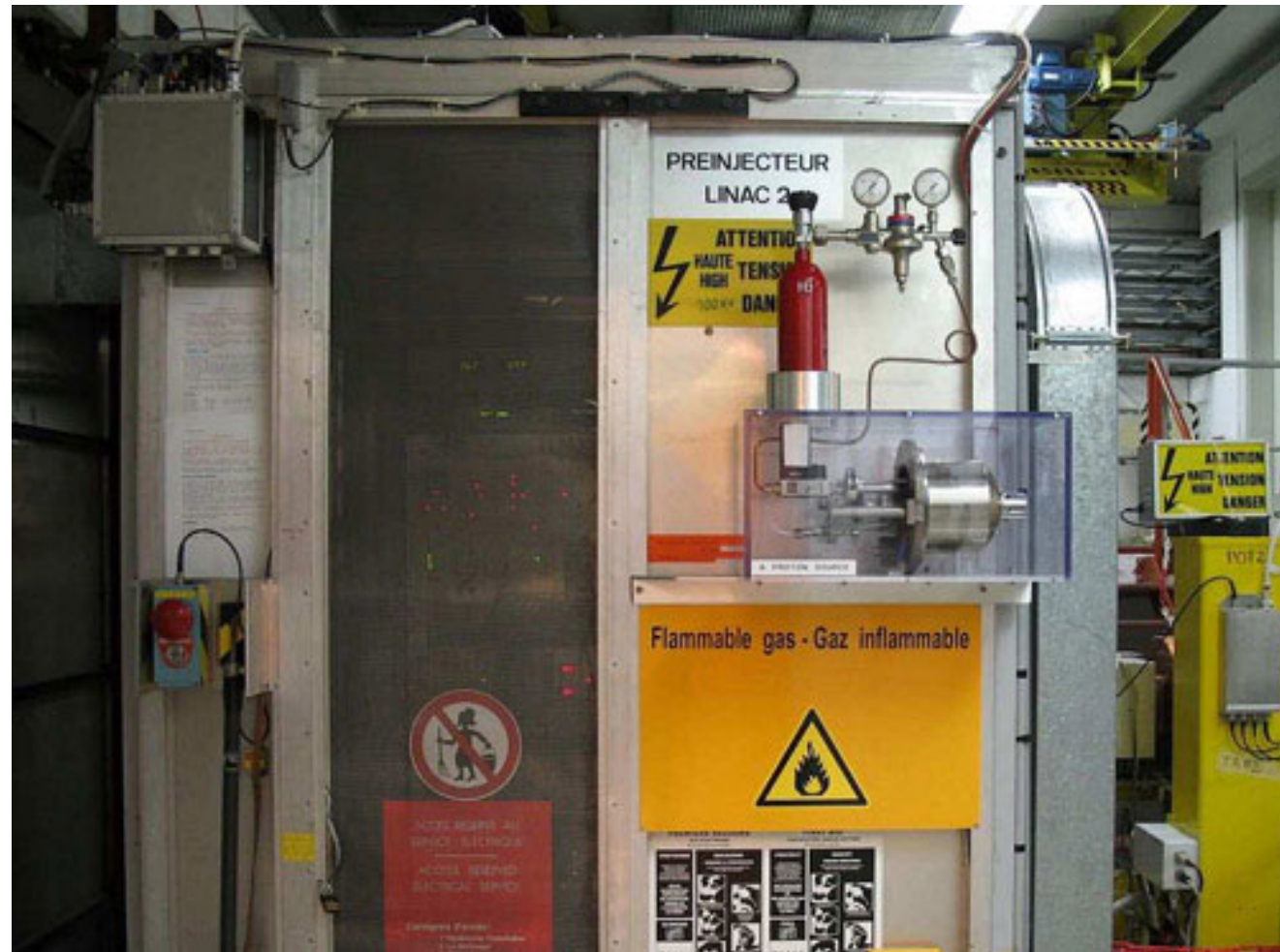
- Magnetfeld von 8,3 Tesla
- 270'000 km Kabelstränge mit 6400  
7 $\mu$ m dicken supraleitenden Filamenten
- Strom von 11'700 A
- Betriebstemperatur von 1.9 K

Der k $\ddot{u}$ hlste coolste Ring im Weltall !

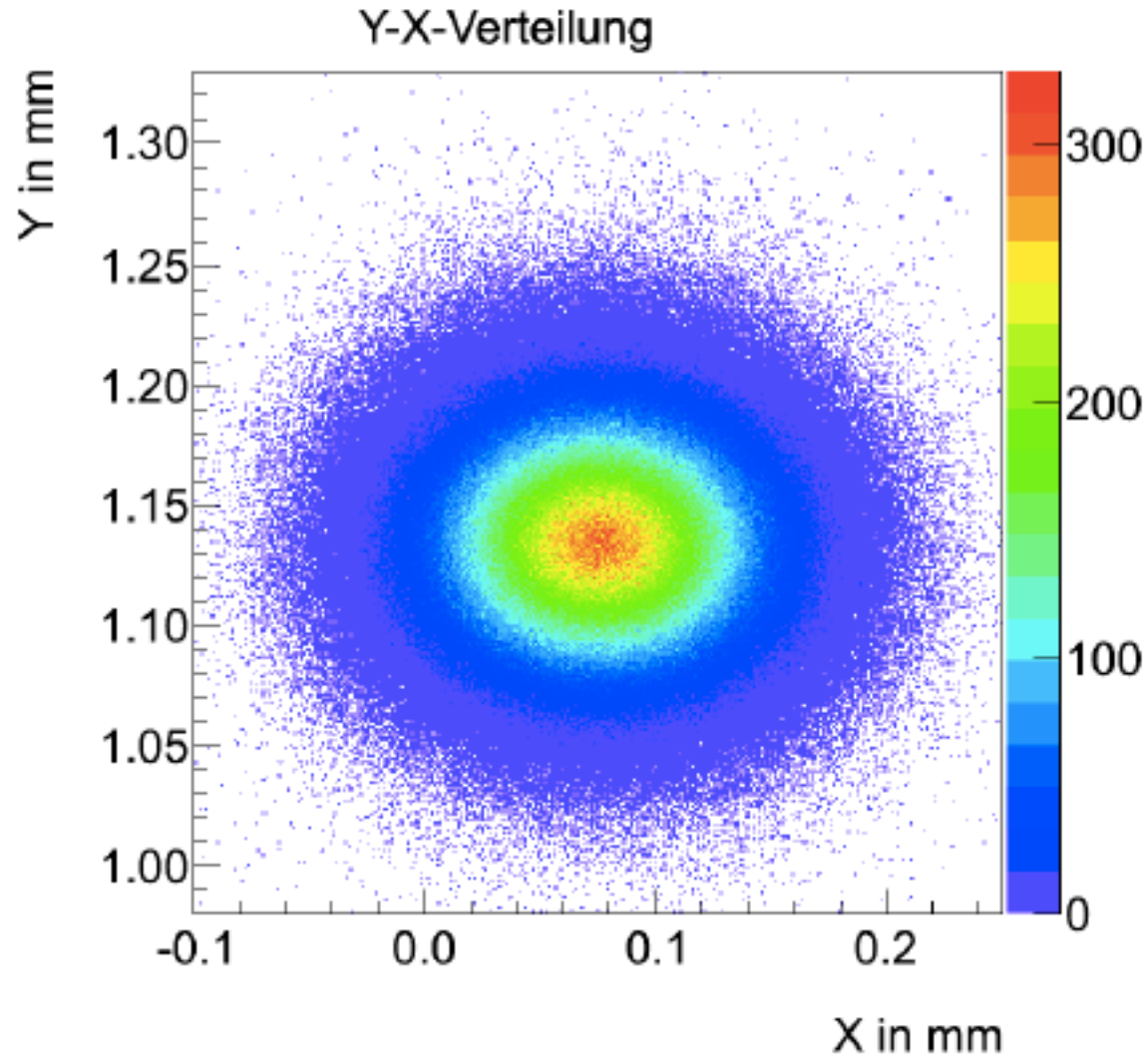
LHC-Magnete sind kalt: -271 $^{\circ}$ C

# Woher kommen die Protonen?

- Alles beginnt mit einer Wasserstoffflasche
- Wasserstoffgas wird mit Elektronenstrahl ionisiert



# Beamspot

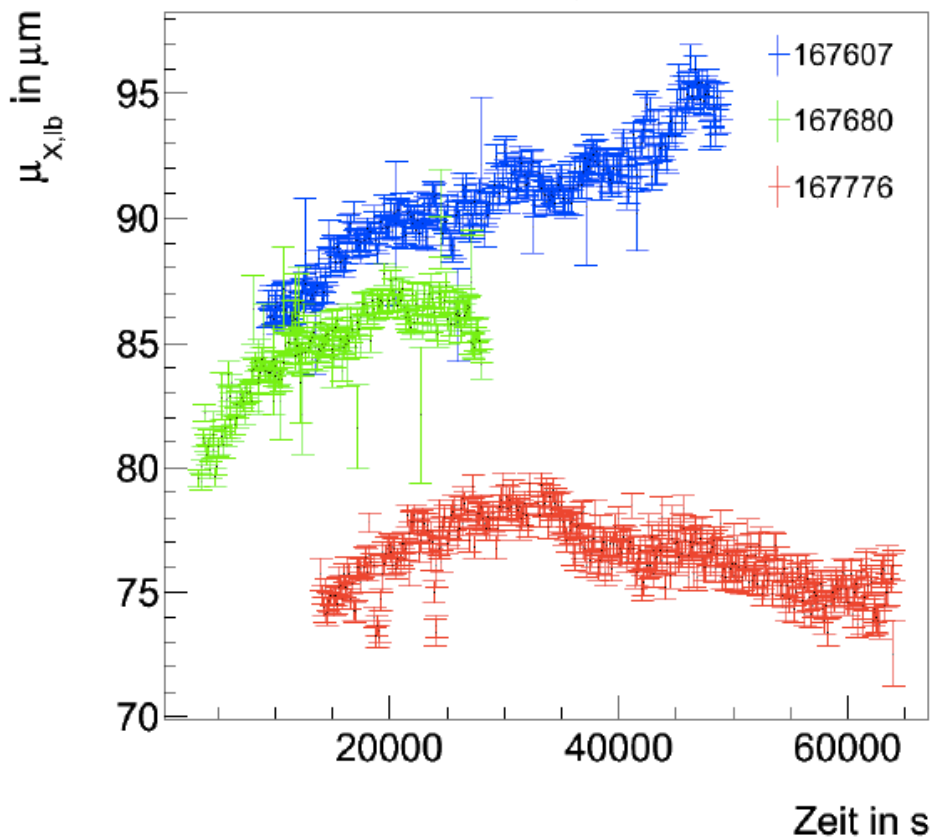




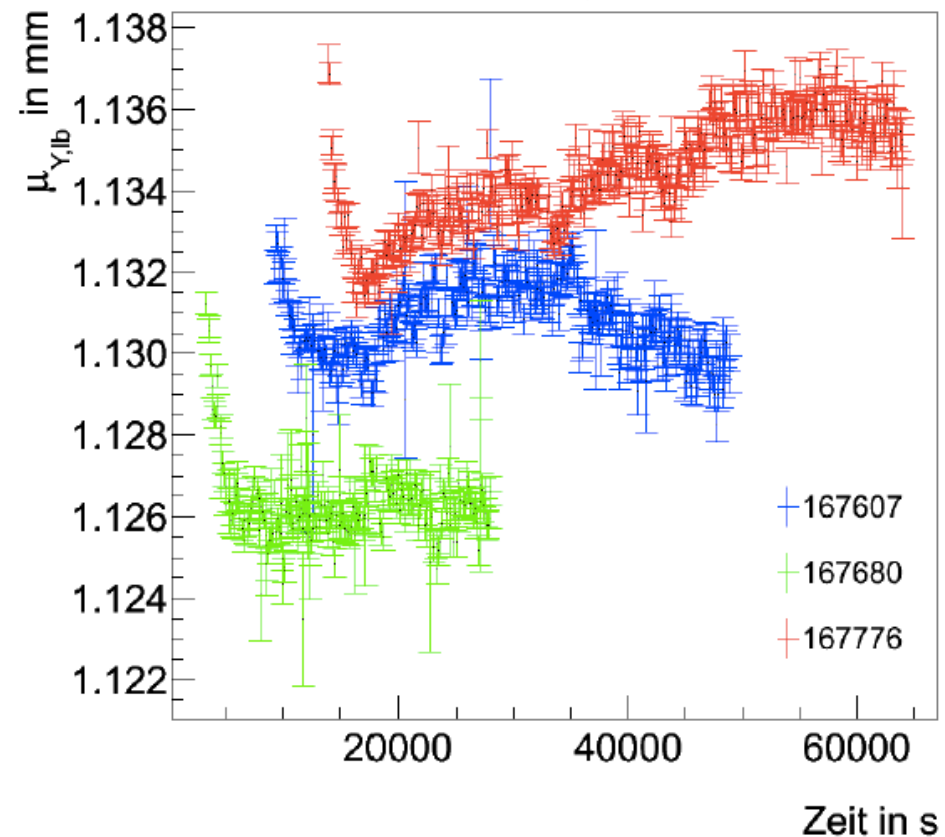


# Zeitliche Veränderung Beamspot

Verlauf von  $\mu_{X,lb}$



Verlauf von  $\mu_{Y,lb}$



Wechselwirkungsrate:

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

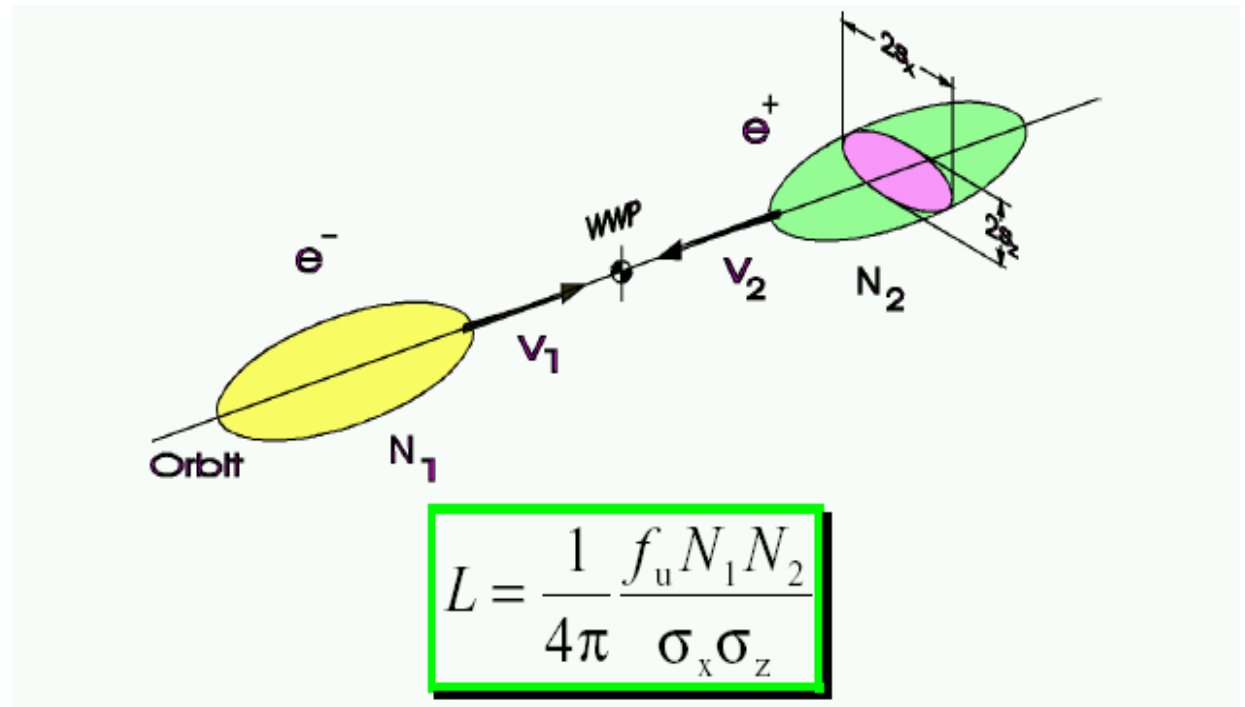
L: Luminosität

$\sigma$ : Wirkungsquerschnitt

Luminosität gibt die Leistungsfähigkeit der Beschleunigeranlage an

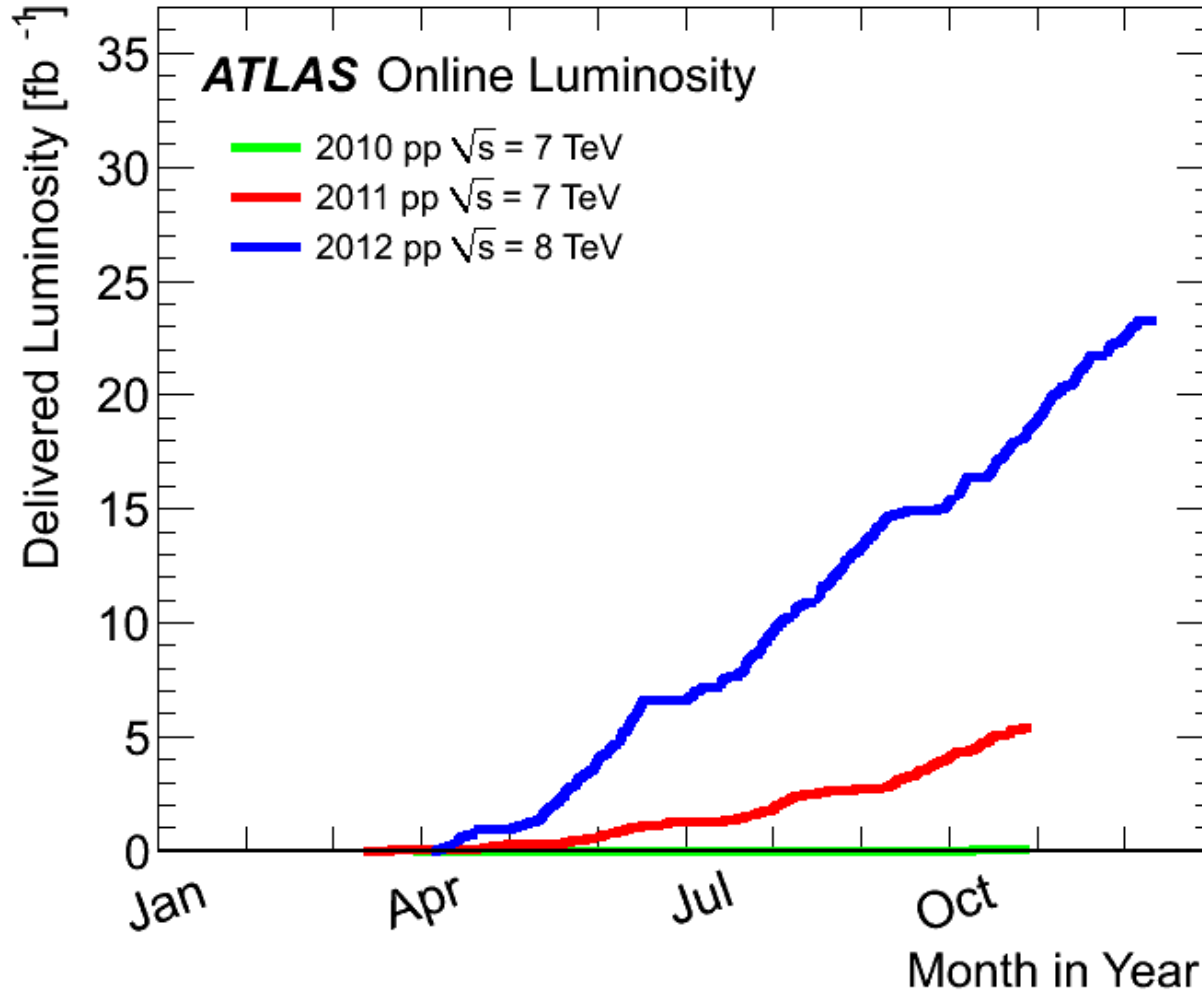
Einheit einer Teilchenstromdichte:

$\text{cm}^{-1} \text{s}^{-1}$



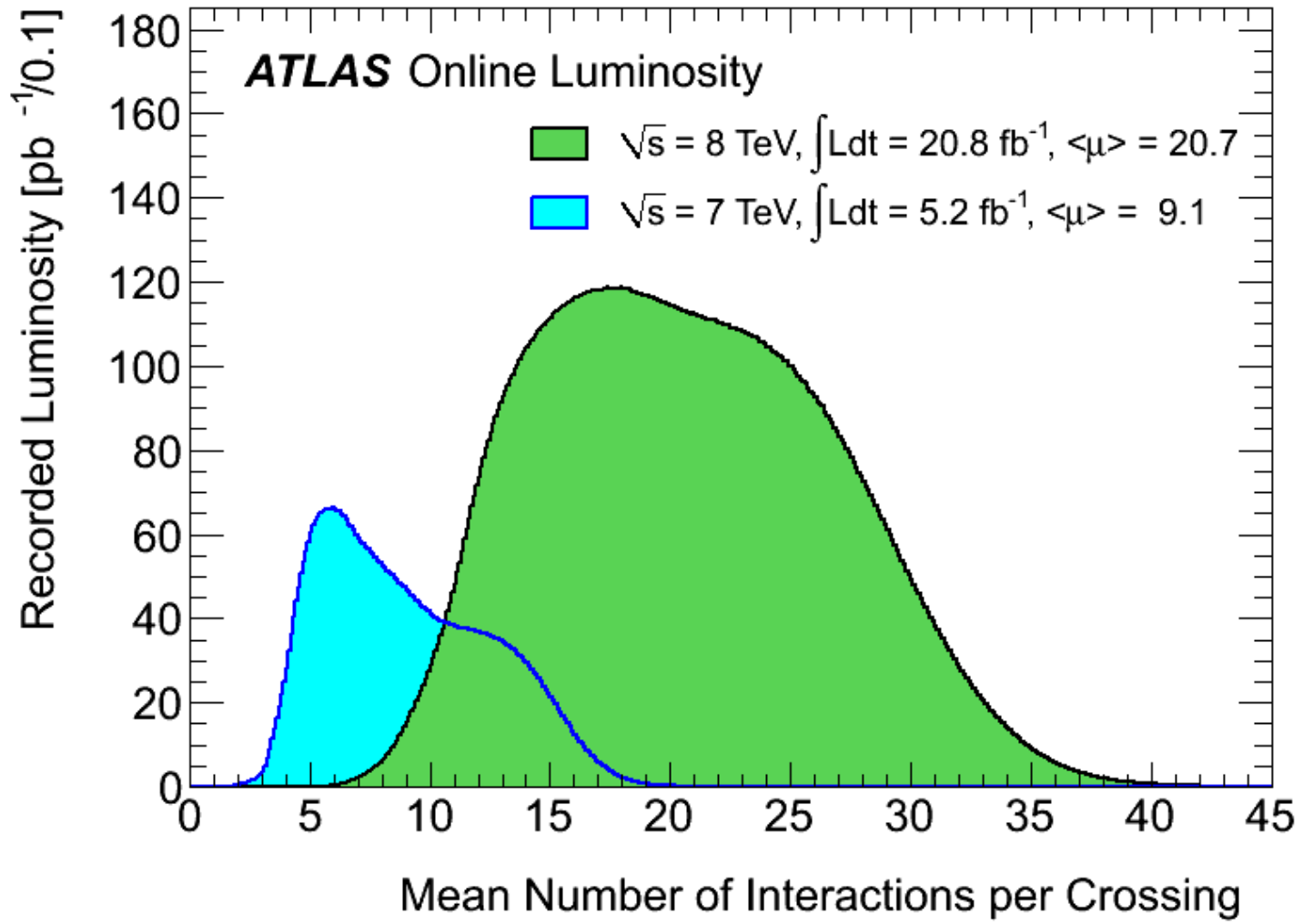


# Integrierte Luminosität



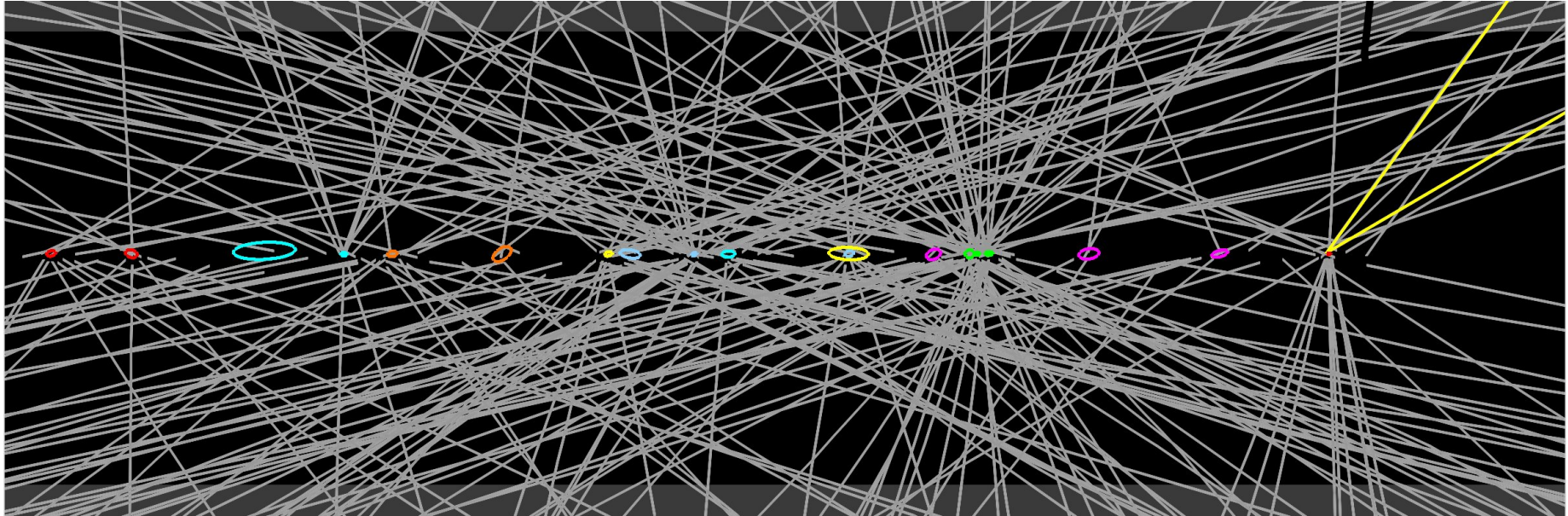


# Wechselwirkung pro Strahlkreuzung

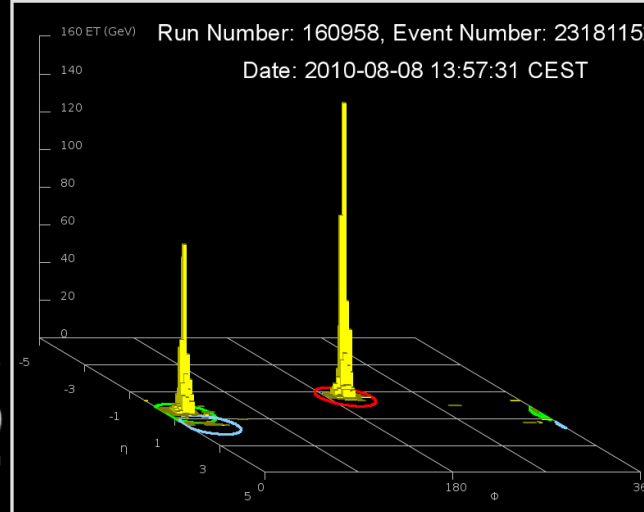
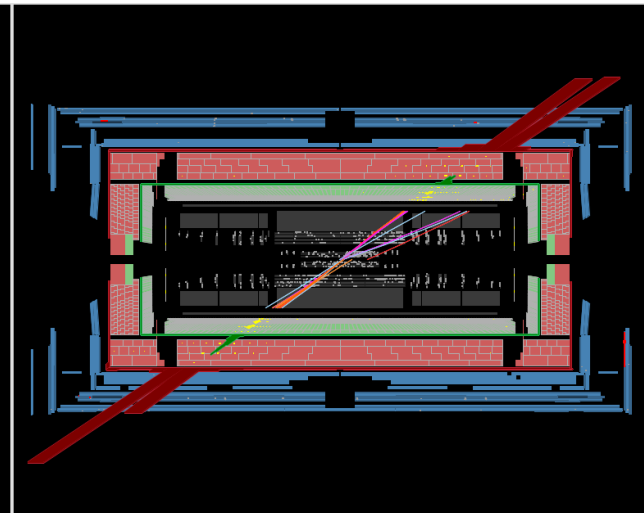
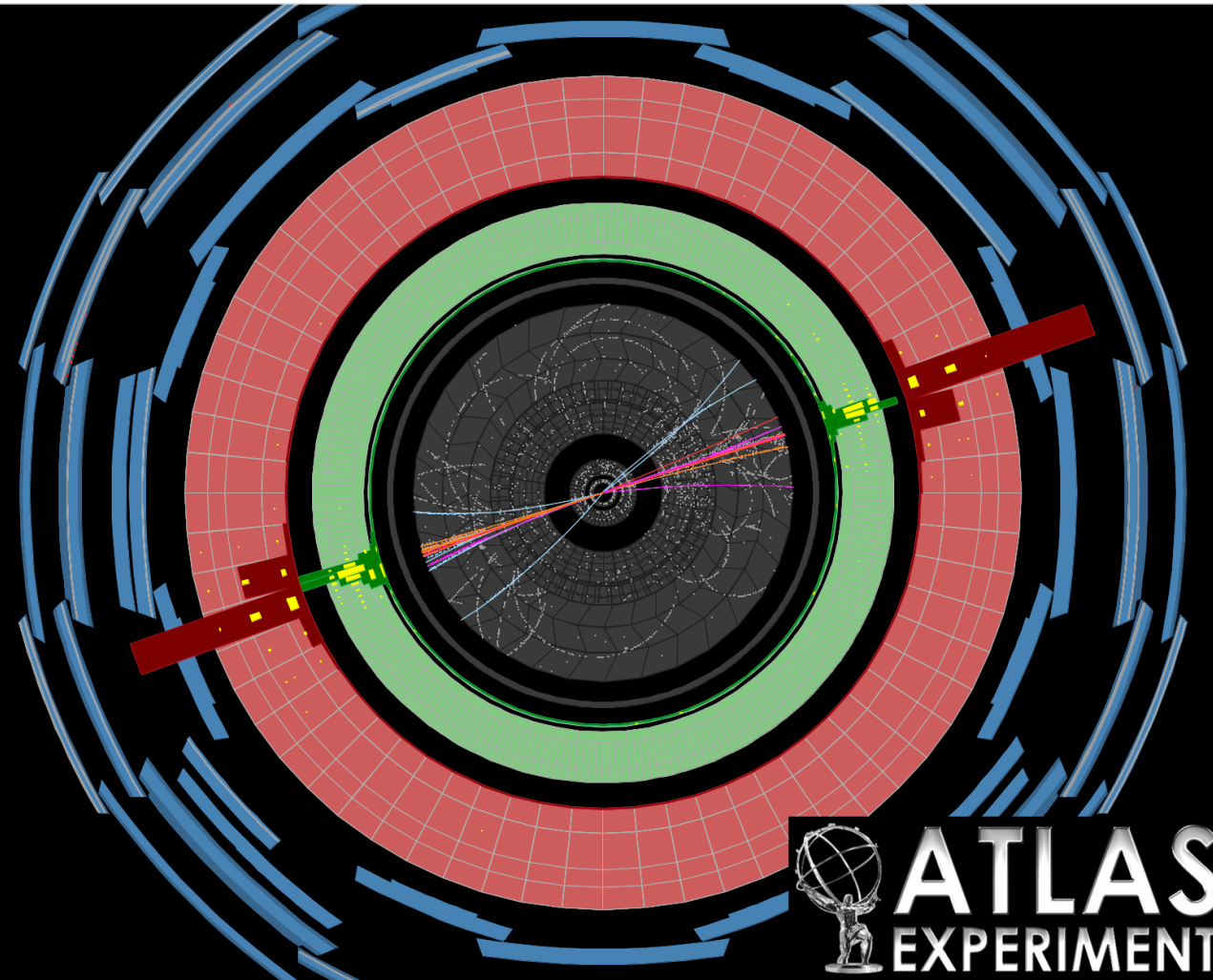




# Vertizes



# Aus Quarks werden Jets: Zwei-Jet-Ereignis



- 1<sup>st</sup> jet (ordered by  $p_T$ ):  $p_T = 890$  GeV,  $y = -0.6$ ,  $\phi = -2.8$
- 2<sup>nd</sup> jet:  $p_T = 760$  GeV,  $y = 0.6$ ,  $\phi = 0.3$
- 3<sup>rd</sup> jet:  $p_T = 30$  GeV,  $y = 1.5$ ,  $\phi = 0.4$



Nächste Vorlesung:

Wie macht man Teilchen sichtbar?

Die Detektoren am LHC

an der St. Anna-Schule

CMS Detektor am CERN  
Einbau der Siliziumspurkammer  
CMS wiegt 12.500 t (~ 1 Eiffelturm)