

## IMMER NOCH UNBEANTWORTETE FRAGEN ...

- Warum haben wir Masse? HIGGS Teilchen?
- Was füllt das Weltall aus? Dunkle Materie, was ist das? Und die dunkle Energie?
- Wieviele Dimensionen hat **die Wirklichkeit?**

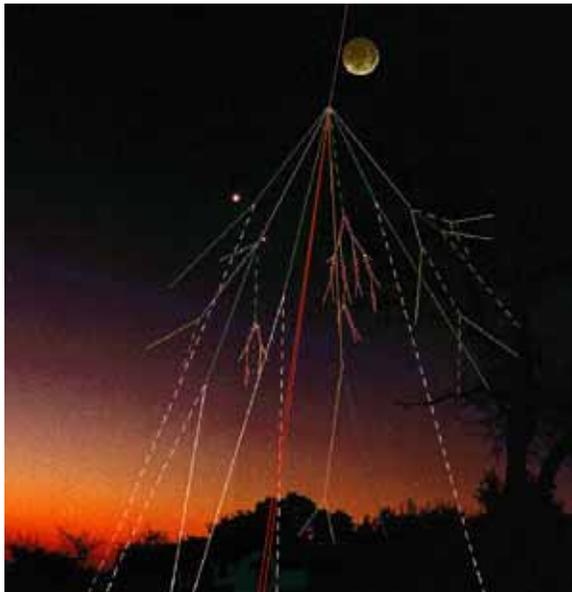
## UND DIE ANTWORT

Teilchenkollisionen bei hohen Energien

Dr. Verena Kain, Engineer in Charge, LHC Operations

- o Teilchenkollisionen sind alltäglich.

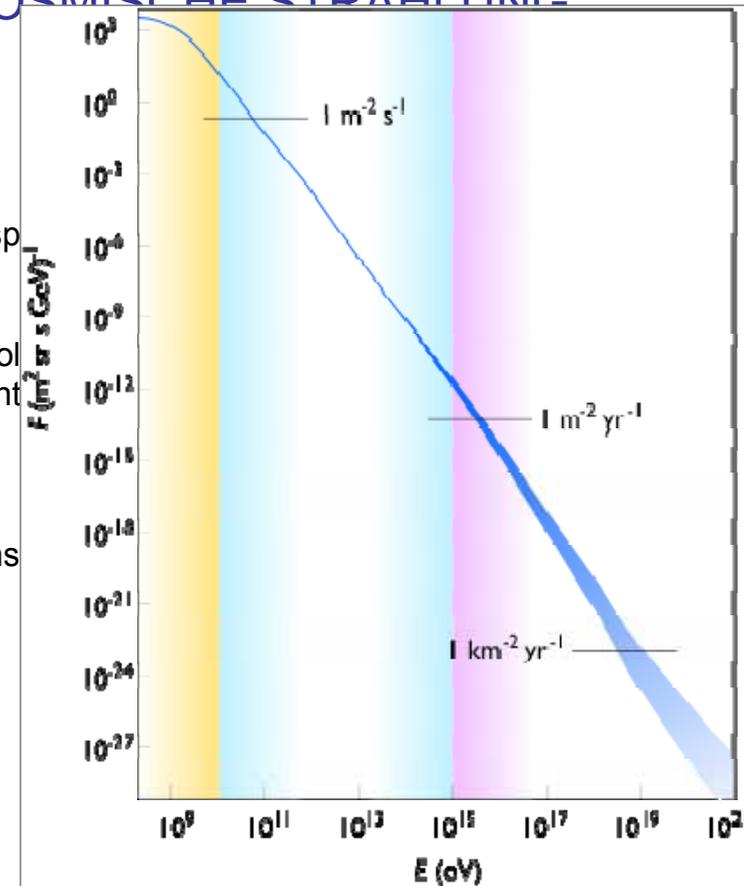
- o Selbst hochenergetische Teilchenkollisionen: **KOSMISCHE STRAHLUNG**



Andauernd wird die Atmosphäre bombardiert.

Warum kann man diese Kollisionen um unsere Fragen zu beantworten?

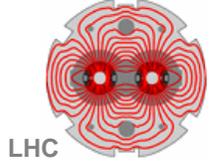
Uns interessieren Kollisionen, die erzeugt werden.



- o Ganze Erde als Detektor?



# Teilchenkollisionen unter wohldefinierten Konditionen

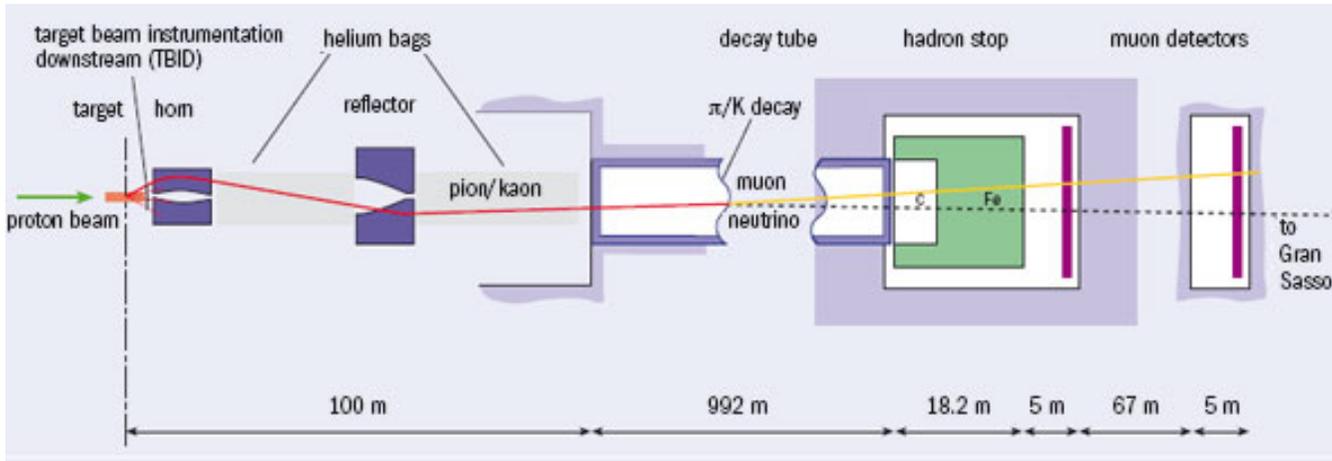


- o Wo?
- o Wann?
- o Wieviel?
- o Welche Ausgangsenergie?

→ TEILCHENBESCHLEUNIGER

- o ...die bessere Variante: TEILCHEN-COLLIDER

- o Fixed Target Experiment
- o 1 Teilchenstrahl



Energie für  
Teilchenproduktion:

$$E \propto \sqrt{E_1}$$

Beispiel: CERN Neutrino to Gran Sasso Anlage

- o Collider

- o 2 Strahlen!!!



Energie für  
Teilchenproduktion:

$$E = E_1 + E_2$$

- o Der Large Hadron Collider (LHC) ist ein **Protonen-Collider\*** mit **wahnsinnigen Parametern**.

\* später auch Ionen

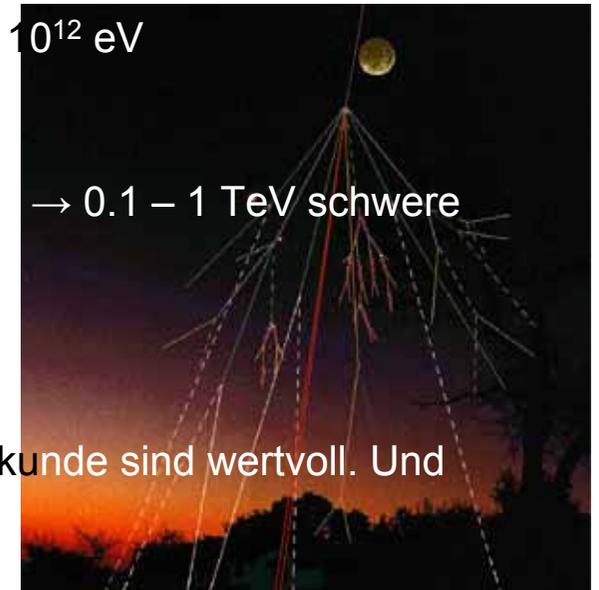
## ENERGIE & Eventrate

- o Einsteins Masse-Energie-Äquivalenz  $E = m \cdot c^2$
- o Wir messen die Masse in Einheiten eV (Elektronvolt)...die Energie die ein Elektron beim Durchlaufen der Spannung von 1 Volt bekommt.

0.000000511 TeV	Electron
0.000938 TeV	Proton
0.08 TeV	W particle
0.1 - 1.0 TeV	Higgs and other new particles

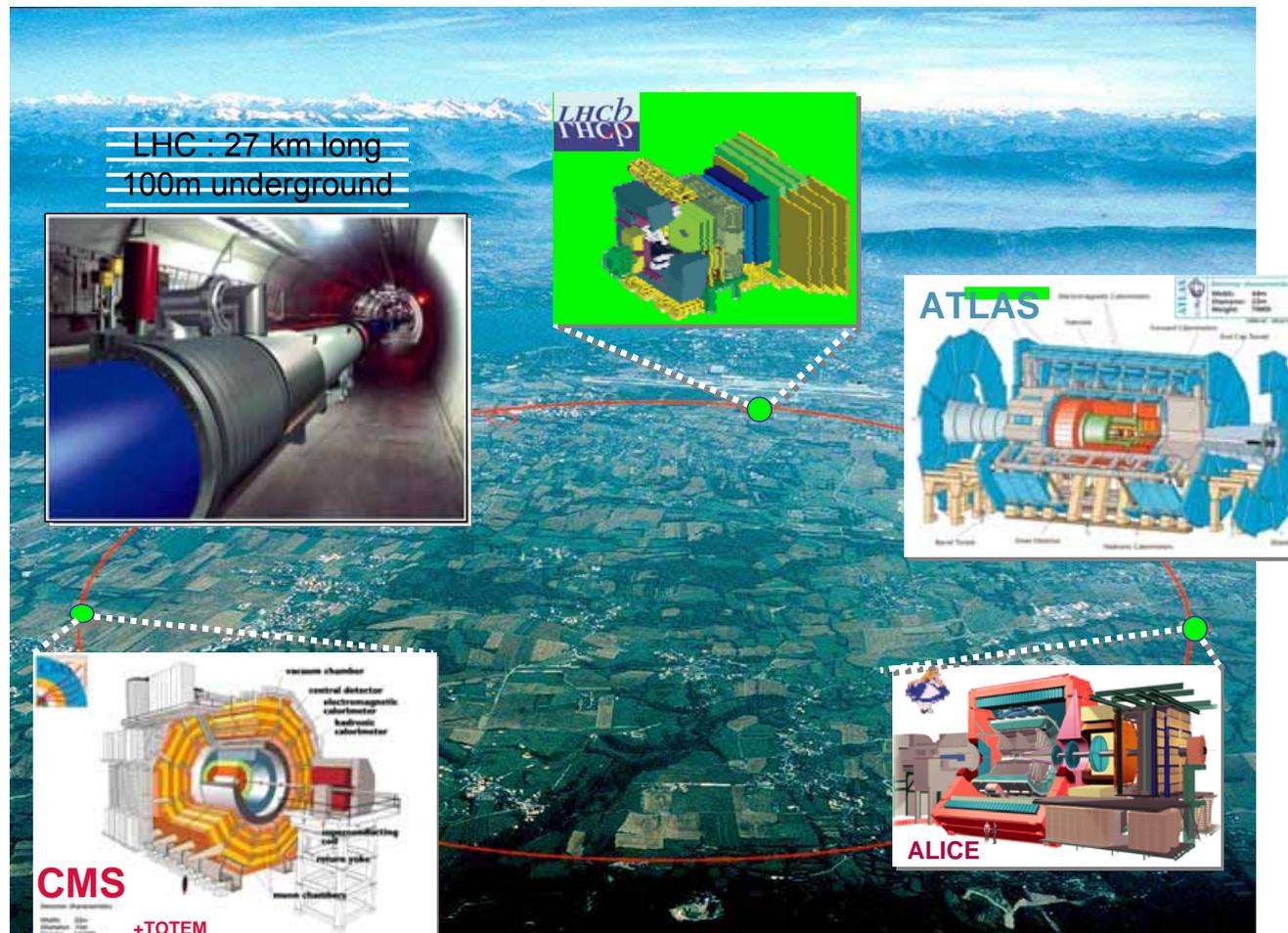
TeV =  $10^{12}$  eV

- o LHC wird die Protonen auf **7 TeV** beschleunigen: 14 TeV pro Kollision neue Teilchen. → 0.1 – 1 TeV schwere
- o Interessante neue Teilchen erzeugt man selten.
- o LHC Eventrate =  **$10^9$  Events pro Sekunde**. Und nur 10 bis 100 pro Sekunde sind wertvoll. Und manche Ereignisse treten sogar nur einmal pro Stunde auf.



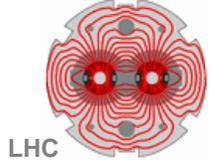
# Wo befindet sich der LHC?

- o Am CERN – das führende Teilchenphysiklabor in Europa, in der Nähe von Genf
- o Ca. 100 m unter der Erde
- o In einem kreisförmigen Tunnel mit einem UMFANG VON 27 km (ehemaliger LEP Tunnel)





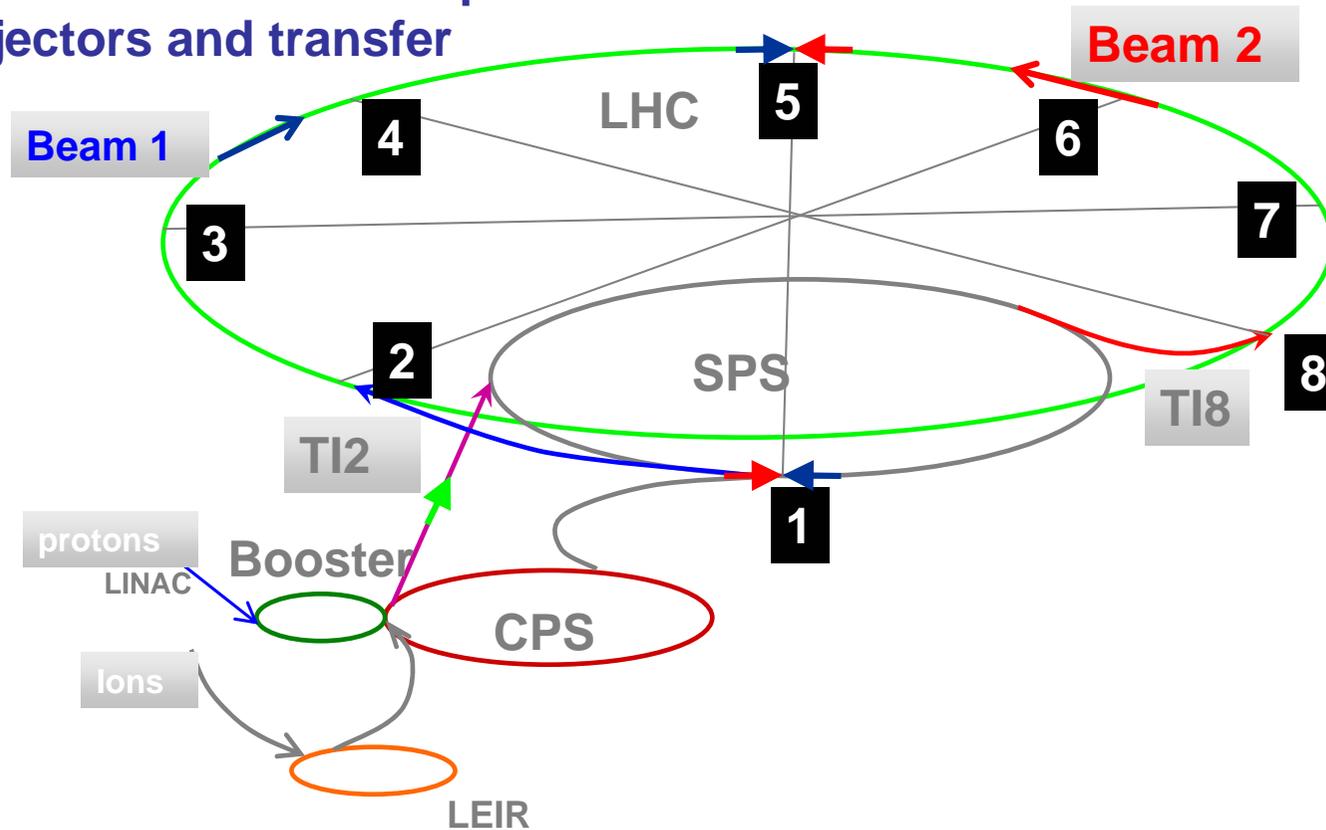
# CERN



- o 20 Mitgliedsstaaten
- o 5 Staaten mit Beobachterstatus
- o ...und viele andere, die an der Forschung am CERN teilnehmen.
- o Beschleuniger – Experimente
  - o LHC
  - o SPS – North area, CNGS
  - o PS – East area
  - o Booster – ISOLDE
  - o AD
- o 2544 CERN staff
- o Users: 8970



## The CERN accelerator complex: injectors and transfer

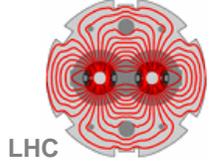


### o Zum Beispiel:

- o SPS: 7 km Umfang,
- o LHC Strahlen (450 GeV),
- o fixed target Strahlen (400 GeV) für CNGS und North Area



# CERN Nachwuchsförderung



## o Viele attraktive Studentenprogramme

- o Sommerstudentenprogramm
- o Technische Studenten
- o Doktorat am CERN

The CERN Summer Student Program

The CERN Summer Student Program offers a unique opportunity to join in the day-to-day work of CERN in Switzerland. Beyond the outstanding scientific and technical work, it offers a multidisciplinary and multicultural lifetime opportunity to make valuable contacts in Europe.

In addition to the work in the experiments, there are also opportunities for them. Several of the theoretical and experimental groups are also part of the program to prepare a short course for between 8 weeks.

Detailed information is available on the website. If you are interested, please contact the relevant group.

Time	Activity
09:15	Accelerator
10:00	Metrol. E
10:15	Detectors
11:00	Experim. Introductory

CERN Technical and Doctoral Students

HOME: Go to Home Page

STARTING AT CERN: Before you Arrive, Your First Day, Your First Week, Your First Month

ACCOMMODATION: Choosing where to live, Things to Consider, Temporary Accommodation

TRANSPORT: Cars and Driving, Cyclists and Pedestrians, Taxis and Buses

WELCOME AND WELCOME: Getting started in a new company can be daunting - especially when its in a foreign country. By building on the experience of past students we aim to make starting as a CERN technical or doctoral student as painless as possible. All you have to worry about is making the most of your time here - however long that might be.

As well as the handy guides to everything from buying a car to getting away for less, check out the student message board. Here you can chat, look for housemates and travelling buddies, share experiences and tips and of course ask any questions you may have.

We are aware that this site will not be perfect. We value your comments and suggestions. If you feel we have missed something or something is incorrect - let us know.

Calendar: October 2008

12:03:57

Site Admin Team

## Technical Students

Overview of job opportunities within CERN.

### Technical Students / Étudiants Techniques DEC-2008

Are you an undergraduate student of a CERN [Member State](#) national training period or a place to do your final project? CERN has a Technical Student Programme. If you have completed at least 18 months of your technical practical training period of **6 to 12 months**, which you wish to spend at CERN, you may apply to the **Technical Student Programme**. Note that students of theoretical and experimental physics are not eligible for this programme.

Vous êtes étudiant(e) de nationalité d'un des [Etats Membres](#) du CERN et souhaitez passer un stage ou un endroit où faire votre projet de fin de thèse? Le CERN pourrait vous intéresser. Si vous suivez des études supérieures pendant au moins 18 mois à temps complet, si le stage demandé a une durée de 6 à 12 mois, et si vous souhaitez passer ce stage au CERN, vous pouvez postuler au **programme des Étudiants Techniques** ! Veuillez lire les informations importantes sur la date limite d'envoi des candidatures qui est le 29 octobre 2008!

**Programme:** Technical Students **Staff Category:** None (non staff programmes) **Posted Date:** 11-AUG-08 **Closing Date:** 29-OCT-08 **Job Reference:** TSC-2008-3/TECH

[Apply / Postulez](#)

## Doctoral Students

Overview of job opportunities within CERN.

### Doctoral Students / Doctorants DEC-2008

If you are or will be enrolled in the doctoral programme of a university in a [Member State](#), and wish to spend 12 to 36 months of your thesis work at CERN, you may apply to the **Doctoral Student Programme**. This programme is open to students in scientific and technical fields, *except theoretical and experimental particle physics*. Candidates may already have a thesis subject defined with their home university OR they may be looking for a thesis subject. In the latter case, CERN proposes [thesis descriptions](#) which may then be discussed between the student, his/her home university and CERN.

Si vous suivez un programme destiné aux étudiants préparant un doctorat dans une université ou établissement équivalent situé dans un [Etat Membre](#) du CERN, et que vous souhaitez passer entre 12 et 36 mois au CERN pendant la durée de vos études, postulez pour le **programme des Etudiants en Doctorat** ! Ce programme est destiné aux étudiants dans les branches scientifiques et techniques, *sauf la physique de particules (expérimentale et théorique)*. Les candidats peuvent soit avoir un sujet de thèse déjà défini avec leur université OU soit rechercher un sujet. Dans le dernier cas, le CERN propose des [descriptions de thèse](#) qui peuvent être ensuite discutés entre l'étudiant, son université et le CERN.

**Please read important information about the deadline for this application which is 29 October 2008!** **Veuillez lire les informations importantes sur la date limite d'envoi des candidatures qui est le 29 octobre 2008!**

**Programme:** Doctoral Students **Staff Category:** None (non staff programmes) **Number of posts:** Multiple **Posted Date:** 11-AUG-08 **Closing Date:** 29-OCT-08 **Job Reference:** TSC-2008-3/DOCT

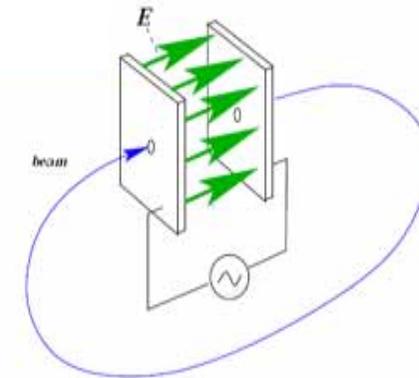
[Apply / Postulez](#)

# Wie funktioniert ein Beschleuniger?

- o Geladene Teilchen werden in **elektrischen Feldern** beschleunigt
- o Für eine Energie von 7 TeV → Spannung von 7 TV durchlaufen
- o Man schafft ca. 10 MV/m (supraleitende Kavitäten): erforderliche Länge für Linearbeschleuniger: 350 km (20 MV/m)

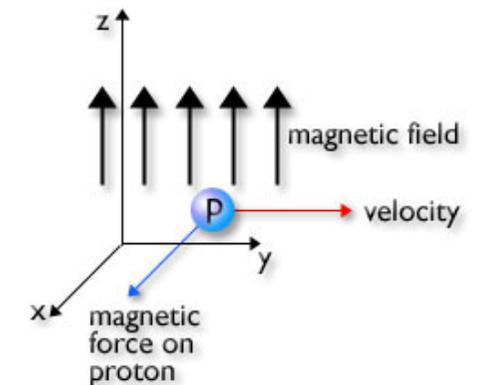
## o Kreisförmige Beschleuniger:

- o oftmaliges Durchlaufen derselben Beschleunigerstrecke.



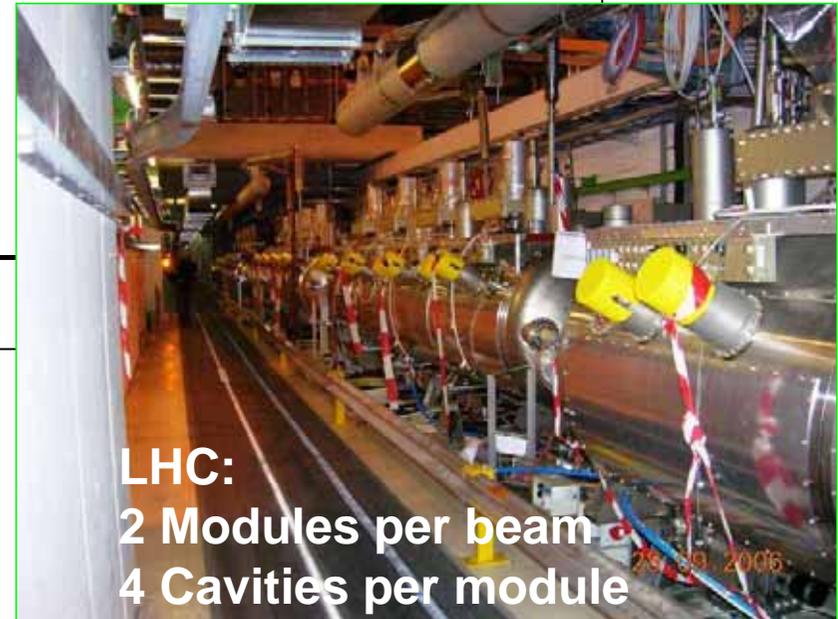
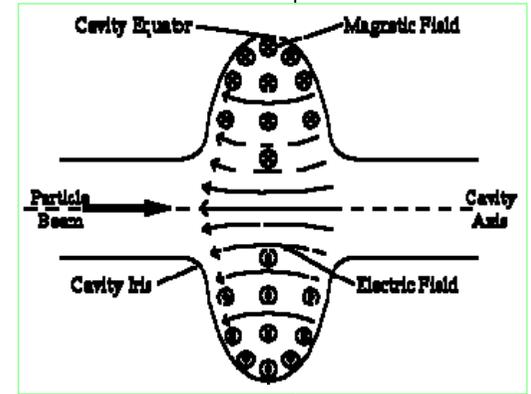
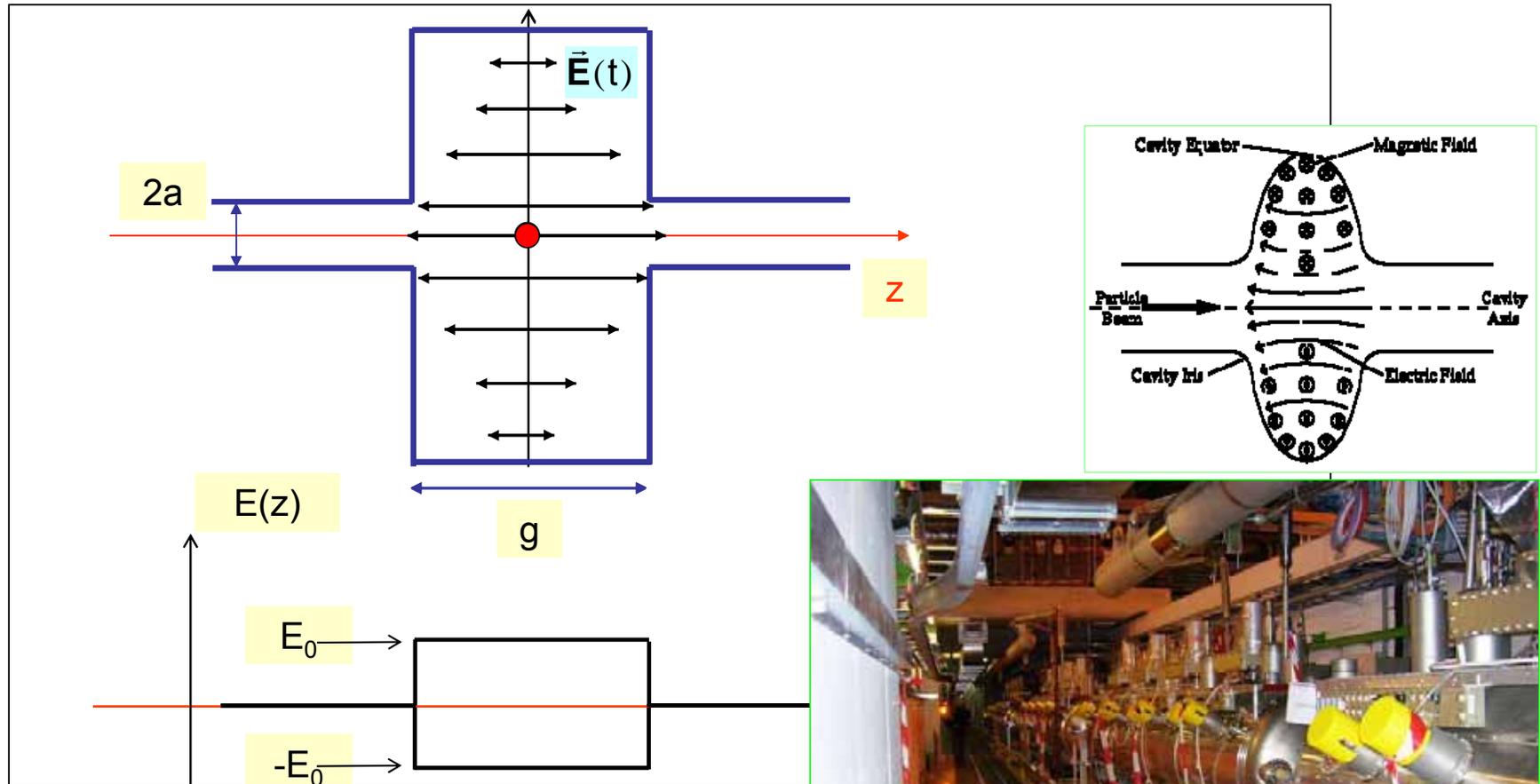
- o Die geladenen Teilchen werden mit **Magnetfeldern** auf der Bahn gehalten, fokussiert und in Kollision gebracht.

- o Teilchenbahnkorrektur: Dipolmagnet
- o Strahlgrößenkorrektur: Quadrupolmagnet
- o ...



- o Je höher die Energie der Teilchen, desto höher das benötigte Magnetfeld → Synchrotron

- o Zylindrische Kavität. 400 MHz wie im LHC – zeitlich veränderliche Spannung
- o Nach 1.25 ns



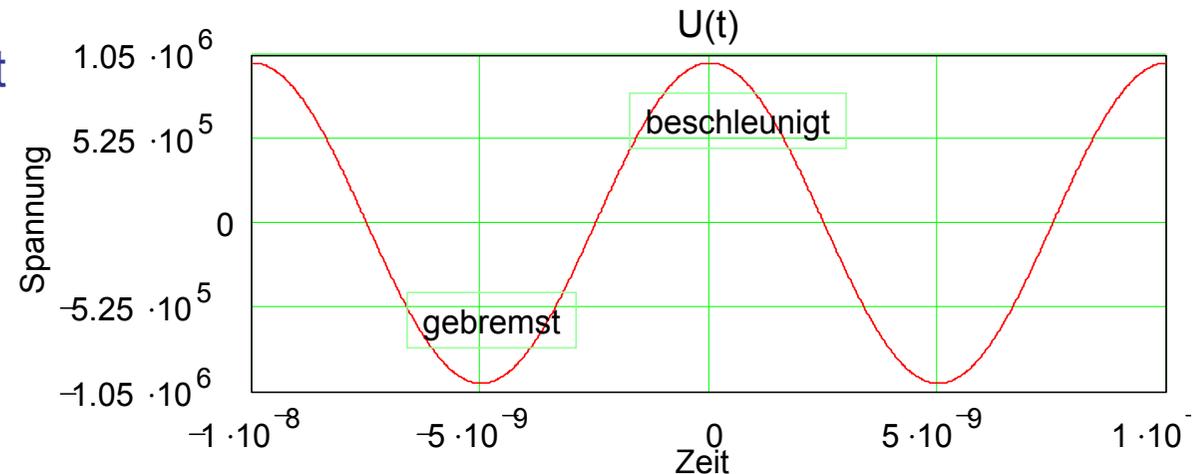
- o Um beschleunigt zu werden, muss die Phase des Feldes richtig sein.
- o In einem HF Feld kann kein kontinuierlicher Strahl beschleunigt werden.
- o **TEILCHENPAKETE**

Zeitlich veränderliche Spannung:

$$U(t) := U_0 \cdot \sin(2 \cdot \pi f_{\text{rf}} \cdot t + dt)$$

Frequenz :  $f_{\text{rf}} = 100 \text{ MHz}$

Maximale Spannung:  $U_0 = 1 \times 10^6 \text{ V}$



- o Teilchenpaket hat endliche Länge. Nicht alle Teilchen werden gleich beschleunigt. Phasenfokussierung.
- o Frequenz des Feldes muss Vielfaches der Umlauffrequenz sein.
  - o LHC Umlauffrequenz:  $\sim 11 \text{ kHz}$ , RF Frequenz:  $\sim 400 \text{ MHz}$

- o **Strahlenkung:**

- o Dipolfelder

- o **Fokussierung:**

- o Warum: Teilchen mit leicht unterschiedlichen Injektionsparametern separieren mit der Zeit.

- o Beispiel:  $10^{-6}$  rad Unterschied im Injektionswinkel

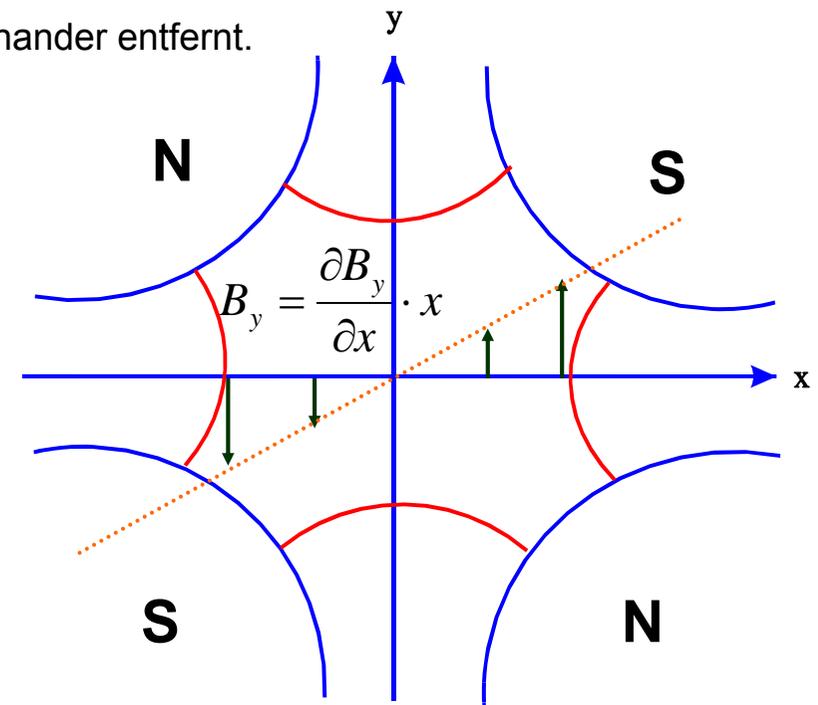
- o Nach  $10^6$  m longitudinal, Teilchen sind 1 m transversal voneinander entfernt.

- o Im LHC (Umfang 27 km): nach 50 Umdrehungen. (5 ms !!!)

- o Fokussierung passiert mit Quadrupolmagneten

- o Kontrolle der Strahlgröße

- o Teilchen würden nach unten fallen: Gravitation



- o **Andere Multipole:**

- o Sextupolmagneten zur Korrektur der Trajektorien von off-momentum Teilchen

- o Octupole, Decapole,...um Strahlinstabilitäten auszugleichen oder Feldfehler zu korrigieren.

o Welches Magnetfeld braucht man, um die Protonen auf einer Kreisbahn zu halten?

o Kreisbahnradius vorgegeben: LEP Tunnel

o Energie 7 TeV

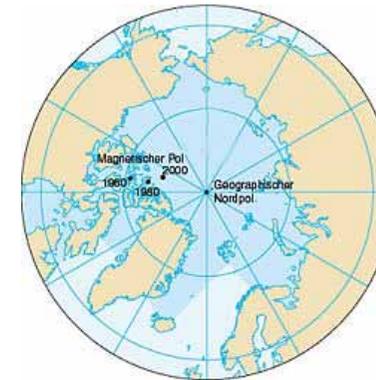
$$\vec{F} = e_0 \vec{v} \times \vec{B}$$

$$\frac{m \cdot v^2}{R} = e_0 v \cdot B$$



$$B = \frac{p}{e_0 \cdot R}$$

o Antwort: **8.33 T**



Erdmagnetfeld:

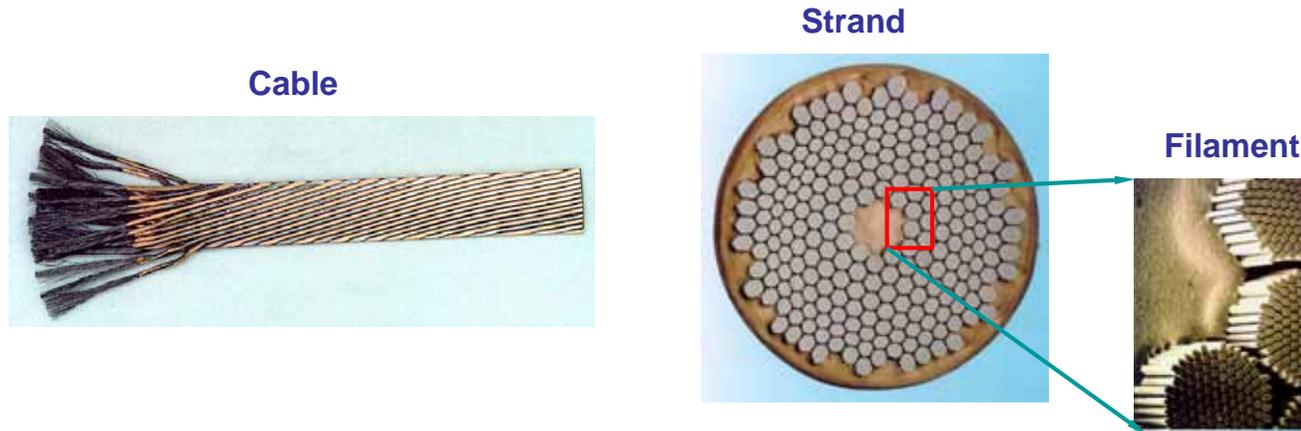
50 uT =  
50/1000 000 T

o Herkömmliche Elektromagnete: Maximum 2 T

o → **supraleitende** Elektromagnete für den LHC



- o Supraleitende Kabel: Supraleiter Niobium-Titan



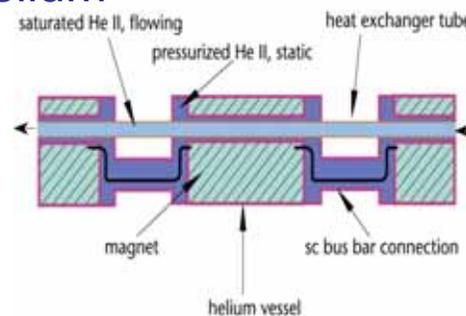
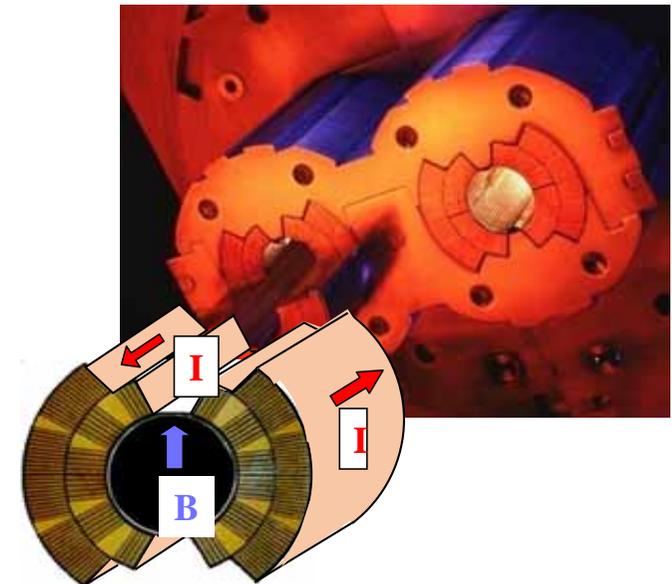
- o Daraus werden die Magnetspulen gewickelt.

- o Die Arbeitstemperatur dieser Leiter:

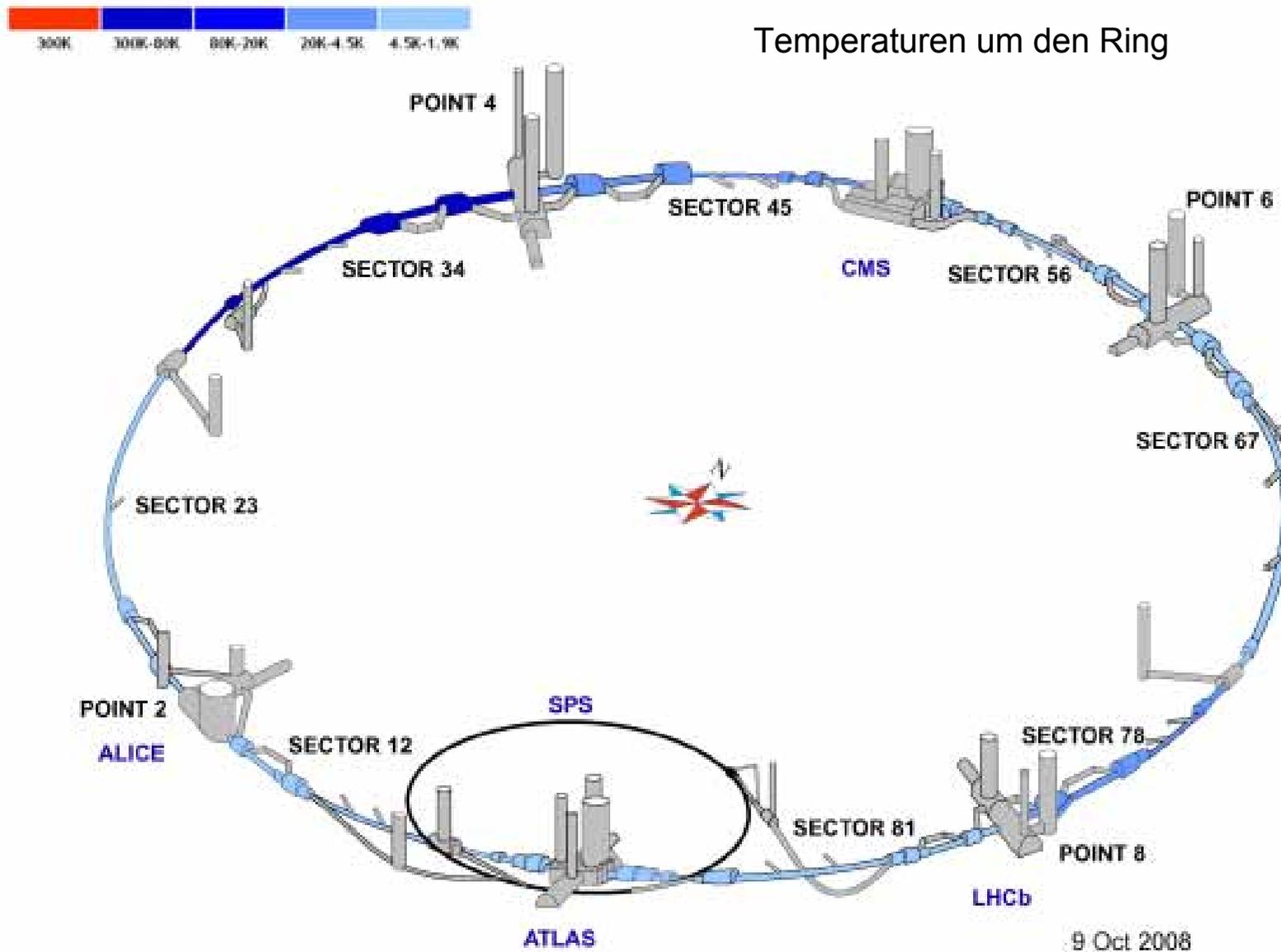
**1.9 K ~ - 271° C**

- o Kühlflüssigkeit: supraflüssiges Helium

- o Magnete sind in He-Bad

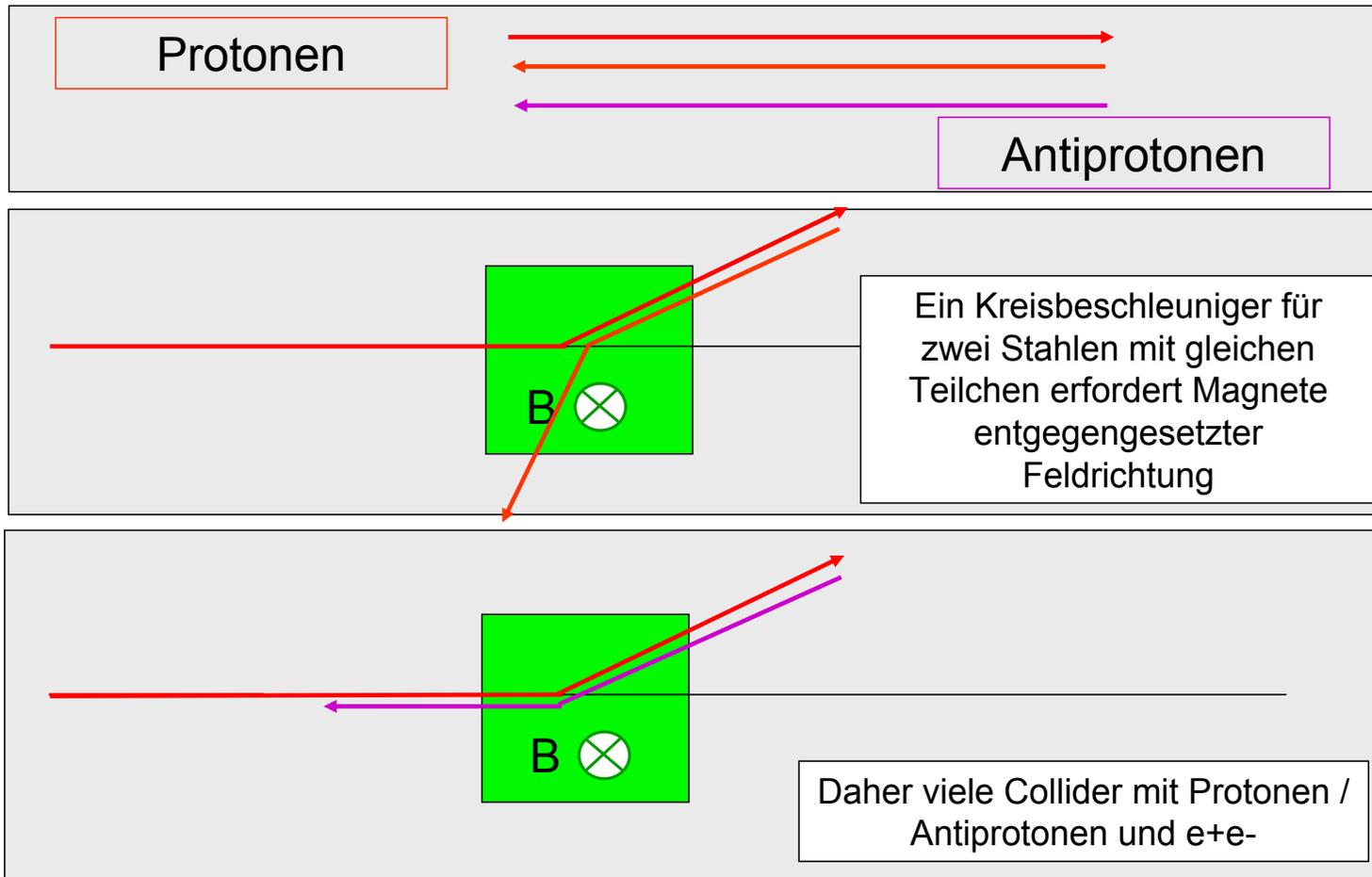


# (Fast) 27 km kälter als das Weltall

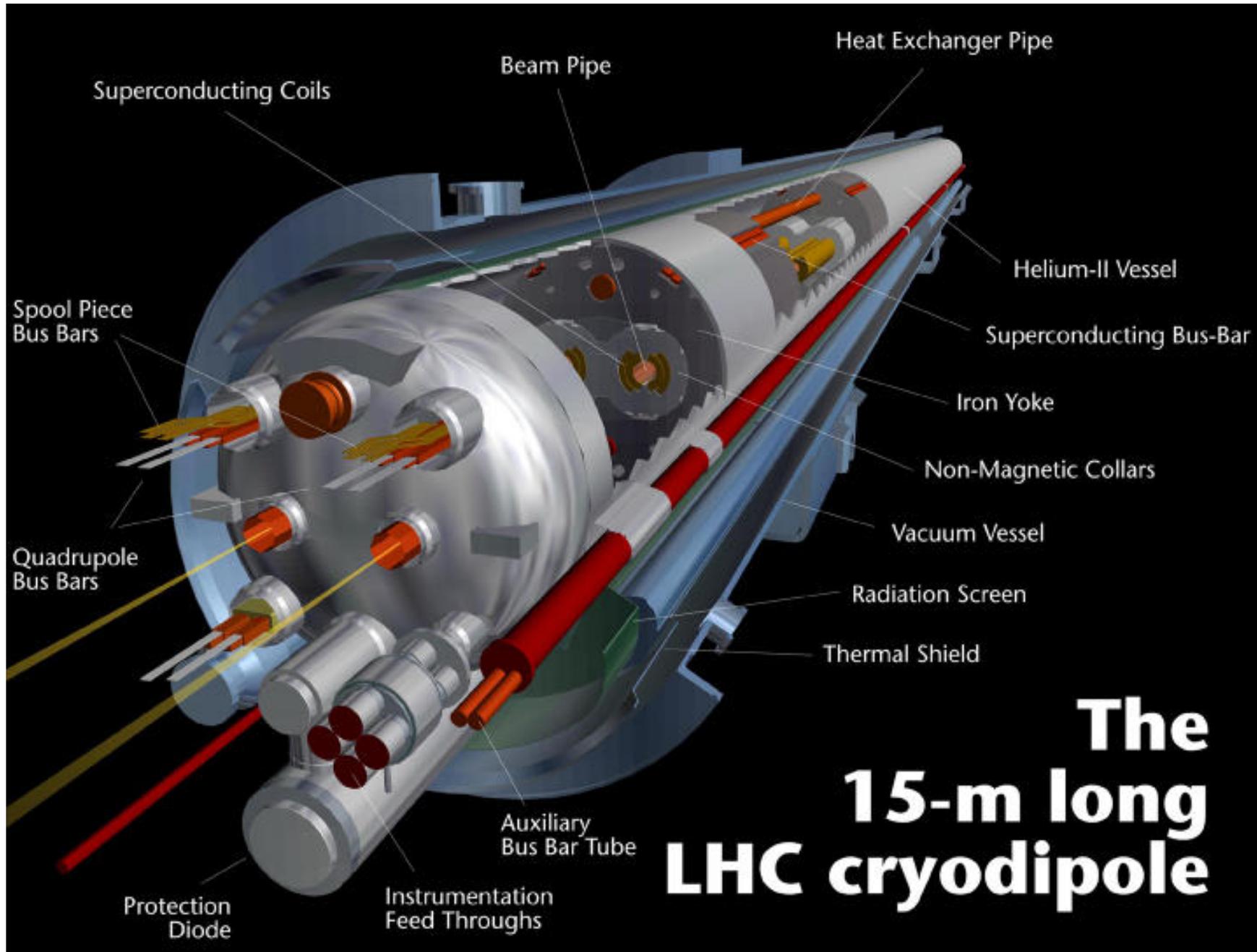


Pro Sektor: 3 Wochen cool-down, 3 Wochen warm-up

- o Unterschiedliche Felder für die beiden Strahlen

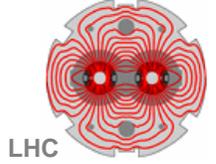


# LHC supraleitender Dipol





# Die LHC Superlative



- o Insgesamt haben wir ~ 8000 Magnete
- o 7600 km supraleitendes Kabel ~ 1200 t
- o 8.3 T entspricht 11 850 A
- o Bei 7 TeV sind **11 GJ Energie** in den Magneten gespeichert.
- o Preis der Maschine (ohne Experimente und Computing): 5 Mrd. CHF
- o Benötigte Leistung 180 MW – Verbrauch ~ 700 GWh/yr (10 % vom Kanton Genf)



- o Der LHC ist riesig und hat 1000e Komponenten
- o Jedes Teil muss in 1000en produziert werden. **Produktion wurde zum Teil in Industrien/Labore aller Welt ausgelagert.**

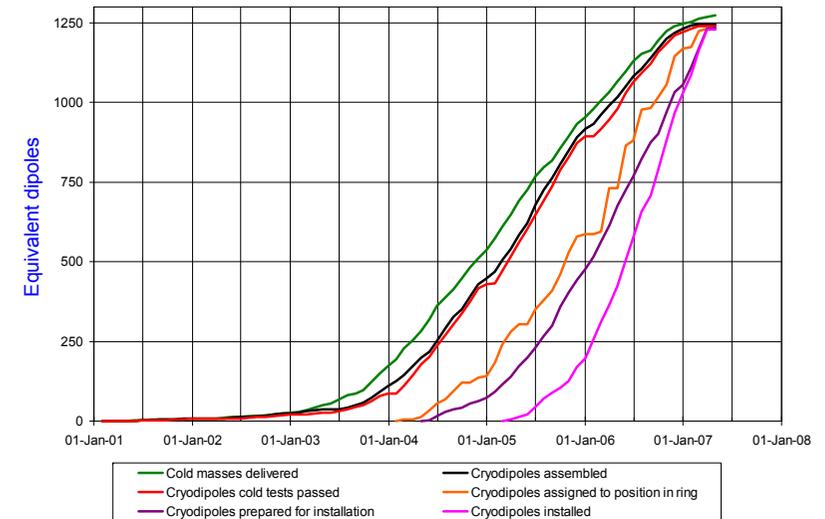
## o Beispiel: LHC Dipolmagnet:

- o Frankreich: Alstom, Jeumont S.A.
- o Deutschland: [Babcock Noell](#)
- o Italien: Ansaldo Superconduttori

## o Beispiel: Tripletquadrupolmagnete

- o Japan und USA

- o Ähnlich: Strahldiagnostik, Power supplies, Cryo-anlage, Kollimatoren, Transferequipment, ...



# Erster Cryodipol wurde am 7. März 2005 in den Tunnel hinabgelassen



LHC Hauptdipol: 35 t, 15 m lang.  
Insgesamt **1232** in der Maschine

# Magnettransport im Tunnel

Bis zu 15 km wurden  
Magnete damit transportiert

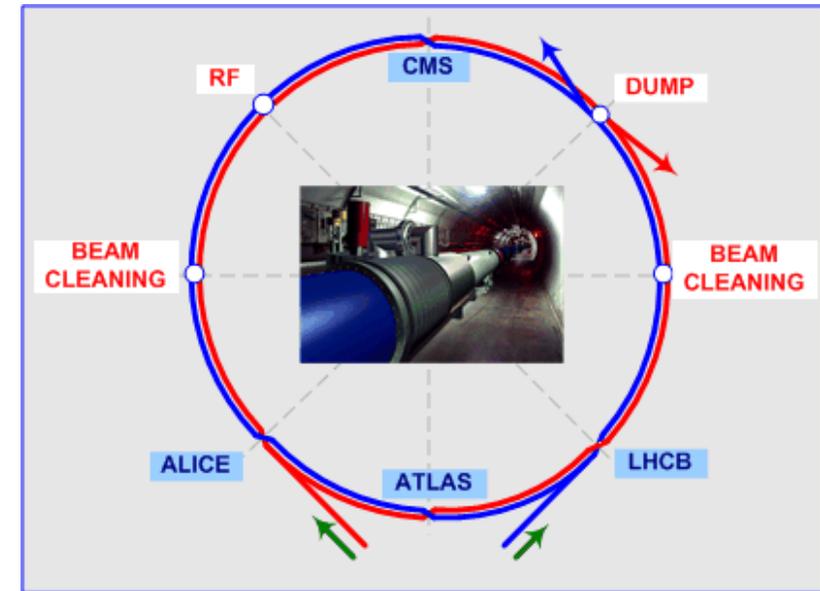
Mit 3 km/h.



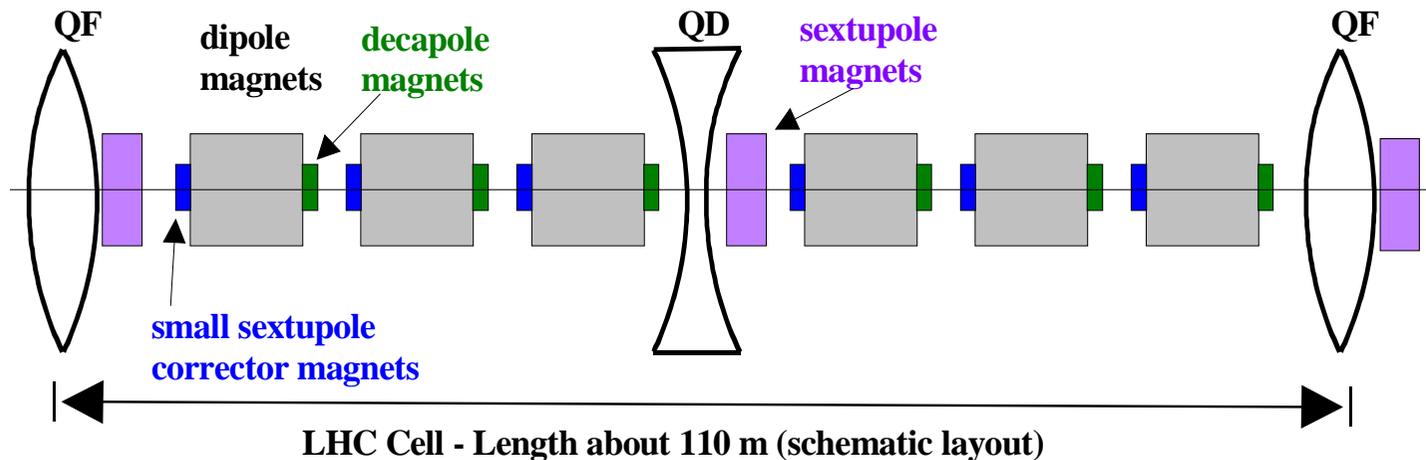
# LHC Dipol installiert im Tunnel



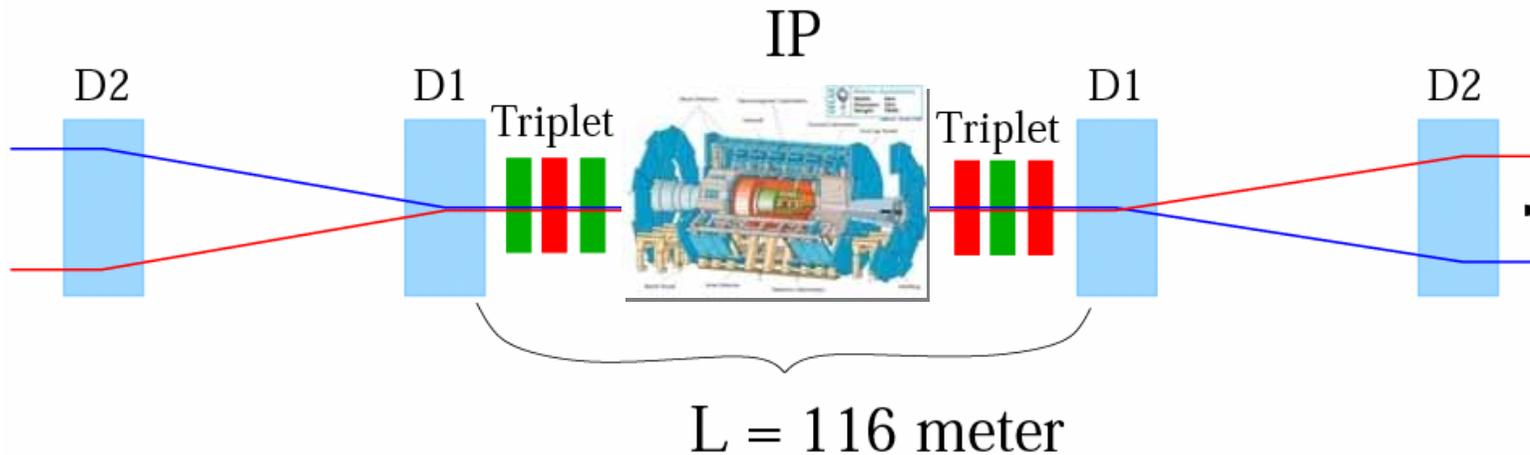
- o Der LHC ist in **8 Sektoren** eingeteilt.
  - o Ein Sektor befindet sich zwischen 2 LHC Punkten.
  - o An den LHC Punkten hat man **GERADE STRECKEN**
  - o Jeder Sektor kann unabhängig gepowert und gekühlt werden.
- Zwischen den geraden Strecken befinden sich die LHC Bögen.



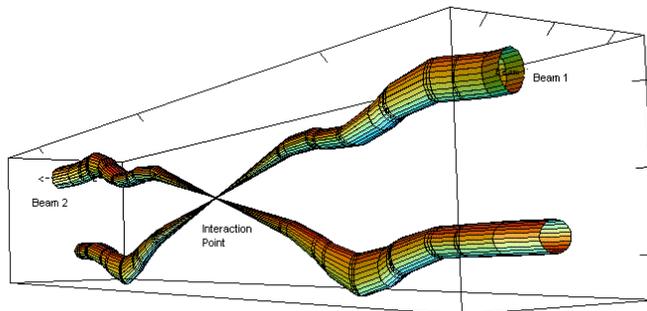
- o ca. 3 km lang
- o Die Bögen haben eine FODO-Struktur → netto Fokussierung



- o Punkt 1, 2, 5 und 8 haben “gerade Strecken” dieser Art:



- o Die beiden Strahlen werden in EINE Vakuumkammer geführt mit Rekombinationsdipolen, D1 und D2.
- o Der Strahl wird fokussiert in den Interaktionspunkt (IP) mit den Tripletquadrupolen.



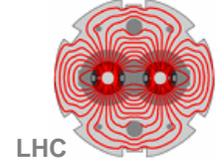
Relative beam sizes around IP1 (Atlas) in collision

Kreuzungswinkel mit Hilfe von Orbitkorrektormagneten.

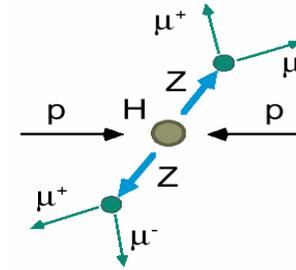
Während der Injektion und Rampe sind die Strahlen auf Separationsbeulen → keine Kollision.



# Die LHC Superlative: **Strahl**



- o LHC Eventrate =  **$10^9$  Events pro Sekunde.**
- o Eventrate = Wirkungsquerschnitt der Protonen (E)  $\times$  **Luminosität**
- o Luminosität hängt ab von **Anzahl der Teilchenpakete** und **Anzahl der Teilchen pro Teilchenpaket** ab
  - o Außerdem Größe der Strahlen am Interaktionspunkt und Kreuzungswinkel
- o Für die nominelle LHC Eventrate braucht man
  - o **2808** Teilchenpakete mit je  **$1.15 \times 10^{11}$**  Protonen
  - o Protonen bewegen sich quasi mit Lichtgeschwindigkeit
- o Bei 7 TeV entspricht das **360 MJ gespeichert im Strahl**

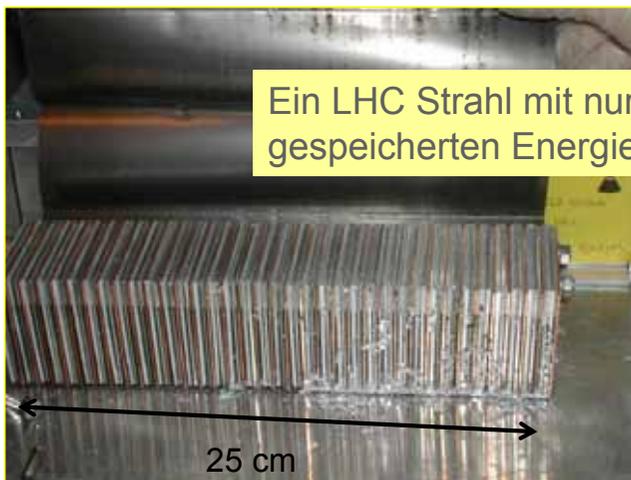


# 360 MJ entsprechen



Britischer Flugzeugträger mit 12 Knoten

- o ...oder einem Auto (3200 kg) mit 1700 km/h

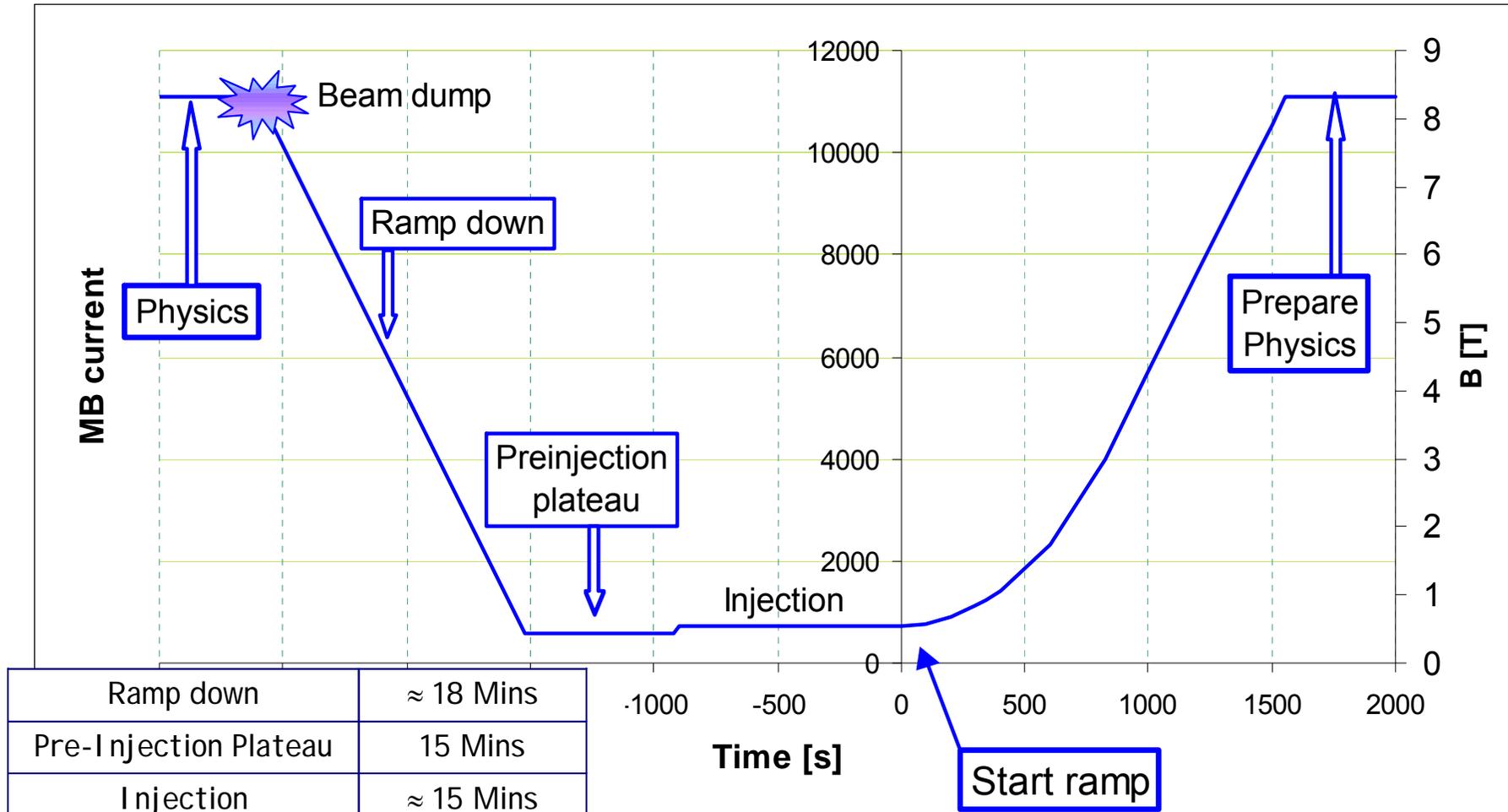


Ein LHC Strahl mit nur einem 1/400 der gespeicherten Energie bohrt Löcher in Metall



Experiment in der Injektionslinie des LHC

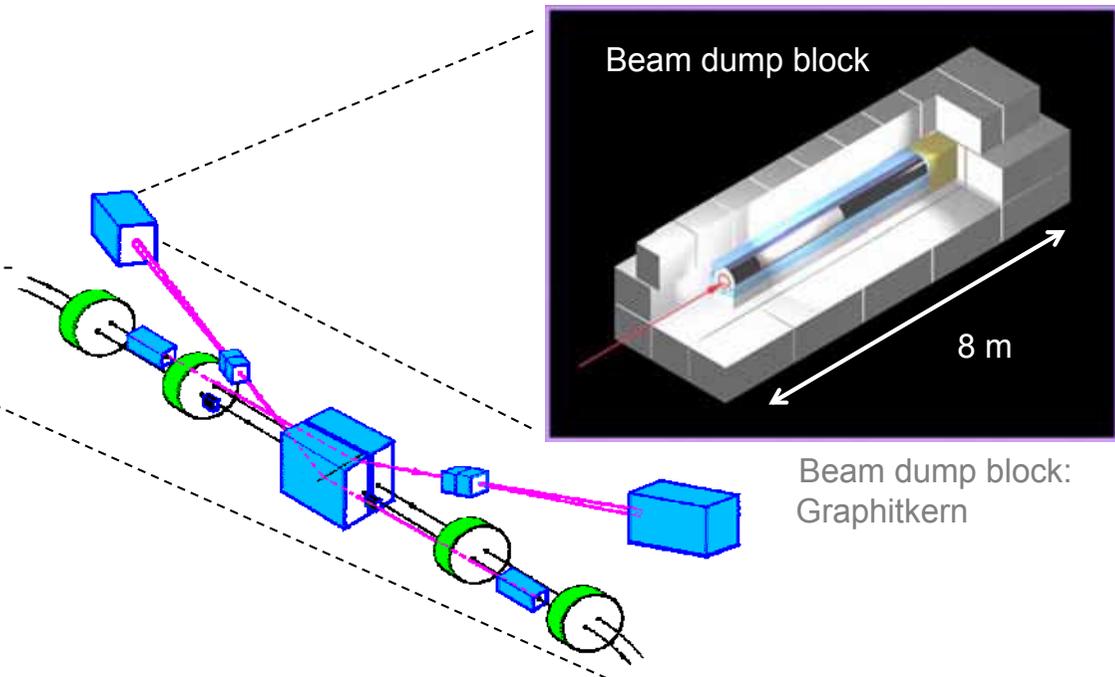
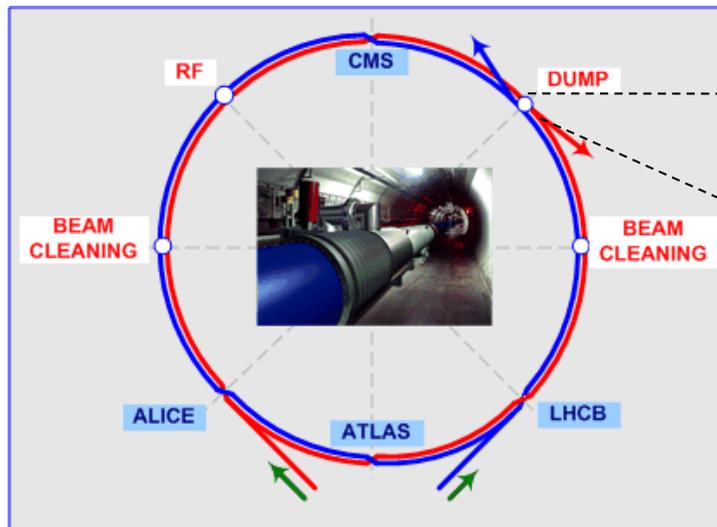
- o 12 Injektionen vom SPS, um den LHC zu füllen



Im Vergleich dazu: SPS LHC Strahl:  
Injektion + Beschleunigung + Extraktion = 20 s

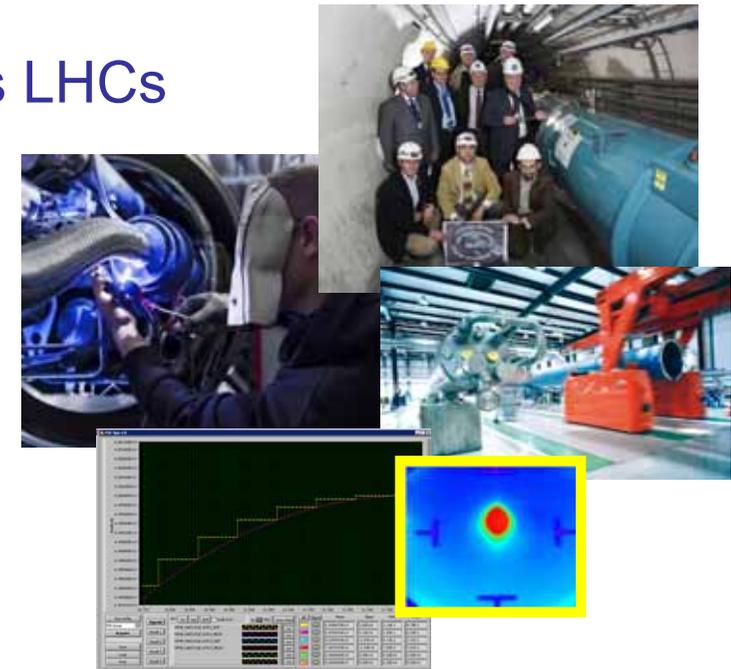
# Was passiert am Ende des Zyklus mit dem LHC Strahl?

- o Nach 10 Stunden Datennehmen ist die Luminosität nur mehr 1/3 ihres Anfangswertes.
- o Dann aber noch immer zwischen 200 MJ – 300 MJ im Strahl.
- o Nur ein Element kann den Impact des LHC Strahles überleben: der **LHC BEAM DUMP**
- o Der Strahl wird dorthin extrahiert.



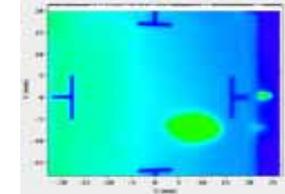
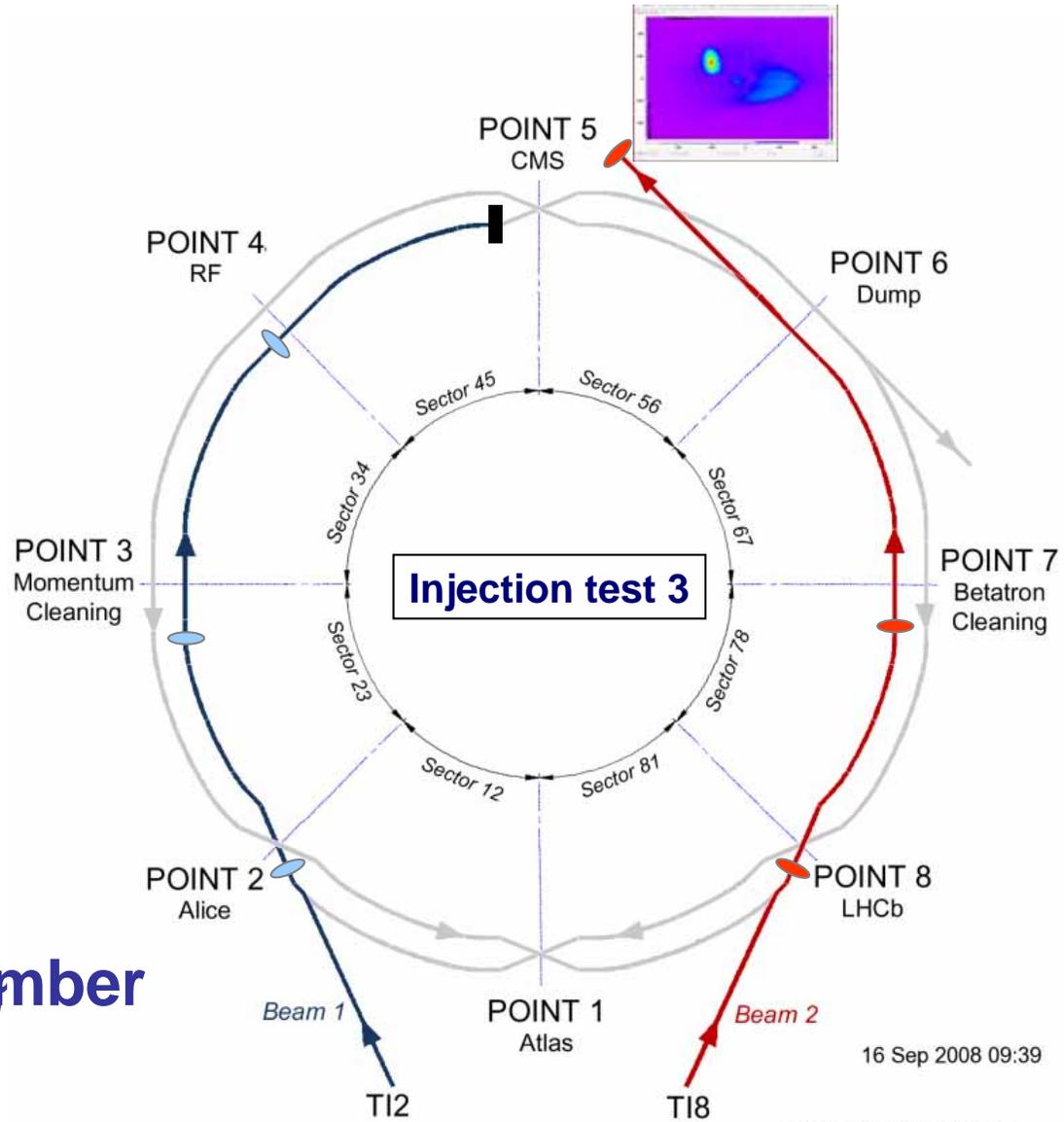
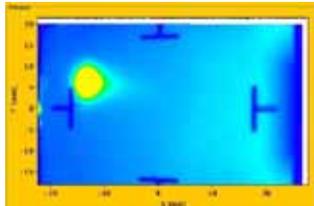
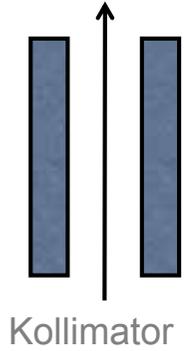


- o 1982 : Erste Studien zu LHC Projekt
- o 1989 : Start der LEP Operation (Z-factory)
- o 1994 : Genehmigung des LHCs durch den CERN Council
- o 1996 : Endgültige Entscheidung für Bau des LHCs
- o 1996 : LEP Operation bei 100 GeV (W-factory)
- o 2000 : Ende der LEP Operation
- o 2002 : LEP aus dem Tunnel entfernt
- o 2003 : Start der LHC Installation
- o 2005 : Start des Hardware Commissionings
- o 2008 : Erste Inbetriebnahme mit Strahl
- o **10.09.2008: LHC START-UP**



# Üben für den 10. September

- o Sommer 2008 – LHC Injektionstests – kleine Intensität:  $2 \times 10^9$  Protonen



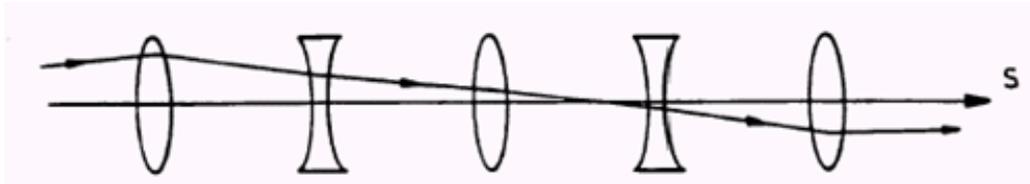
52-710 September  
22-712 September

16 Sep 2008 09:39

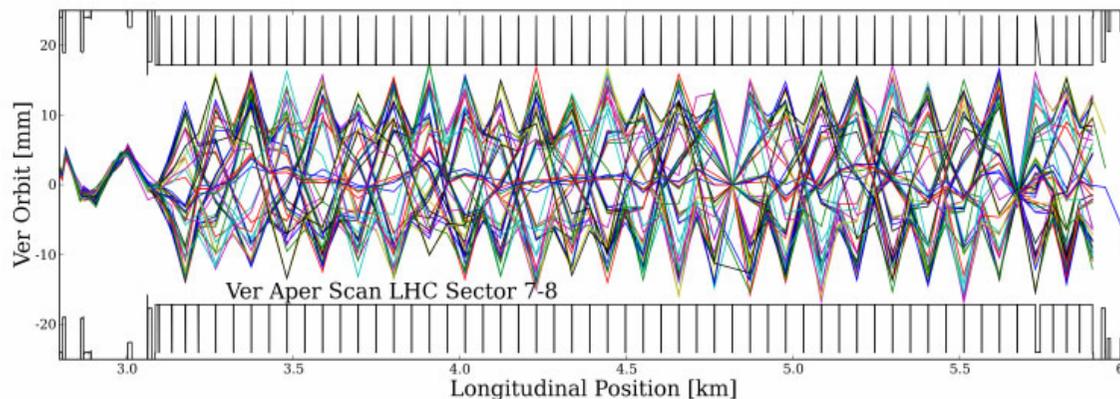
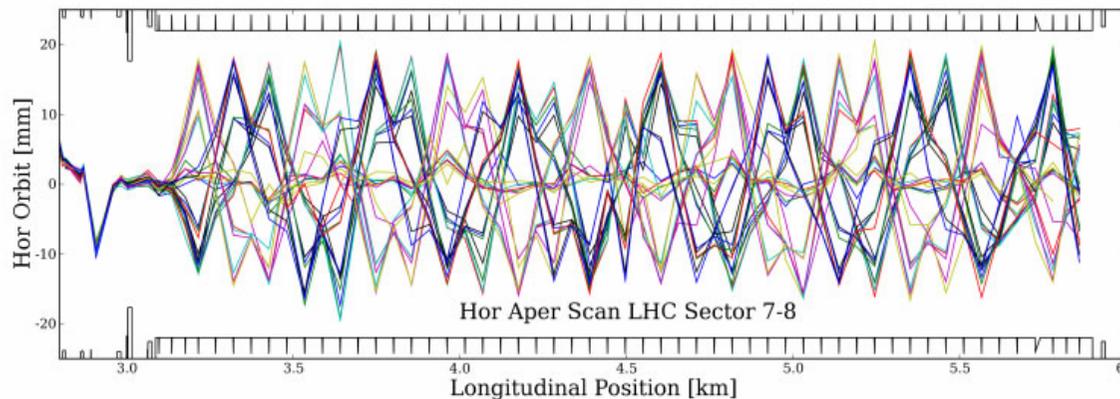
Updated by Roger Bailey

# Beispiel für Messung: Aperturscan – Oszillationen im Bogen

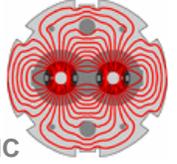
- o FODO-Zellen: Trajektorie durch eine FODO-Struktur



- o Messung der Apertur: maximale Oszillation, die in Vakuumkammer passt.



Messung vom 23. August



IOP A community website from IOP Publishing

physicsworld.com

Rusnanotech '08

opus | Jobs | Immobilien | Geld | Gesundheit | Literatur | Musik | Reisen | ...

HEIMTSEITE » WISSEN » WISSENSCHAFT

DRUCKEN guardian.co.uk

PHYSIK

News | Sport | Comment | Culture | Business | Money

Proton Comment is free

VON SVEN SCHLAGW

### Is the end nigh?

Wednesday next, scientists will spark up the Large Hadron Collider (LHC) and start an experiment that will smash together particles near the speed of light, recreating in miniature the energy in the Big Bang. How the organisation Cern has become a public concern that particles like Higgs boson could be a cataclysmic cosmic ray that unwittingly destroy the millenarian twaddle -

guardian.co.uk, Friday

Jubel in CERN  
aus Aton  
Show abe



Am Anfang  
langen T  
© FABRIK

Es ist 10  
Elektron  
Journali  
der Larc  
Kernfors  
werfen  
entschei  
Bildschir  
Physiker  
Kontroll:



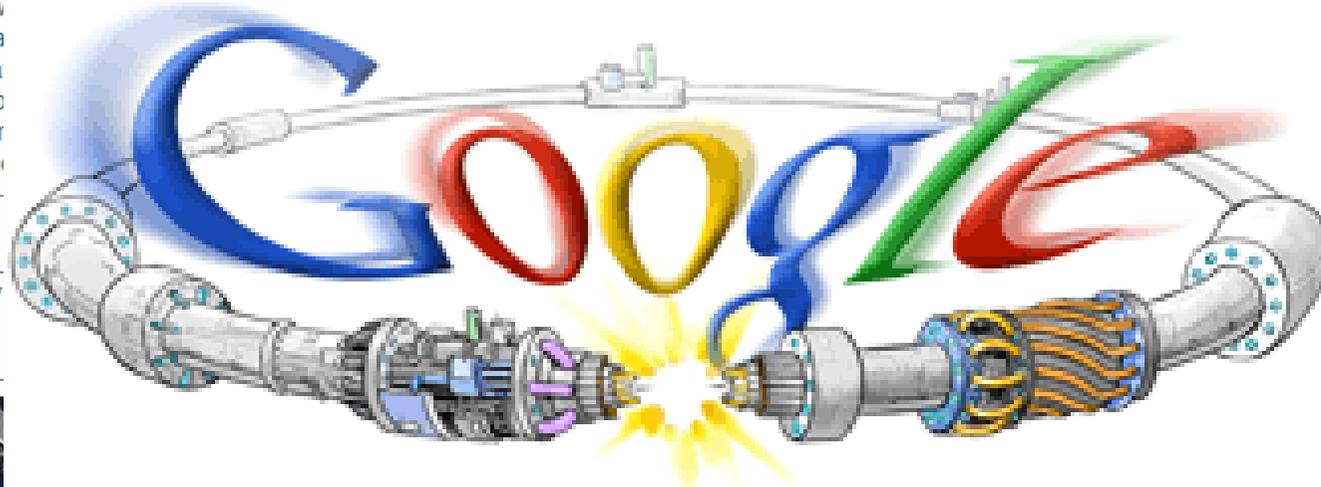
Visitors stand in front of the ATLAS detector during the LHC (Large Hadron Collider) Open Day at the European Particle Physics laboratory (CERN) in Geneva, Switzerland. Photograph: Salvatore Di Nolf/AP

## Protons and Champagne Mix as New Particle Collider Is Revved Up

By DENNIS OVERBYE  
Published: September 10, 2008

BATAVIA, Ill. — Science rode a beam of subatomic particles and a river of Champagne into the future on Wednesday.

Enlarge This Image After 14 years of labor, scientists at the



the project director of the collider since its inception in 1994. "We can now look forward to a new era of understanding about the origins and evolution of the universe."

Cameras for Capturing  
Primordial Fire



Interactive Graphic

Poll: Are the law lords  
right to rule that the  
Chagos islanders cannot  
return?

Poll: Does the  
abominable snowman  
exist?

Poll: Are there too many

COMMENTS  
(139)

SIGN IN TO E-MAIL  
OR SAVE THIS

PRINT

Geübt wird mit einem  
einzigsten Protonenpaket -

rtet die Urknall-

ist die größte  
geschaffen wurde.  
sie kurz nach dem

irgigen Mittwoch  
ie größte Maschine  
alt in Betrieb. Unter  
artet damit das  
ischste Experiment,  
issenschaftler je  
affen haben: Am 10.

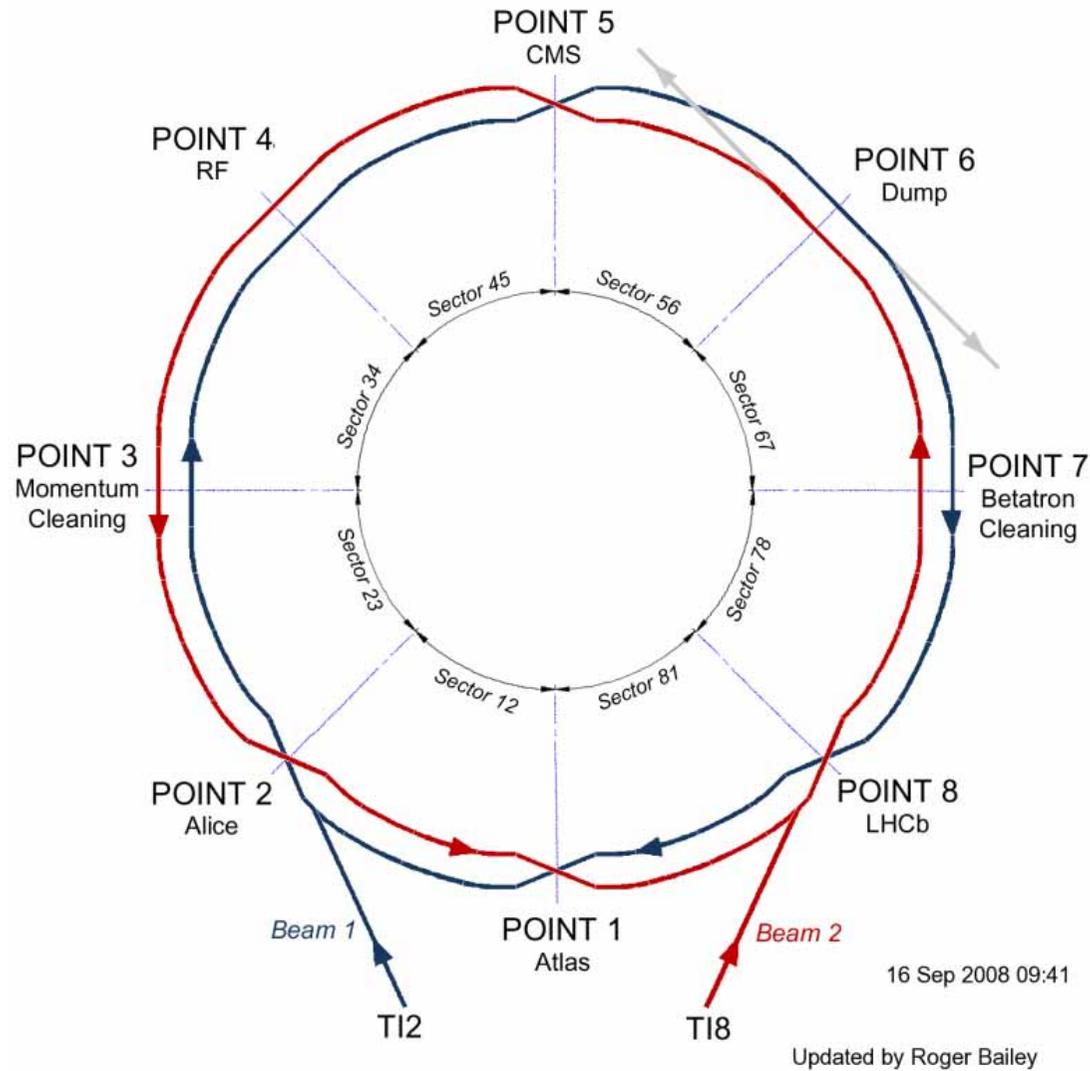
enf der  
adron Collider)  
ahren Planung und  
rung gegenüber den

d bis zu 150 Meter  
werden  
chtgeschwindigkeit  
reicher Wucht zur

Kollision gebracht. Dabei entstehen Energien, wie sie Sekundenbruchteile nach dem Urknall geherrscht haben. Die Wissenschaftler - darunter auch zahlreiche Österreicher - erhoffen sich davon neue fundamentale Einblicke, wie die Materie und damit unsere Welt aufgebaut ist.

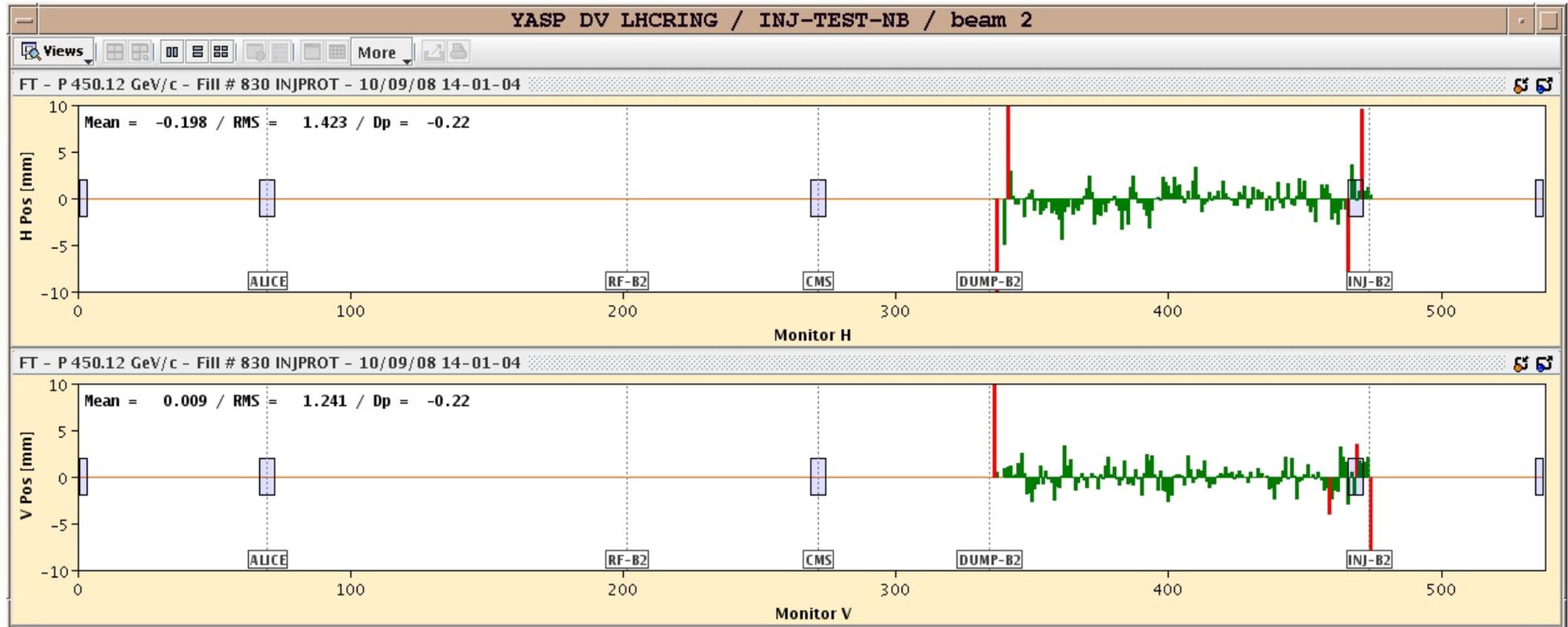
# Ziel: 1 x um den Ring

- o Kleine Intensität: 1/100 000 der nominellen Intensität



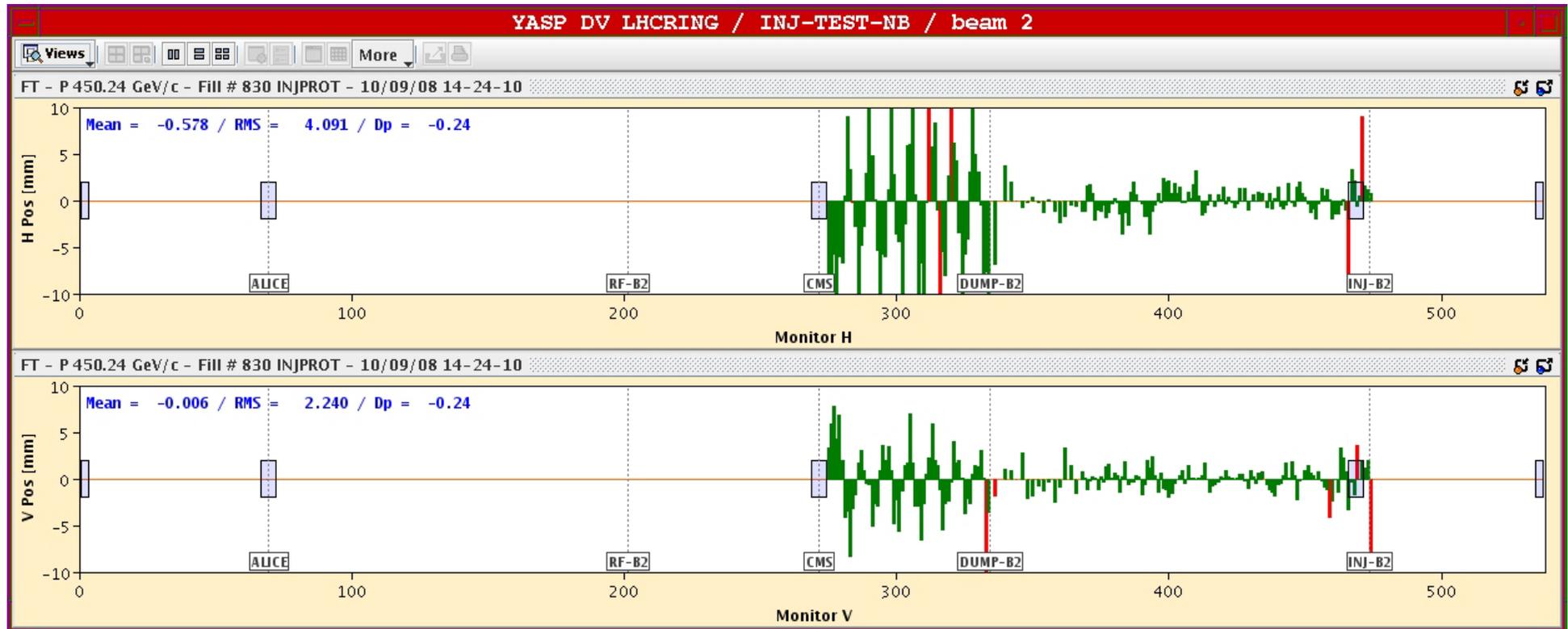
# Fädeln um den Ring – Strahl 2

- o ~ 50 Minuten Strahl 1
- o ~ 60 Minuten Strahl 2



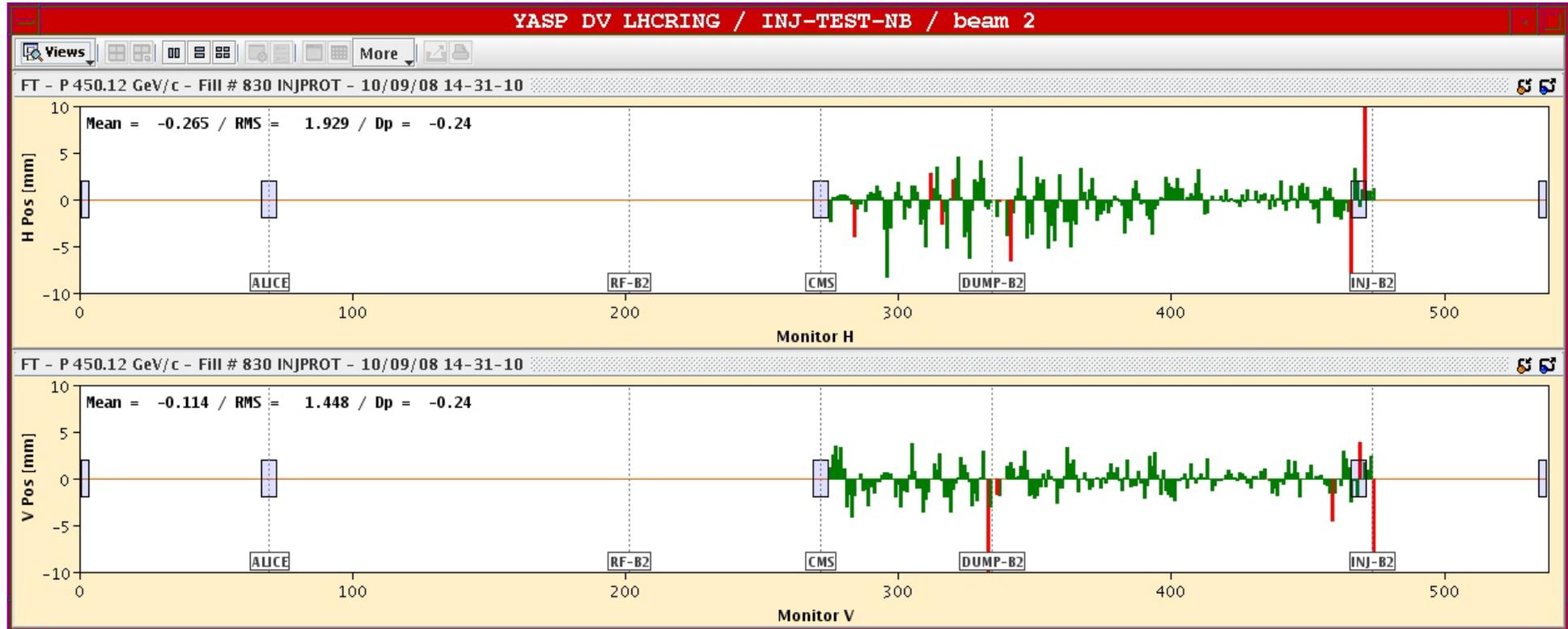
# Fädeln um den Ring – Strahl 2

- o ~ 50 Minuten Strahl 1
- o ~ 60 Minuten Strahl 2



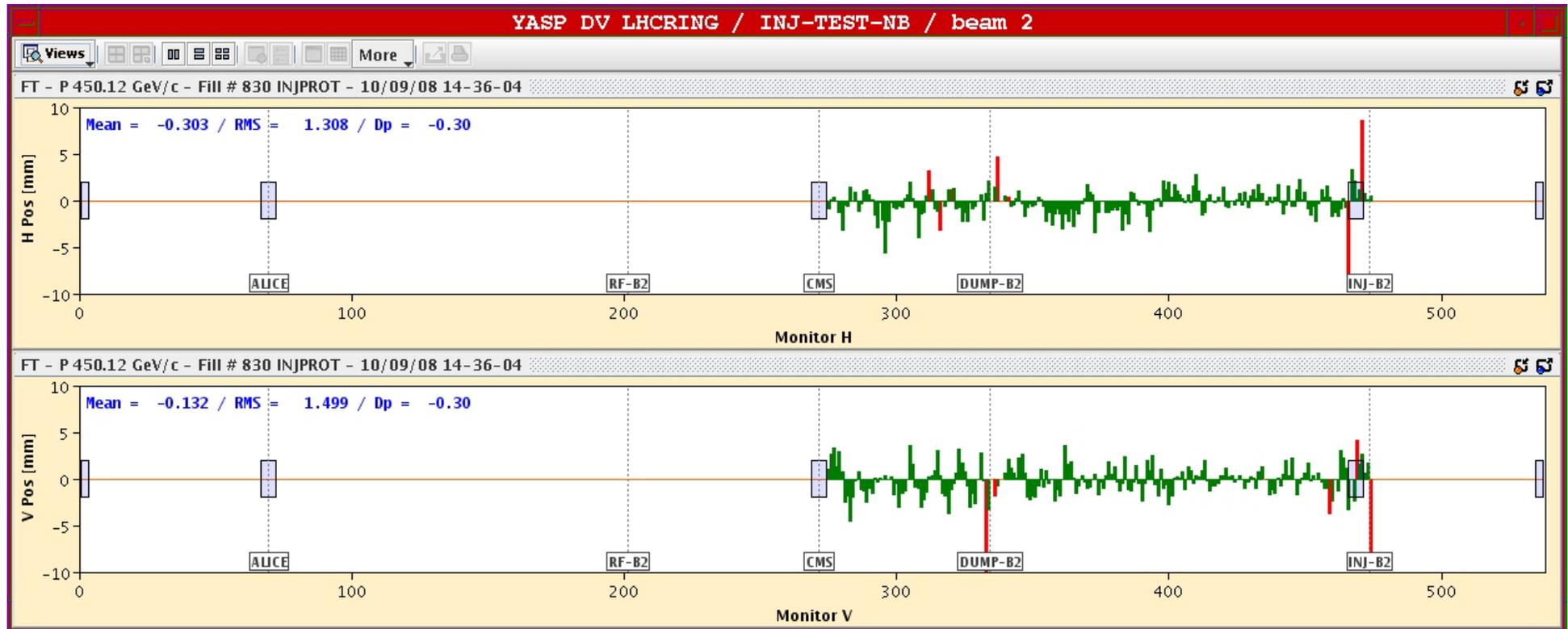
# Fädeln um den Ring – Strahl 2

- o ~ 50 Minuten Strahl 1
- o ~ 60 Minuten Strahl 2



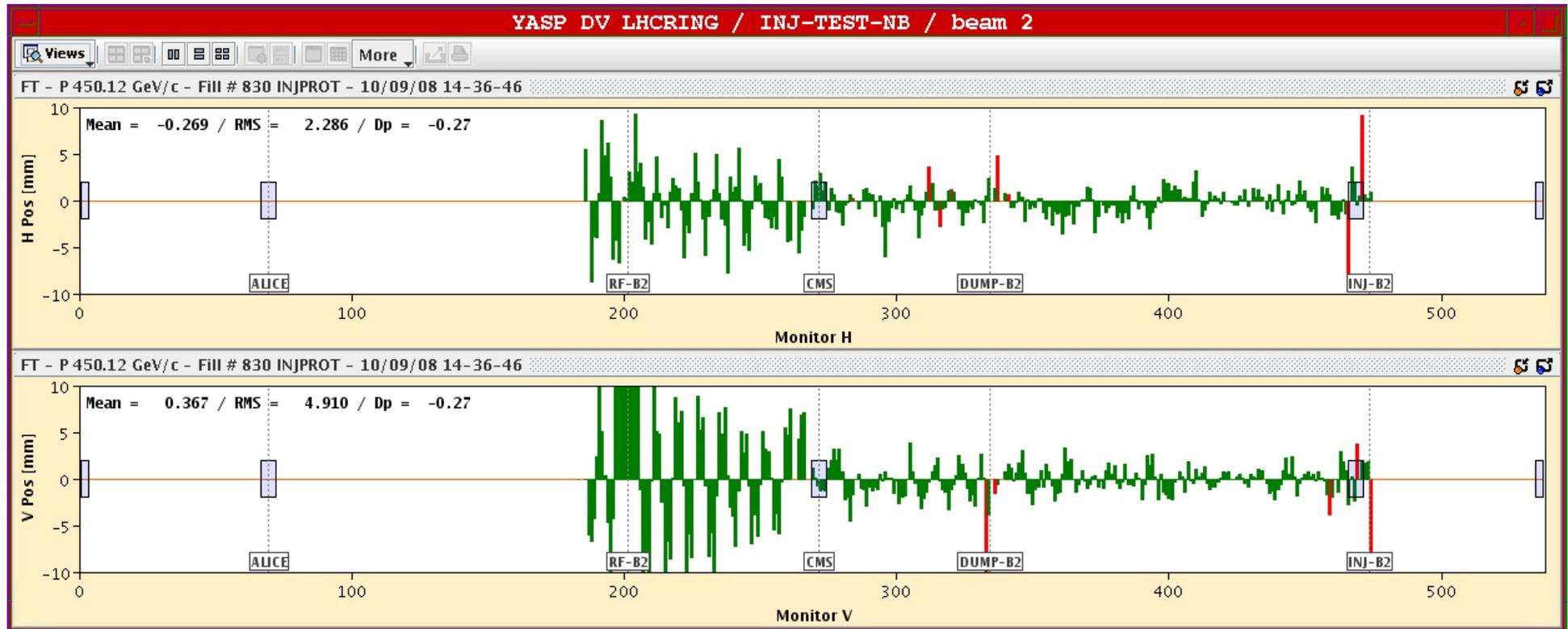
# Fädeln um den Ring – Strahl 2

- o ~ 50 Minuten Strahl 1
- o ~ 60 Minuten Strahl 2



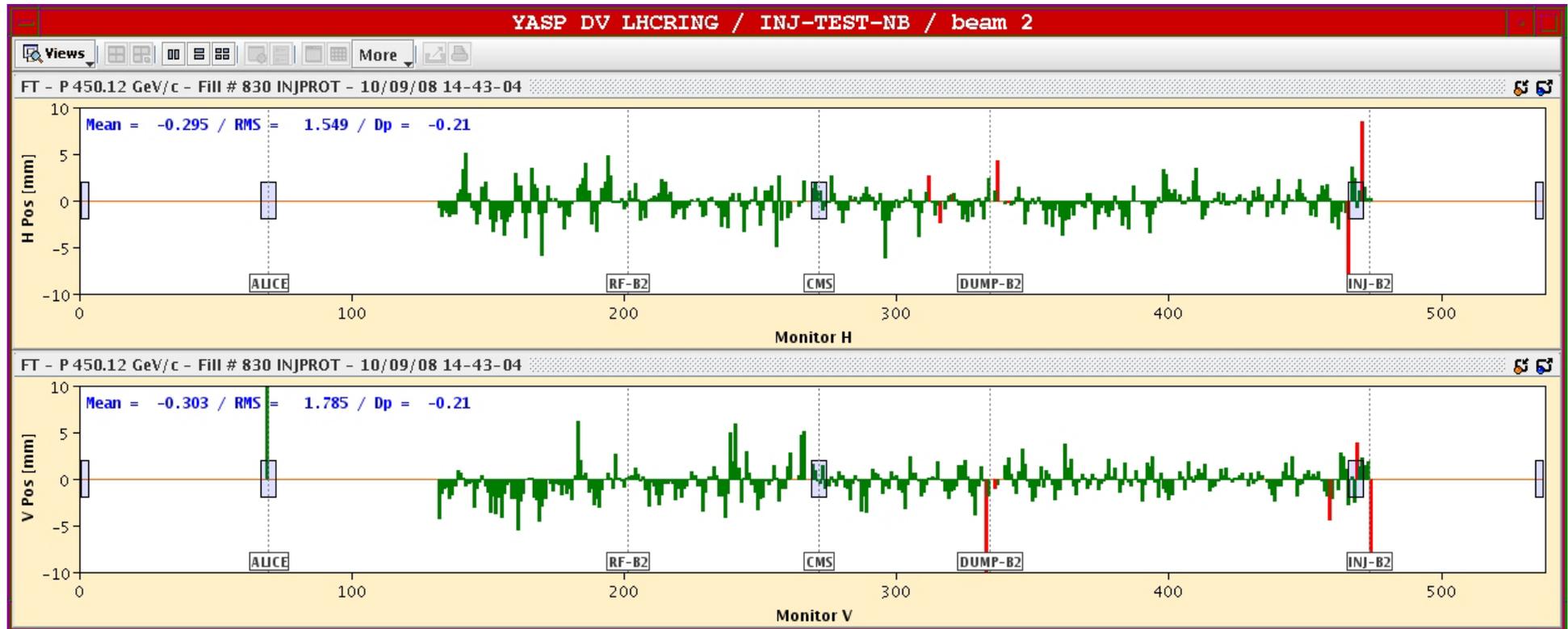
# Fädeln um den Ring – Strahl 2

- o ~ 50 Minuten Strahl 1
- o ~ 60 Minuten Strahl 2



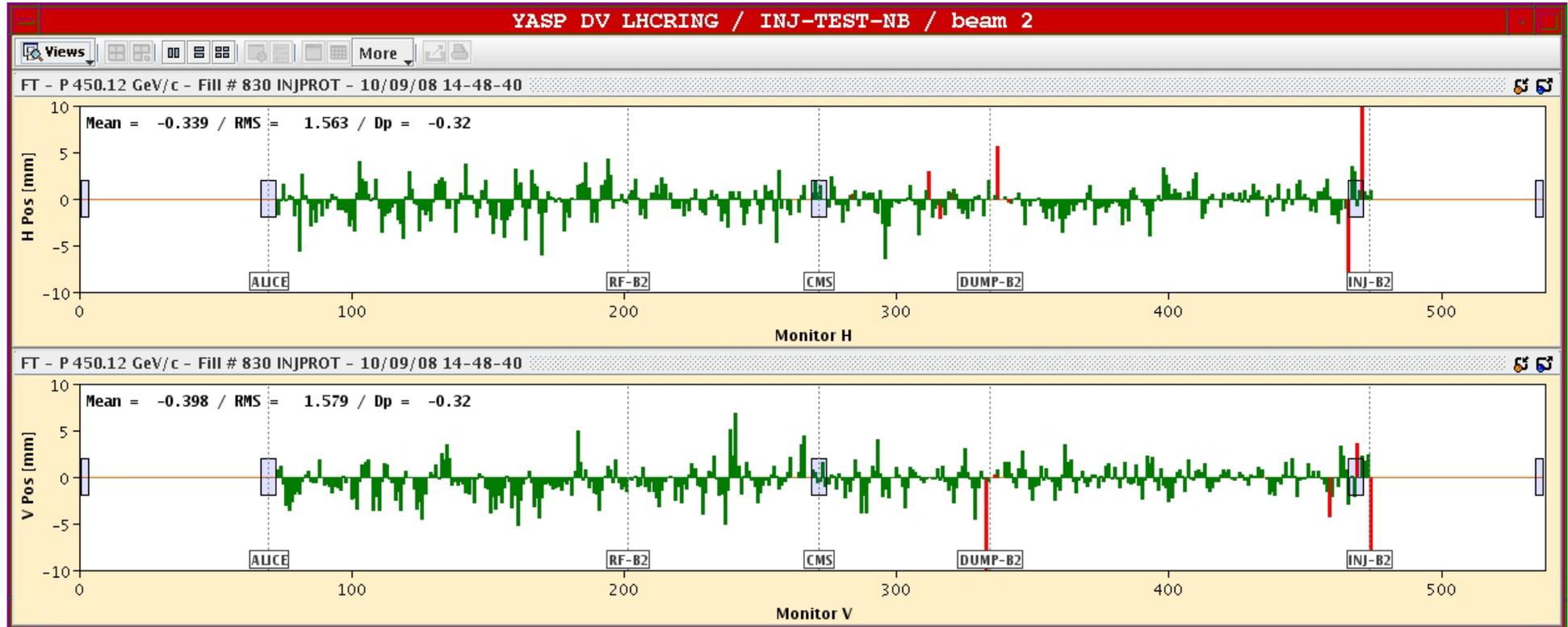
# Fädeln um den Ring – Strahl 2

- o ~ 50 Minuten Strahl 1
- o ~ 60 Minuten Strahl 2

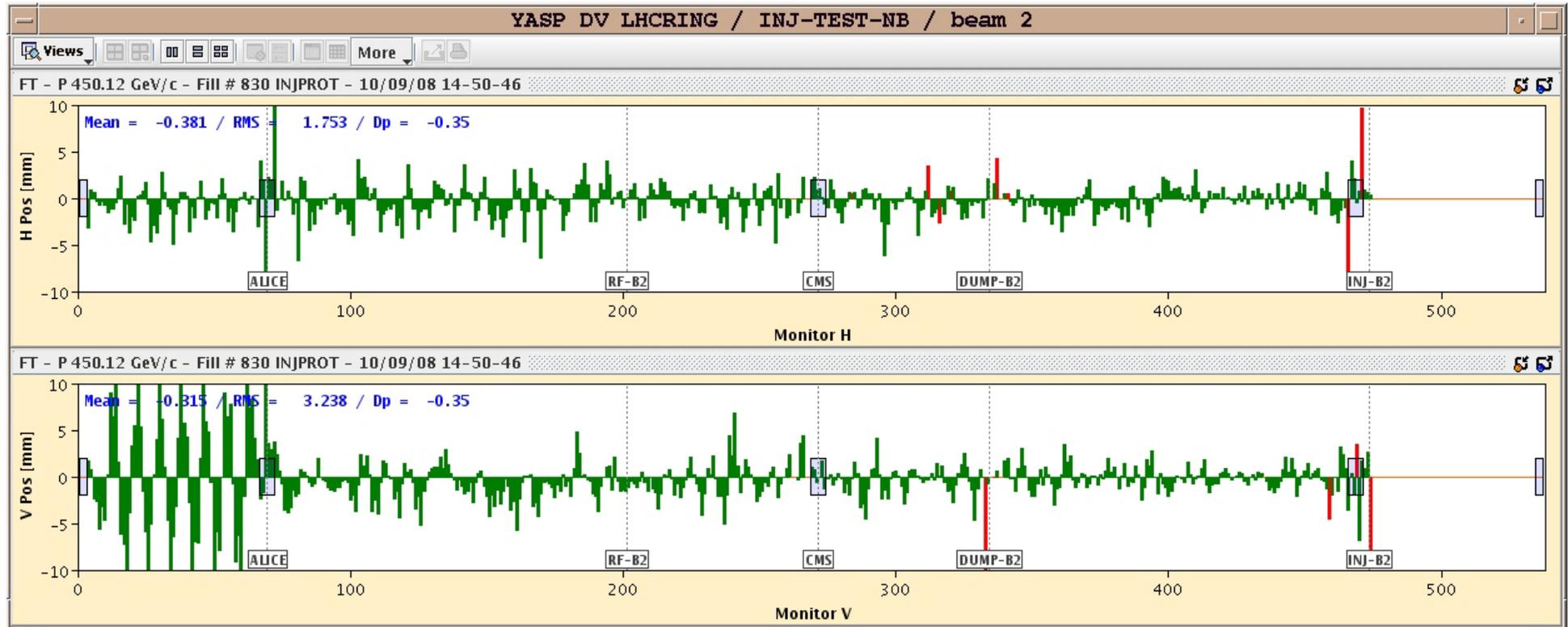


# Fädeln um den Ring – Strahl 2

- o ~ 50 Minuten Strahl 1
- o ~ 60 Minuten Strahl 2

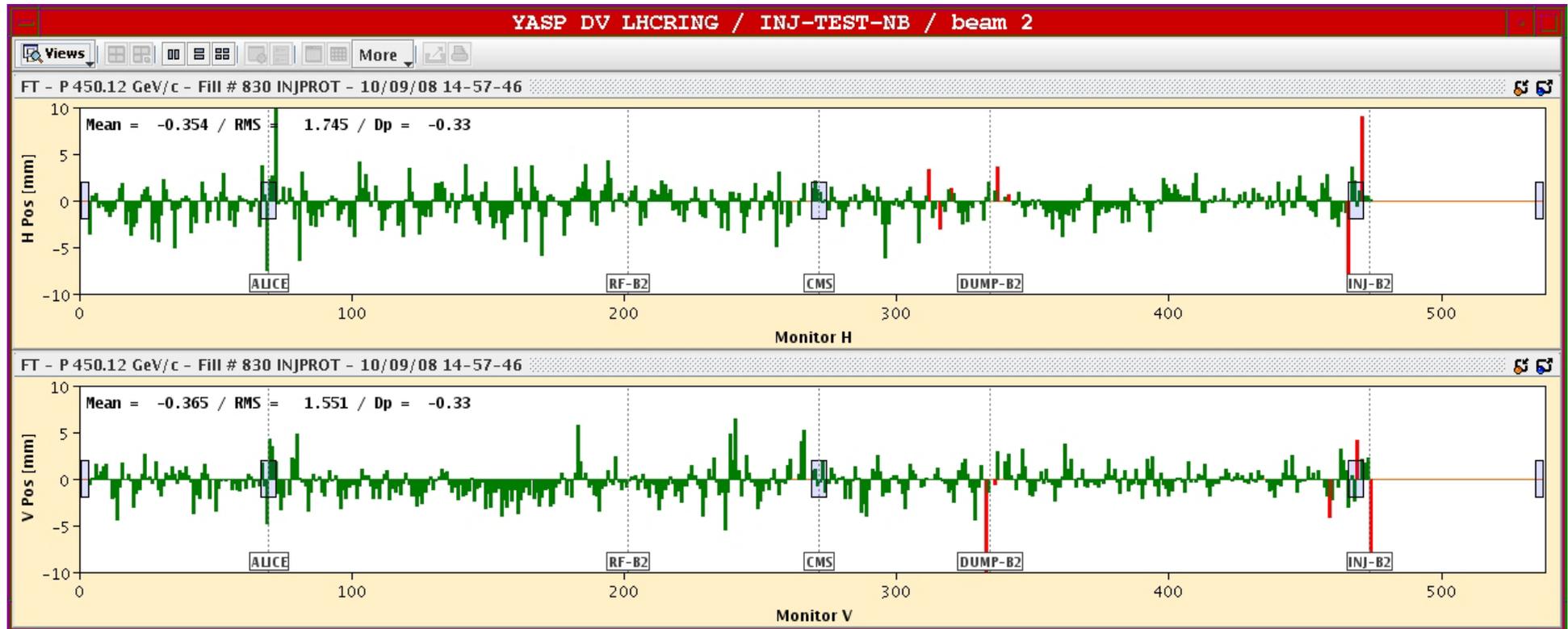


- o ~ 50 Minuten Strahl 1
- o ~ 60 Minuten Strahl 2

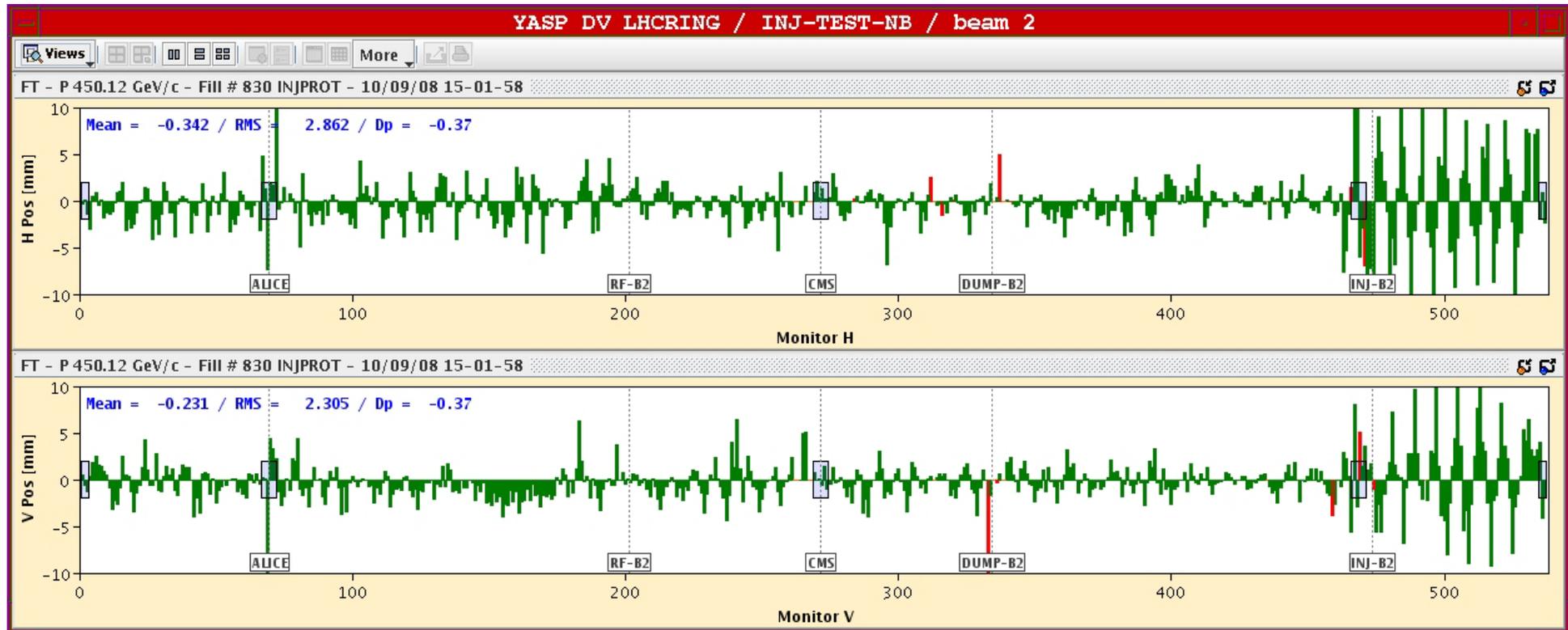


# Fädeln um den Ring – Strahl 2

- o ~ 50 Minuten Strahl 1
- o ~ 60 Minuten Strahl 2



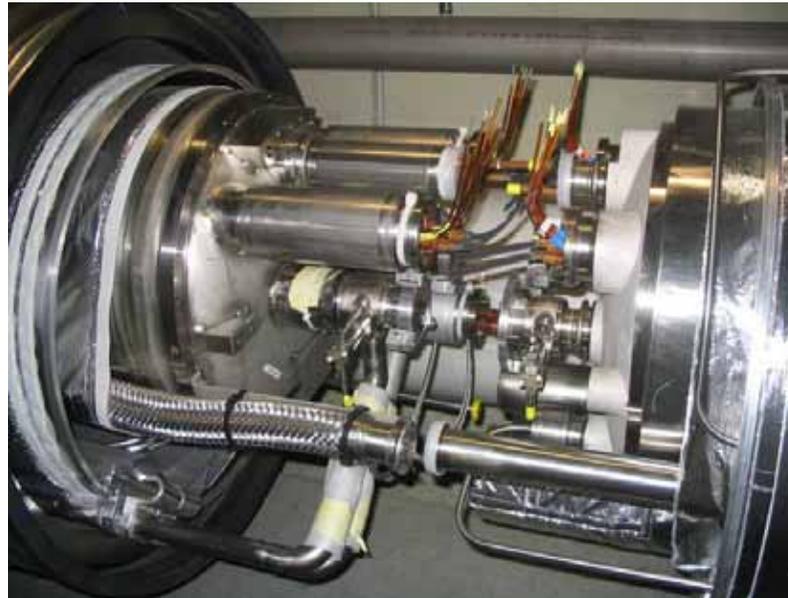
- o ~ 50 Minuten Strahl 1
- o ~ 60 Minuten Strahl 2



**Nach 1 Tag: Stabiler Strahl, Lebensdauer von Stunden !!!**

(Bei Injektionsenergie und sehr kleiner Intensität)

- o Während eines Tests für 5 TeV Operation ist eine Verbindung eines supraleitendes Kabels zwischen 2 Magneten aufgebrochen.
- o 200 MJ in einem Punkt verloren → Schmelzen des Kabels an der Stelle und Heliumverlust
- o Start-up erst wieder nächstes Jahr...

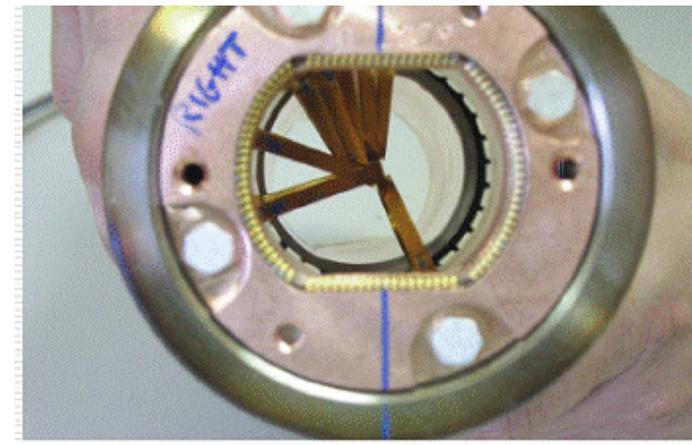
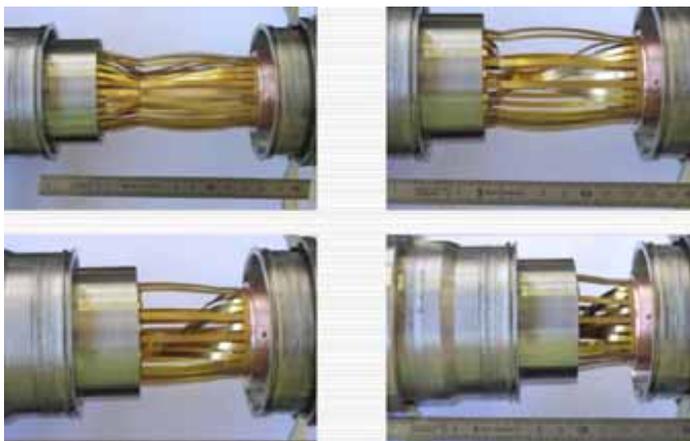


- o Problem mit "Plug-in modules"
- o Verbindungsstück zwischen den Strahlvakuumkammern zwischen den Magneten

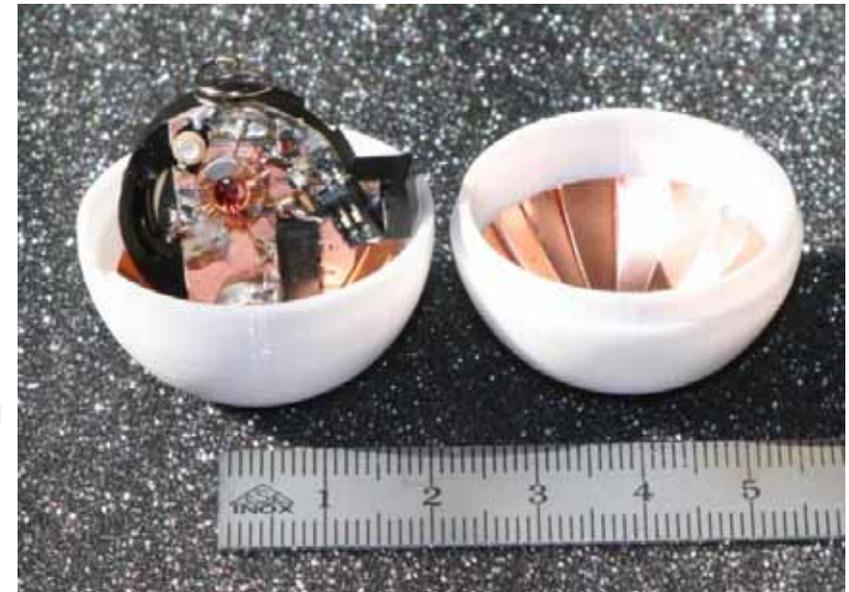
**Arc plug-in module bei Raumtemperatur**



- o "RF-Finger" hatten zu großen Winkel – beim Wiederaufwärmen von Sektor 78 ergab sich folgendes Problem: da passt kein Strahl durch.



- o “Plug-in module”-Problem einfach zu reparieren – wie detektieren?
- o Lösung: Ping-pong Ball durch Sektor Blasen.
- o Strahlpositionsmonitore können 40 MHz Signale auflösen.
- o Ping-pong Ball, der 40 MHz Signal emittiert.
- o Damit wurden 16 problematische PIMs entdeckt (9 davon unerwartet). 28 PIMs wurden ausgetauscht.



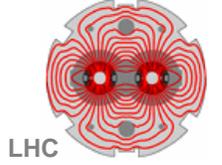
Und auch für das Problem vom 19. September werden wir eine ähnlich geniale Lösung finden.



Der LHC ist eine extrem komplexe Maschine mit Parametern am Rande des Machbaren...

...eines der aufregendsten Experimente der Geschichte der Menschheit...

...das die Welt der Physik (unseren Begriff der Wirklichkeit) völlig revolutionieren könnte.



# DANKE FÜR MATERIAL AN...

R. Schmidt, F. Bordy, M. Lamont, CERN Outreach Pages, v.a.