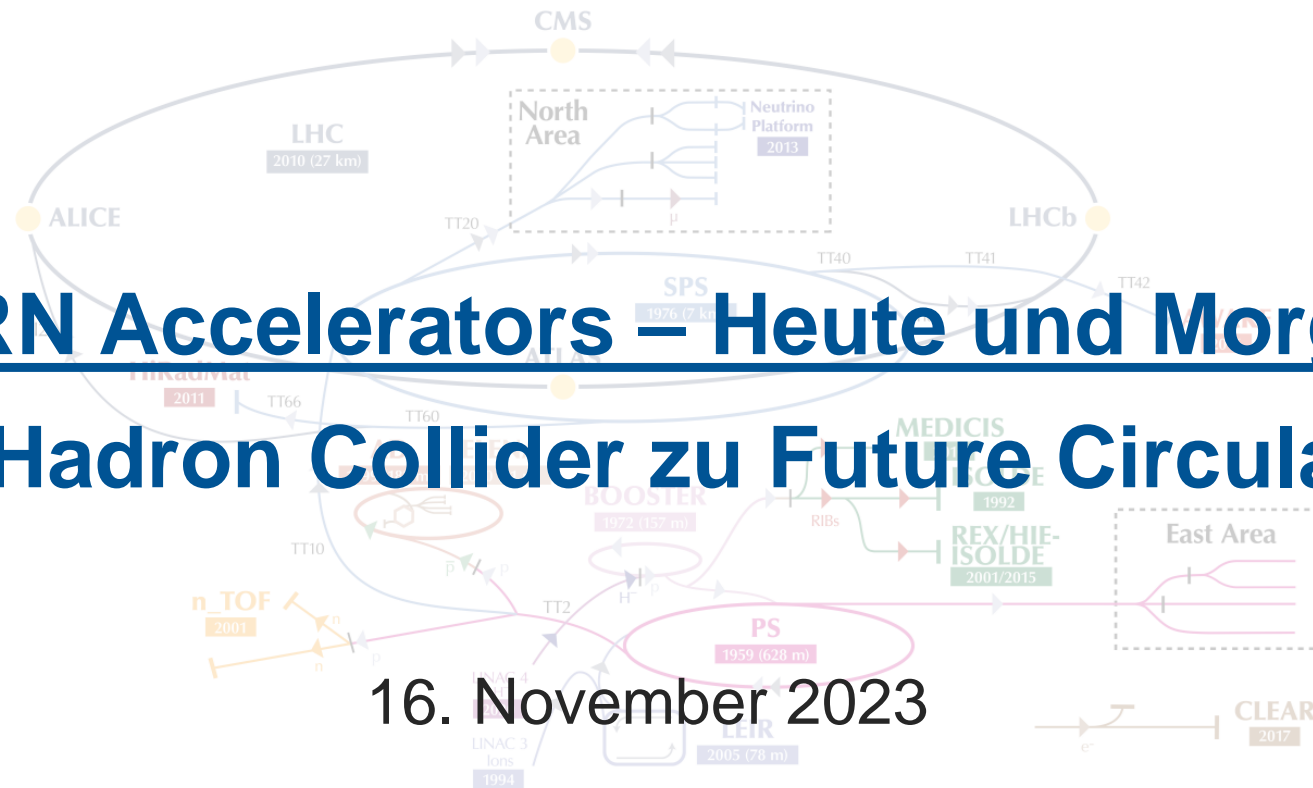


Accelerating Science



CERN Accelerators – Heute und Morgen

Vom Large Hadron Collider zu Future Circular Colliders

16. November 2023

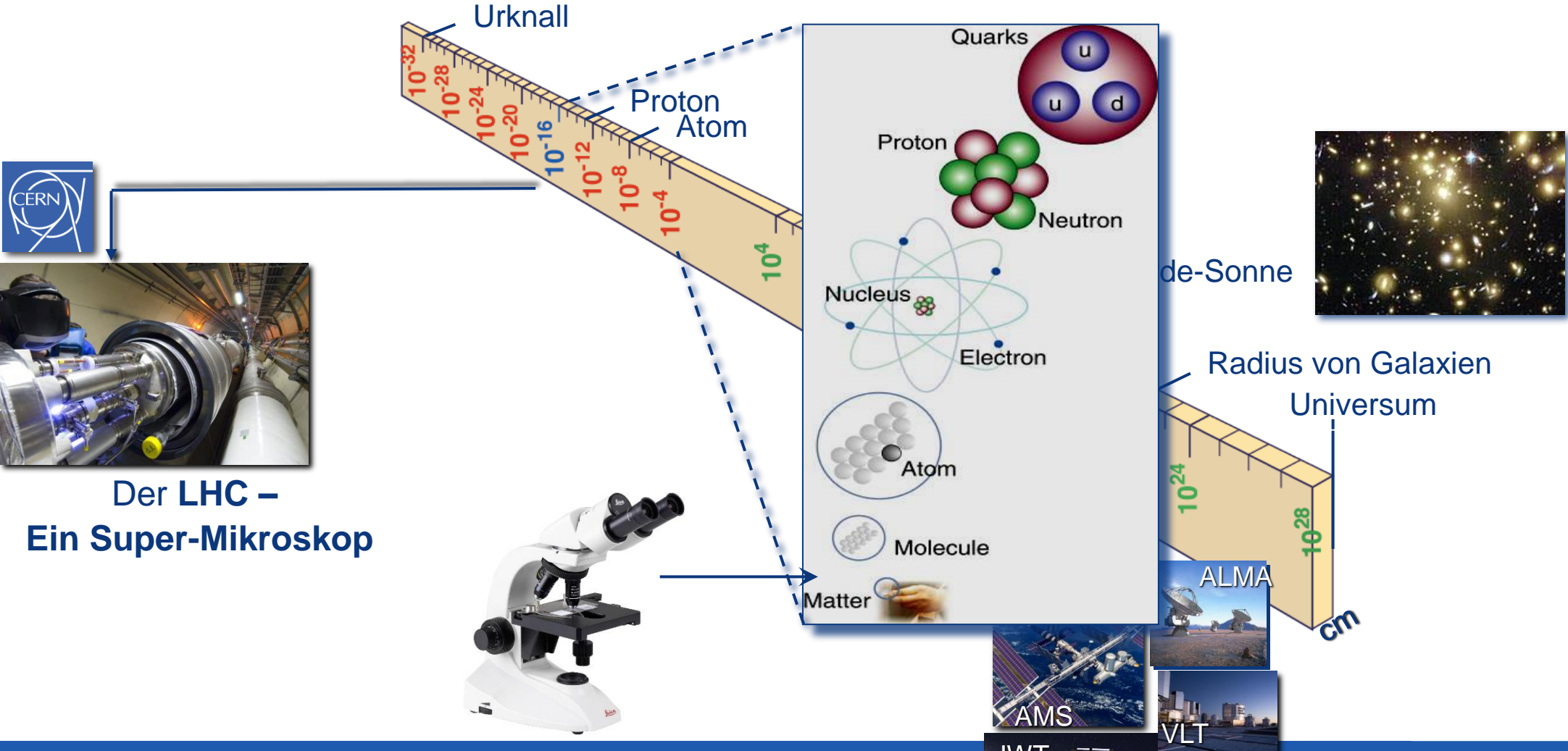
Dr. Michael Benedikt, Dr. Alexander Huschauer, CERN

LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE-ISOLDE - Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // MEDICIS // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LINear ACcelerator // n_TOF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials // Neutrino Platform

Inhalt

- **Teilchenbeschleuniger für Hochenergiephysik**
- **Die CERN Beschleunigerkette – von der Ionenquelle zum LHC**
- **Future Circular Colliders – eine Machbarkeitsstudie**

Teilchenbeschleuniger für Hochenergiephysik



Teilchenbeschleuniger für Hochenergiephysik

• Erzeugung hoher Energiedichte (auf kleinstem Raum)

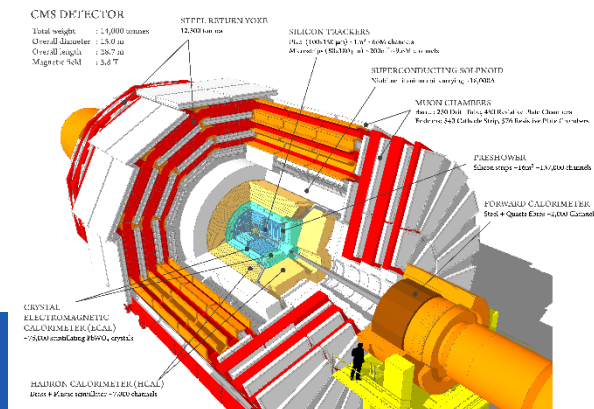
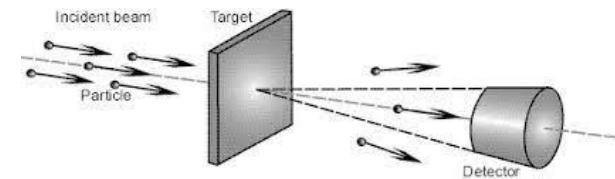
- Erzeugung von Teilchen nach Masse – Energie Äquivalenz: $E = m \cdot c^2$
- „Urknallsimulation“ -> gleiche Bedingungen, gleiche Teilchen.

• Verwendung von Teilchen als Sonden

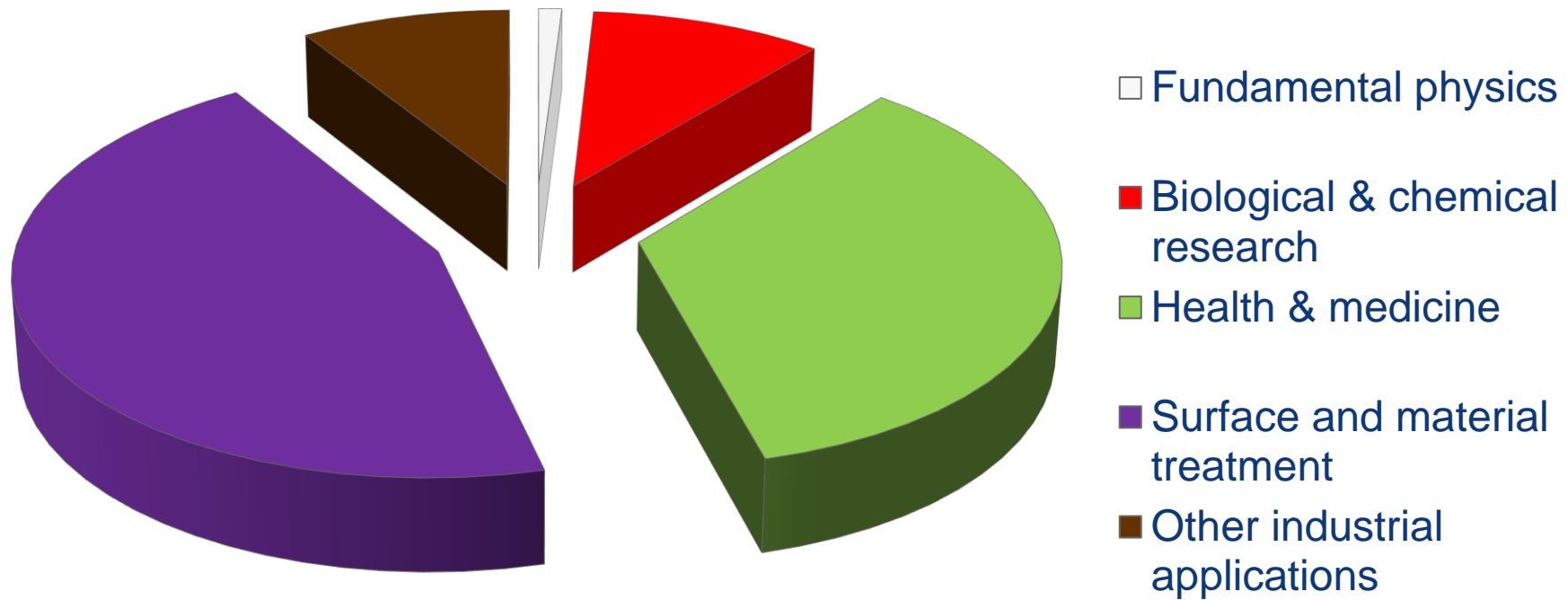
- Teilchen-Welle Dualismus: $E = h\nu$, $\lambda\nu = c$, $\lambda \propto 1/E$.
- Benötigt ebenfalls höchste Teilchenenergien.

• Prinzip – warum Teilchenbeschleuniger

- Teilchenbeschleuniger erteilt Teilchen (hohe) kinetische Energie.
- Teilchen auf **ruhendes Ziel** geschossen: **“fixed target” Methode**
- Teilchen mit **gegenlaufenden Teilchen** kollidiert: **“collider” Methode**
- Beobachtung mit Detektoren um oder hinter dem Kollisionpunkt.



Teilchenbeschleuniger für Hochenergiephysik



2 Haupttypen von Teilchenbeschleunigern

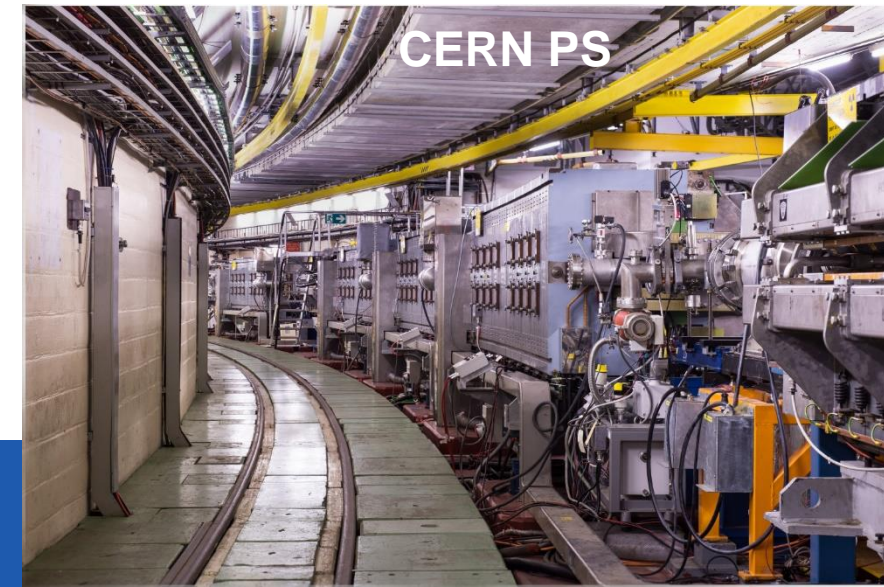
• Linearbeschleuniger (Linear Accelerator – LINAC)

- Teilchen von Hochfrequenz-/RF Kavitäten (und somit durch elektrische Felder) beschleunigt
 - **Aber nur einmal!**



• Kreisbeschleuniger (Synchrotron oder Zyklotron)

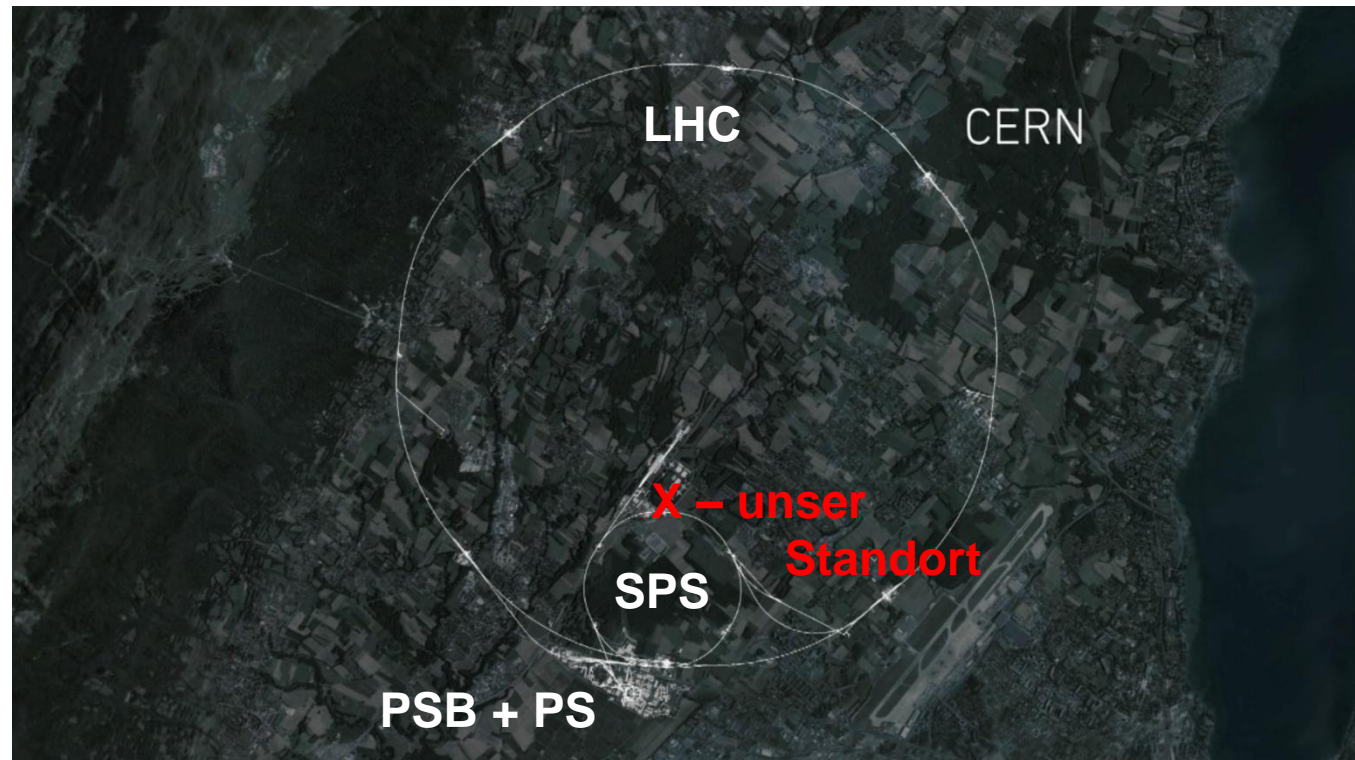
- Teilchen laufen im Kreis und passieren Kavitäten mehrmals
 - Hunderte Millionen Male im LHC
 - Magnetische Felder benötigt um Teilchen auf Kreisbahn zu halten



Die CERN Beschleunigerkette (i)

- Funktionsprinzip ähnlich der Gangschaltung beim Auto...

- Je “schneller” (je mehr Energie/Impuls) - desto höher der Gang (größer der Beschleuniger)
- Limitierter dynam. Arbeitsbereich: Stromversorgungen, Magnete, RF ($\beta < 1$)
- Typischerweise Erhöhung der Energie um 1 Größenordnung pro Stufe.



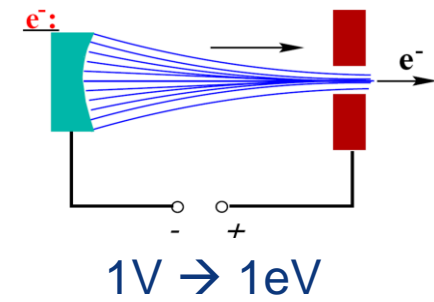
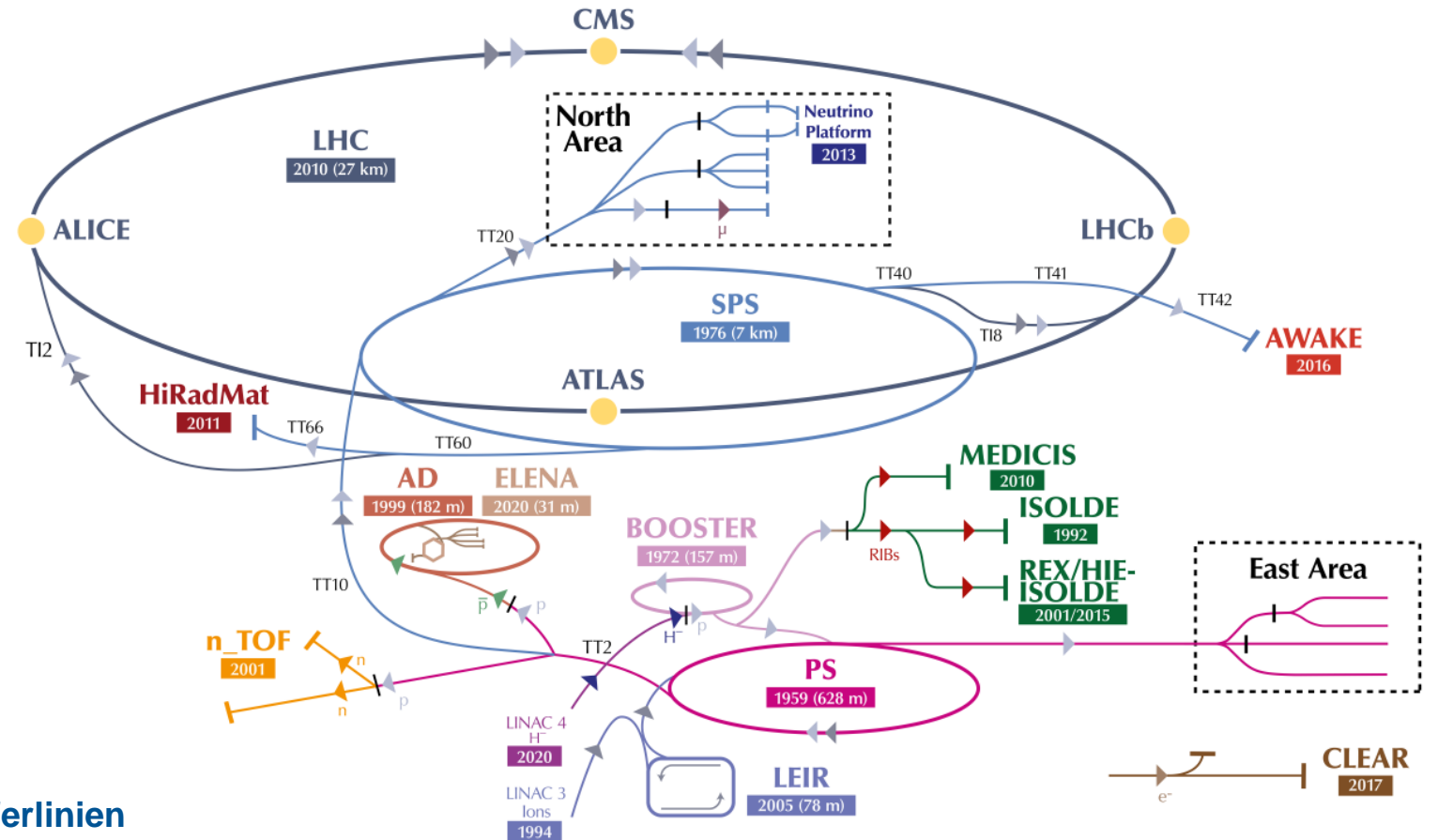
Die CERN Beschleunigerkette (ii)



Die CERN Beschleunigerkette (iii) – für Protonen

- **H⁻ Ionenquelle**
 - 45 keV, gepulst alle 1.2 s.
- **Linac4 (Linearbeschleuniger)**
 - 160 MeV, gepulst alle 1.2 s.
- **PS Booster (4-Ring Synchrotron)**
 - 2 GeV, 1.2 s Zyklus.
- **PS (Synchrotron)**
 - 25 GeV, 3.6 s Zyklus.
- **SPS (Synchrotron)**
 - 450 GeV, 27.6 s Zyklus.
- **LHC (Synchrotron)**
 - 7 TeV, stabiler Strahl für mehrere Stunden
- **Vielzahl an “fixed target” Experimenten**
- **Alle Beschleuniger verbunden durch Transferlinien**

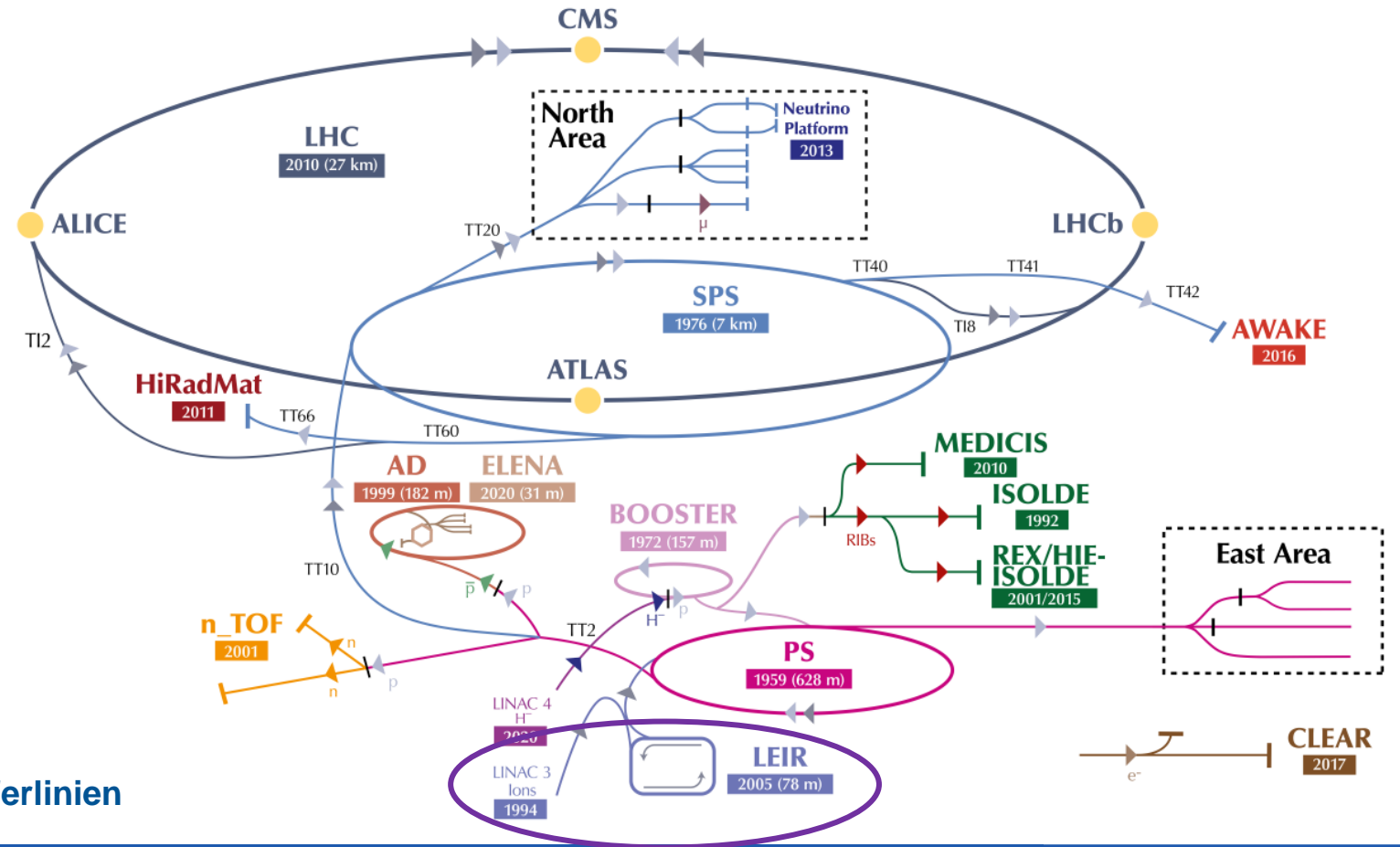
The CERN accelerator complex
Complexe des accélérateurs du CERN



Die CERN Beschleunigerkette (iv) – für schwere Ionen

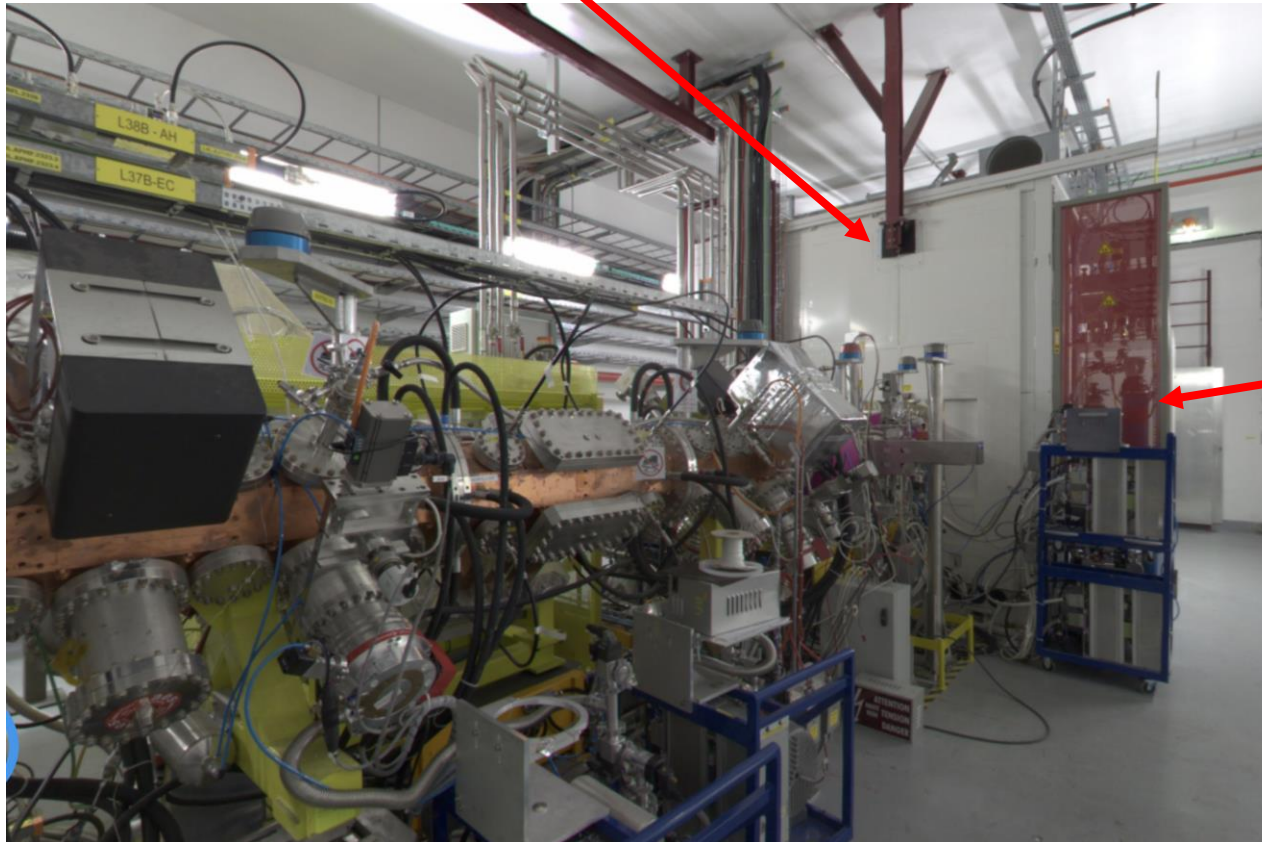
- **Pb Ionenquelle**
 - 2.5 keV/Nukleon, gepulst alle 0.1 s.
- **Linac3 (Linearbeschleuniger)**
 - 4.2 MeV/Nukleon, gepulst alle 0.1 s.
- **LEIR (Synchrotron)**
 - 72 MeV/Nukleon, 2.4 s Zyklus.
- **PS (Synchrotron)**
 - 25 GeV, 3.6 s Zyklus.
- **SPS (Synchrotron)**
 - 450 GeV, 27.6 s Zyklus.
- **LHC (Synchrotron)**
 - 7 TeV, stabiler Strahl für mehrere Stunden
- **Vielzahl an “fixed target” Experimenten**
- **Alle Beschleuniger verbunden durch Transferlinien**

The CERN accelerator complex
Complexe des accélérateurs du CERN

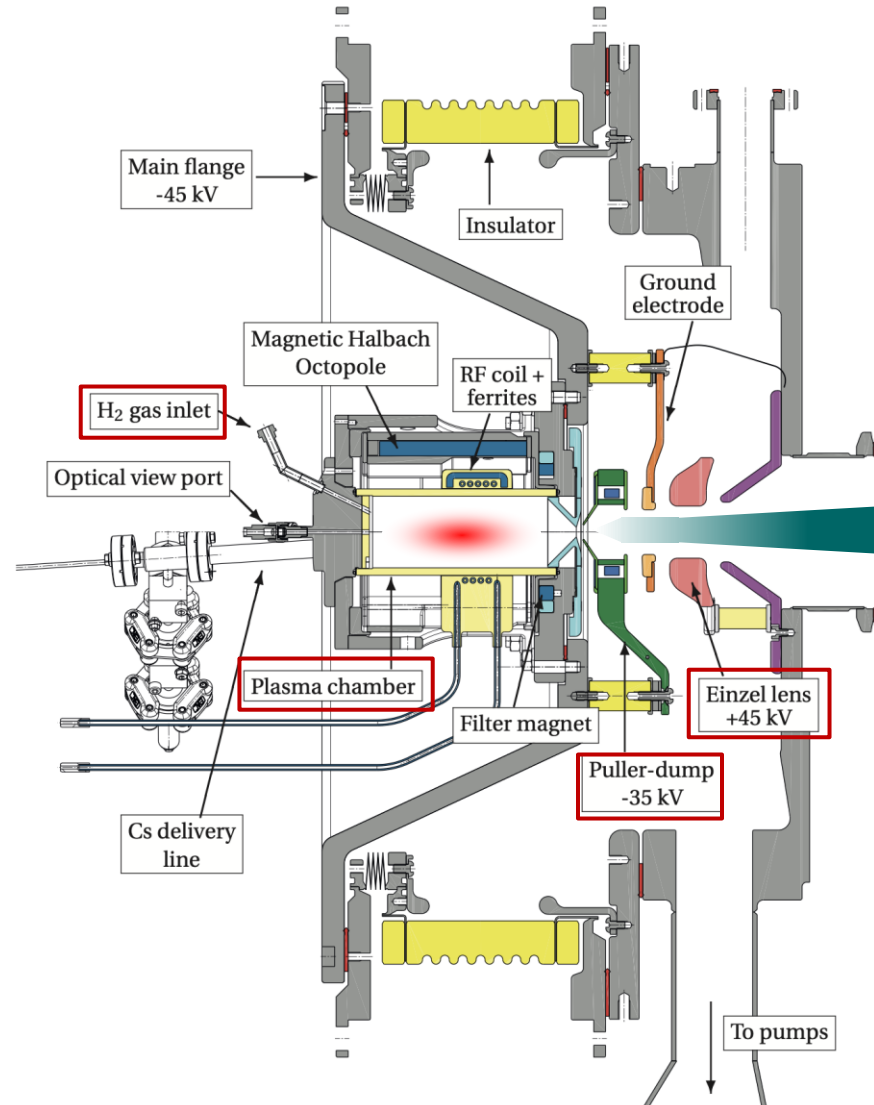


Startpunkt...

- 45 kV Hochspannungsplattform im Faraday-Käfig.



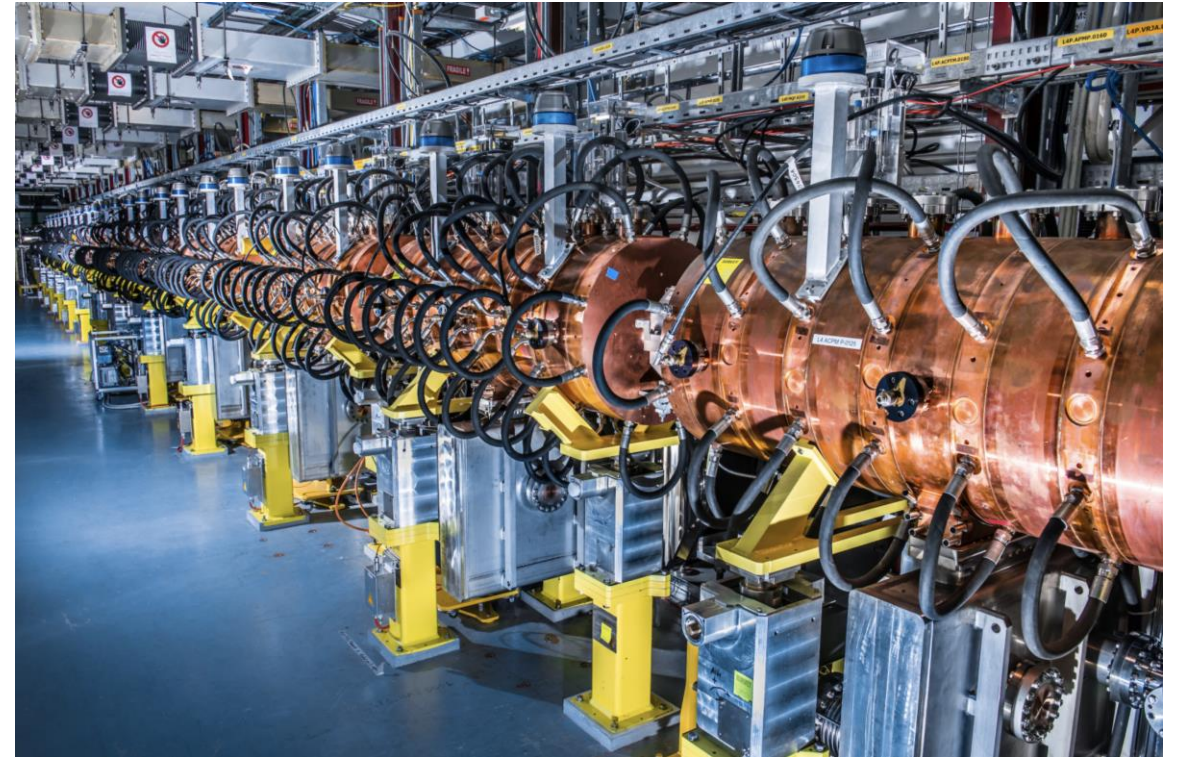
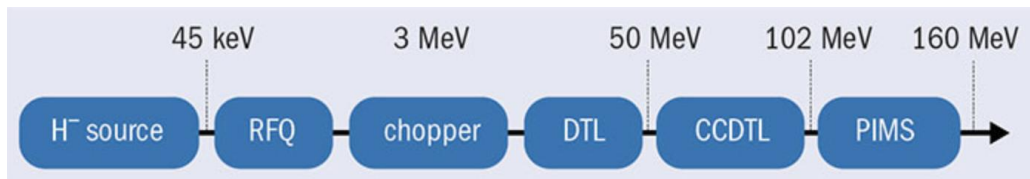
H⁻ Ionenquelle



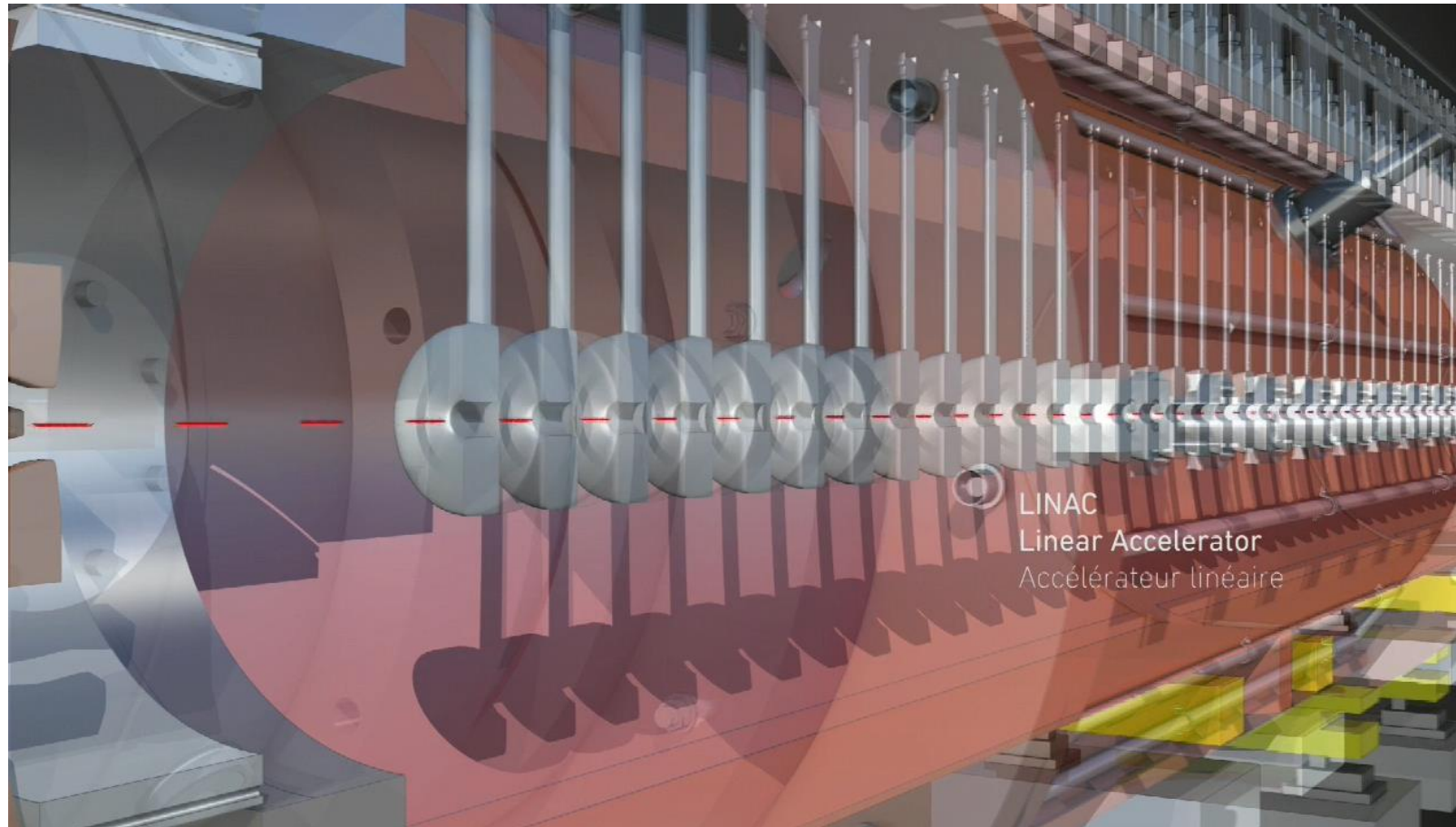
Linac4

- Folgt auf Ionenquelle, beschleunigt den Strahl auf **160 MeV**.
- Beschleunigung mit elektrischem Feld, Fokussierung mit magnetischem Quadrupolfeld
- Strahl durchläuft Beschleuniger nur ein Mal
- RF 352 MHz, Länge 86 m.

Linac4 Bestandteile



Alvarez Linearbeschleuniger - Prinzip



Teilchen werden zwischen den Driftröhren beschleunigt.

$\frac{1}{2}$ RF Periode später würden Teilchen wieder gebremst. → Abschirmung in der Röhre.

Länge der Driftröhren und Abstände nimmt mit steigender Teilchenenergie zu (schnellerer Strahl legt größere Distanz pro RF Periode zurück).

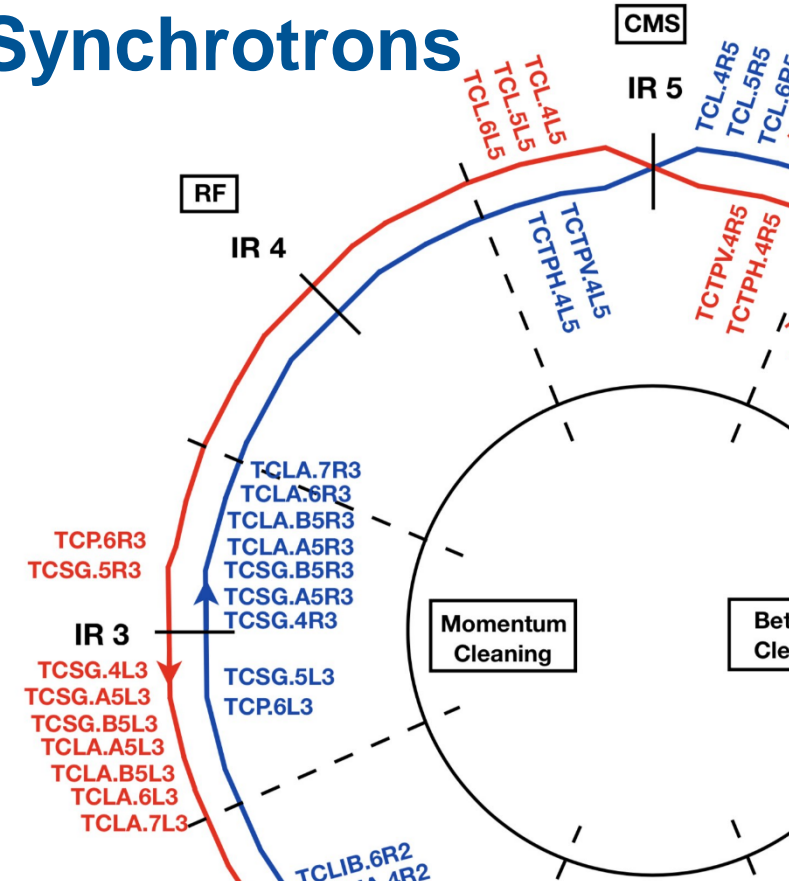
Hauptkomponenten von Kreisbeschleunigern / Synchrotrons

• Fixer Bahnradius, viele Umläufe

- **Ablenkmagnete (Dipole)** um den Strahl auf der Umlaufbahn zu halten
- Sollbahn definiert durch Ablenkmagnete und gerade Verbindungen.
- **Fokussiermagnete (Quadrupole)** um den Strahl stabil zu halten.
- Nicht alle Teilchen sind genau auf Sollbahn, Injektionsfehler, Ablenkfehler in Dipolmagneten (limitierte mechanische und elektrische Präzision)
- **Beschleunigungsstrukturen (Hochfrequenz/RF-Kavitäten)** um den Strahl mit hochfrequenten elektrischen Wechselfeldern zu beschleunigen.

• Prinzip:

- Synchrotrons arbeiten mit **niedrigen Beschleunigungsspannungen** (viele Umläufe, Energiegewinn pro Umlauf $q \cdot U$)
- **Dipolfeld** wird **synchron** mit der **Teilchenenergie** erhöht um Strahl auf Sollbahn zu halten → **Synchrotron**
- **Hohe Teilchenenergien** benötigen Dipole mit sehr **hohen Magnetfeldern**



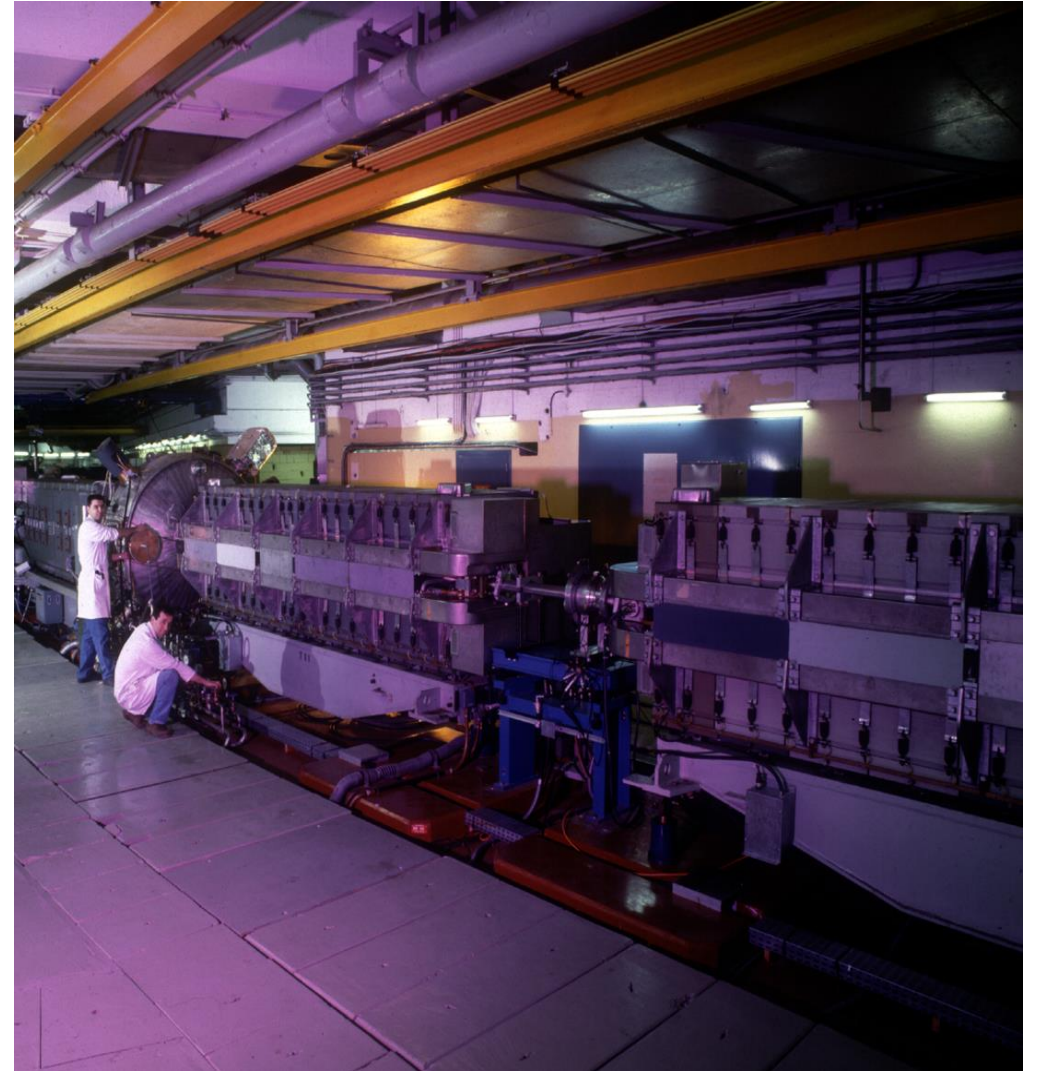
Proton Synchrotron Booster (PSB)

- Erster Kreisbeschleuniger der Beschleunigerkette
- Synchrotron mit 4 vertikal separierten Ringen (Radius 25 m)
 - Umfang $\frac{1}{4}$ des Proton Synchrotrons
- Injektion des Linacstrahles nacheinander in die 4 Ringe
 - PSB definiert transversale Strahlgröße für nachfolgende Beschleuniger und insbesondere den LHC
- 1-2 Teilchenpakete pro Ring
- Beschleunigung 160 MeV → 2 GeV
- Extraktion zum PS (1 bis 8 Pakete)
- Zykluslänge 1.2 s



Proton Synchrotron (PS)

- **Synchrotron (Radius 100 m)**
- **Doppelinjektion vom PSB je nach Betriebsart:**
 - z.B. für LHC
 - 4 Pakete + 2 Pakete 1.2 s später oder
 - 4 Pakete + 4 Pakete 1.2 s später
- **Beschleunigung 2 → 25 GeV**
- **Longitudinale Aufspaltung der Pakete mit RF Kavitäten**
 - Vielzahl von Möglichkeiten: 4 → 48 Pakete, 6 → 72 Pakete, 7 → 56 Pakete, etc.
 - **PS erzeugt Zeitstruktur** für LHC-Strahlen (25ns Paketabstand)
- **Extraktion der 48/72 Pakete zum SPS**
- **Zykluslänge 3.6 s für LHC-Strahlen**



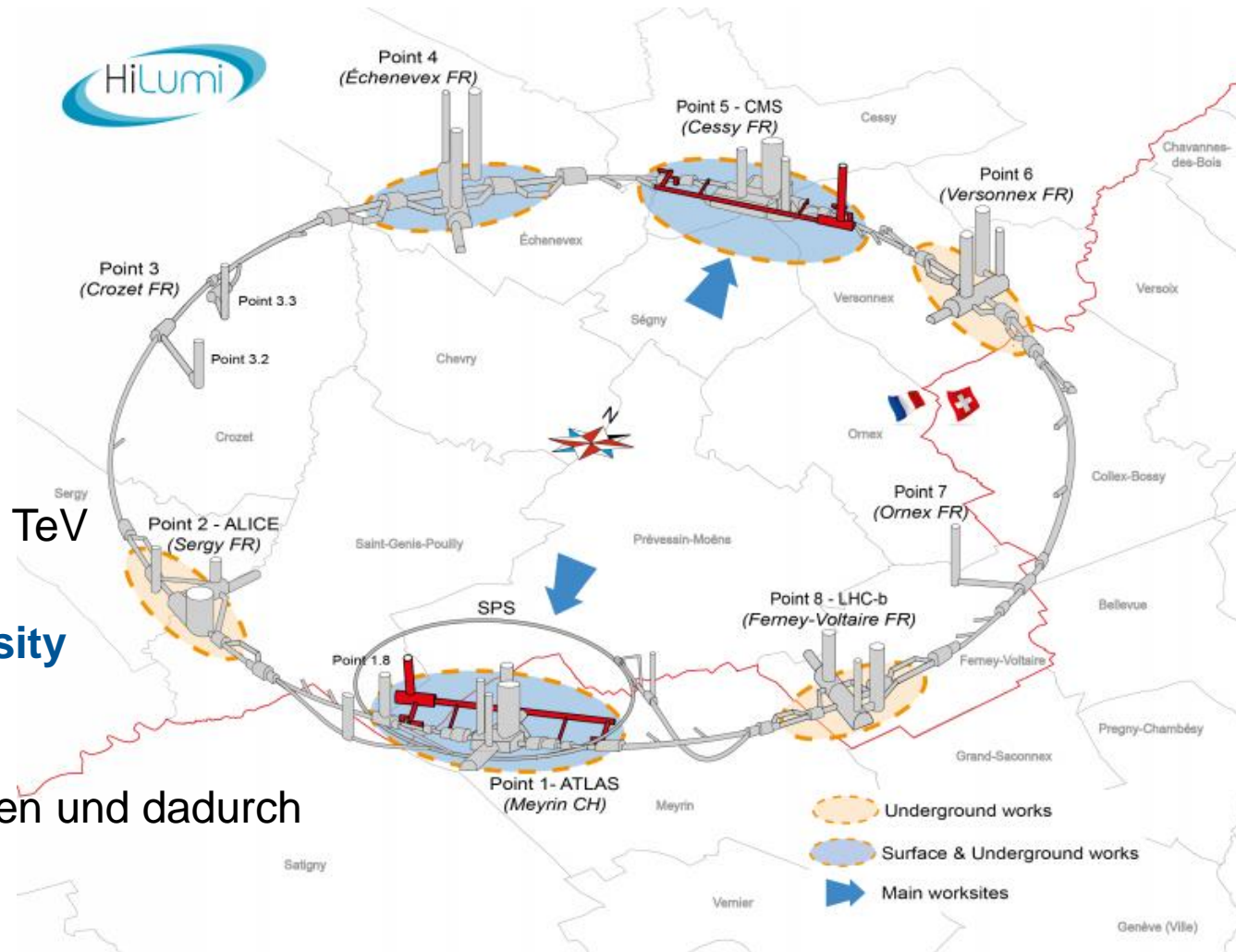
Super Proton Synchrotron (SPS)

- **Synchrotron (Radius 1100 m)**
- **Verschiedene Injektionsschema:**
 - z.B. für LHC
 - 4 Injektionen von jeweils 72 Paketen vom PS
 - 5 Injektionen von jeweils 48 Paketen vom PS
 - Abstand der Injektionen jeweils 3.6 s
- **Beschleunigung 25 → 450 GeV**
 - **SPS definiert die Injektionsenergie** für den LHC
- **Überprüfung der Strahlqualität**
- **Operationalles Schema 2023:**
 - Extraktion von bis zu 236 Paketen zum LHC
 - Zykluslänge 25.2 s für LHC-Strahlen



Large Hadron Collider (LHC)

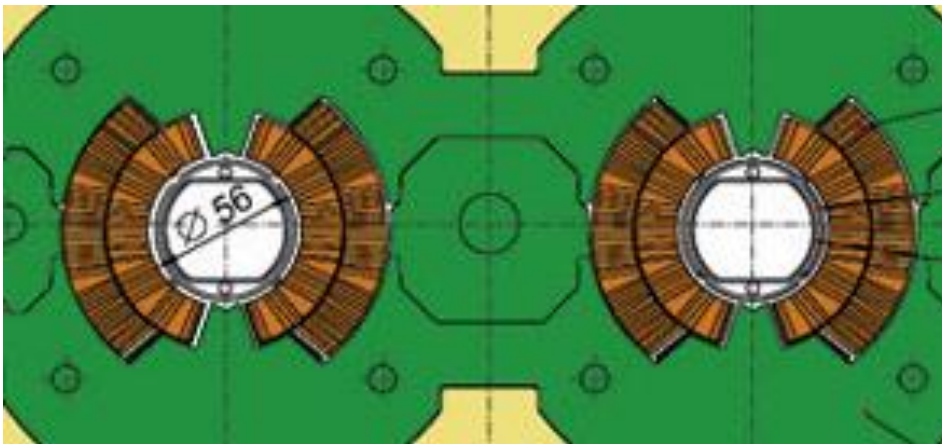
- **Synchrotron (Radius 2803 m)**
- **Zirkulare Kollisionsmaschine mit 26.6 km Umfang**
- **Kollisionen von Protonen und schweren Ionen:**
 - Protonen – Protonen 7 + 7 TeV
 - Bleiionen – Bleiionen 574 + 574 TeV
- **LHC Upgrade durch High-Luminosity Projekt**
 - Implementierung 2026-28
 - Ziel: erhöhte Anzahl an Kollisionen und dadurch höhere Statistik in kürzerer Zeit



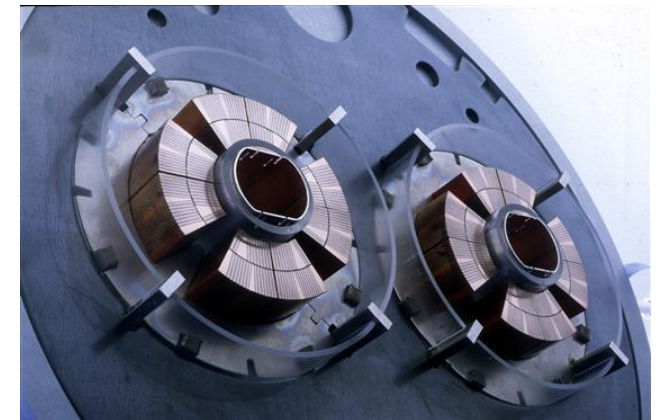
Dipolmagnete für hohe Felder

- **Hohe Energien → supraleitender Dipolmagnet ($B \leq 10$ T)**
 - Sehr hohe Ströme notwendig → Supraleitung ermöglicht hohe Stromdichten und vermeidet Ohm'sche Verluste.
 - Temperatur in den Dipolen: 1.9 K = - 271.25 °C
 - Feldverteilung/qualität durch Stromverteilung gegeben
 - Feldverteilung bei normalleitenden Magneten durch Eisen vorgegeben
- **Spulengeometrie zur Dipolfelderzeugung:**
 - Azimutale Stromverteilung:

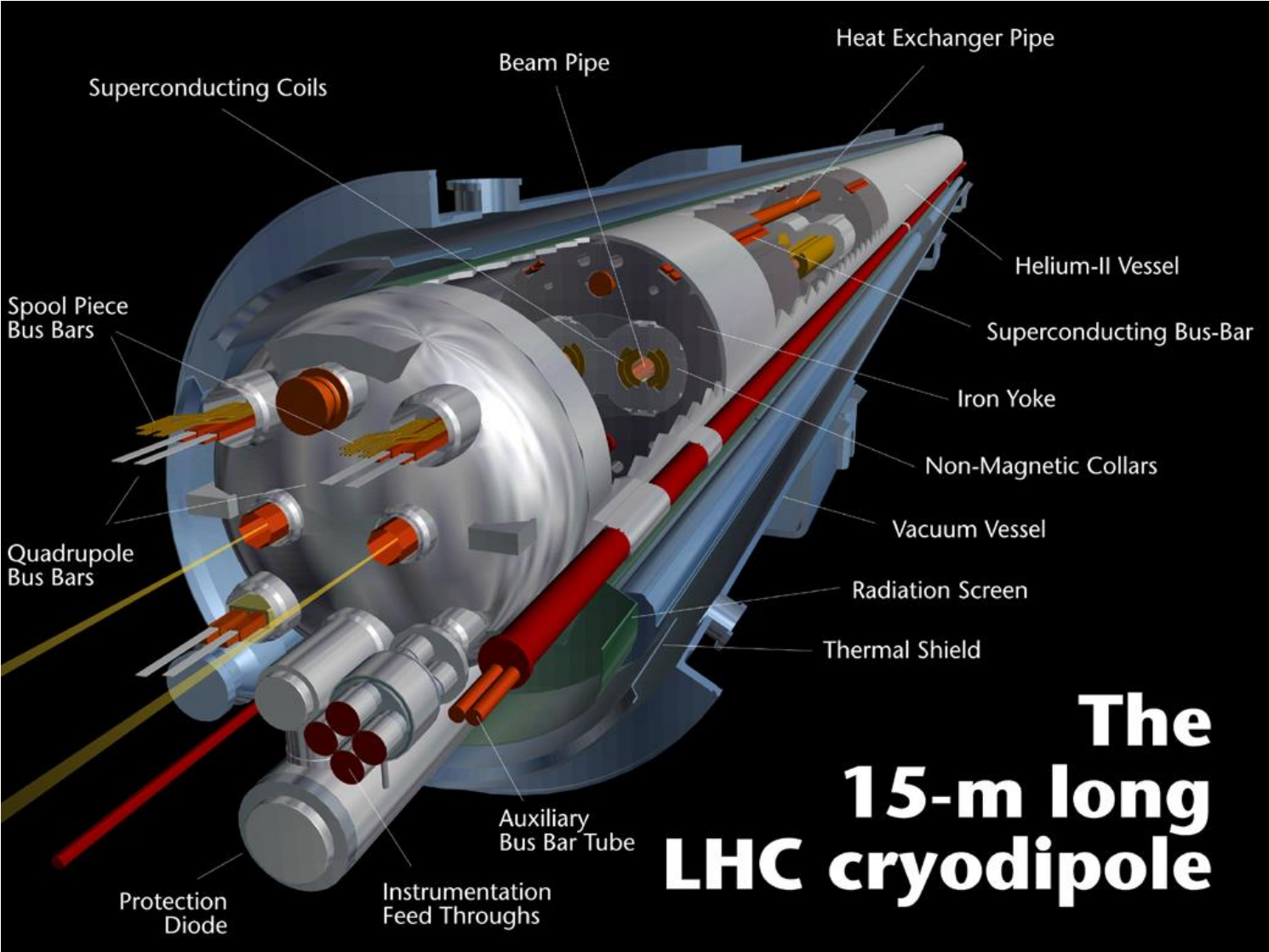
$$I(\phi) = I_0 \cos(\phi) \quad \text{Dipol}$$



$$I_0 \cos(2\phi) \quad \text{Quadrupol}$$



LHC – Dipolmagnet



LHC – Dipolmagnet

1232 solcher Magnete sind im LHC Tunnel installiert.



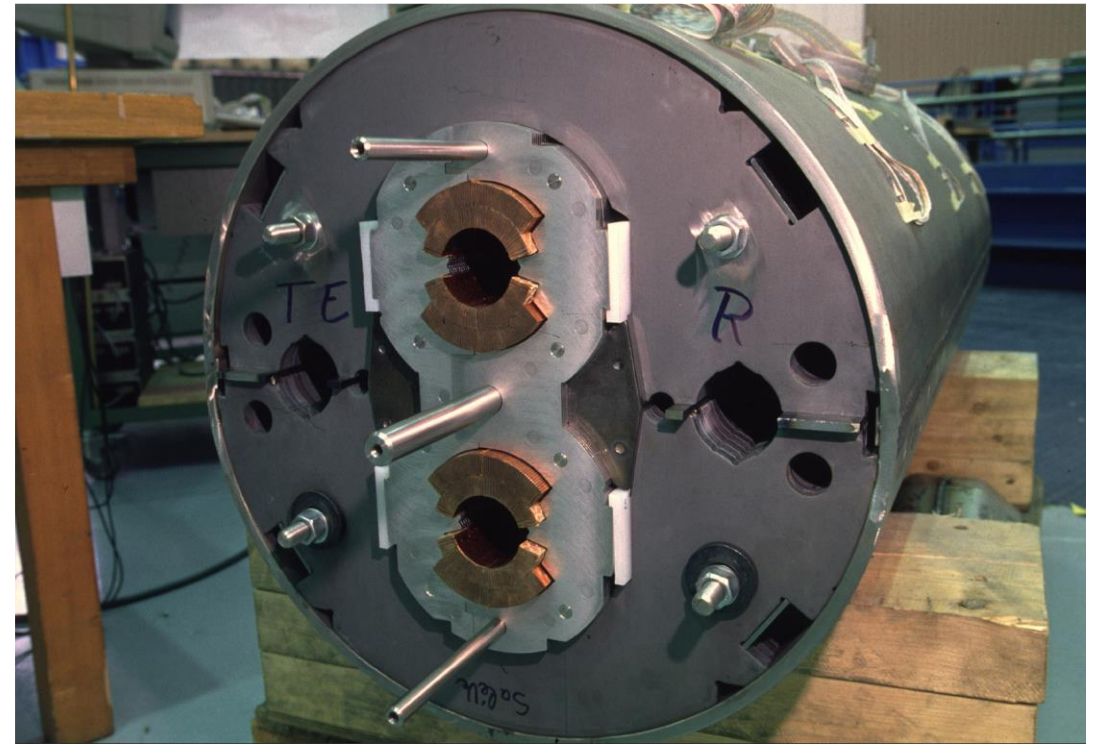
Kraftwirkung auf Spulen

- Kraft auf stromführenden Leiter in Magnetfeld (rechtwinkelig dazu):

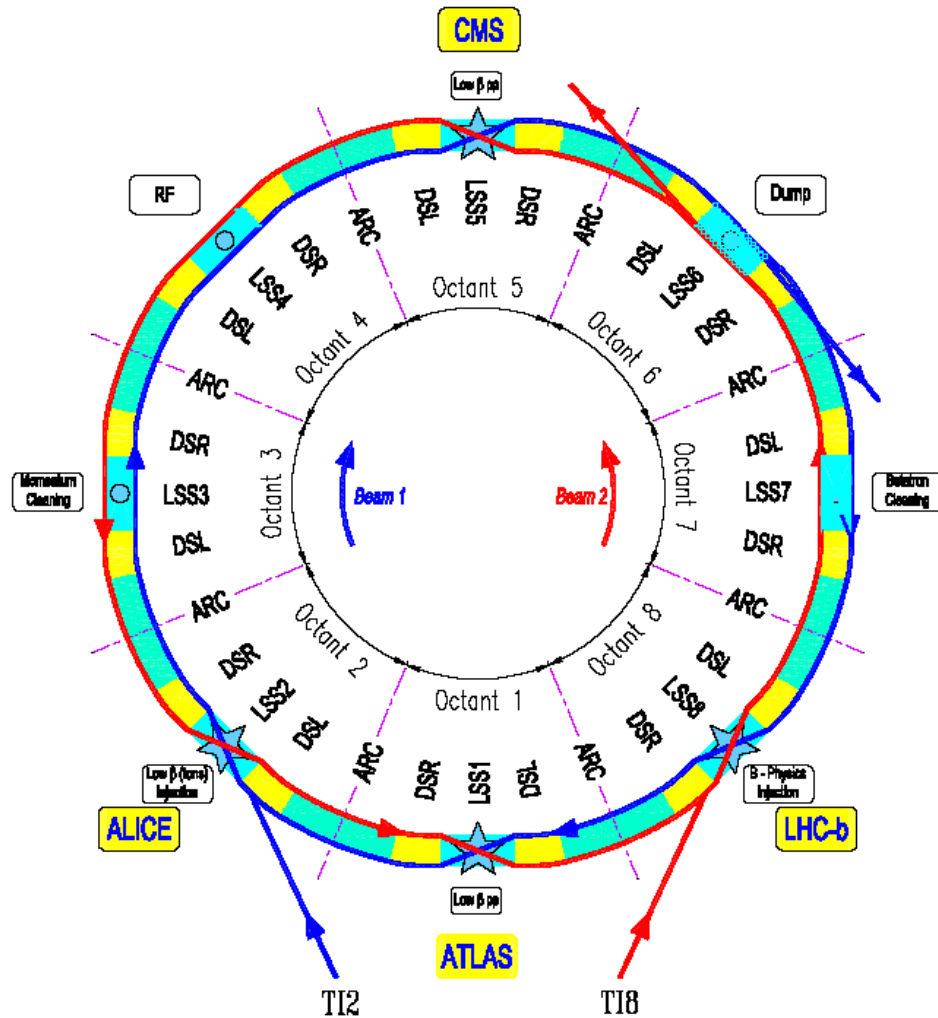
$$F = q \cdot v \cdot B = I \cdot l \cdot B \quad \text{mit } I = 11 \text{ kA, } B_{\text{mittel}} \sim 4 \text{ T}$$

$$F = 44000 \text{ N / m / Windung}$$

- Mit insgesamt 80 Windungen ergibt sich eine Kraft von **400 Tonnen pro m Spule**
 - Gewichtskraft von 4 E-Loks!
 - Sehr hohe mechanische Anforderungen



Kollisionen im LHC



• Kreuzungspunkte:

- Die zwei Strahlen kollidieren an 4 Kreuzungspunkten (300 mrad).
- 2808 Teilchenpakete pro Ring (ein Paket alle 7.5 m, 30 cm Länge).
- Mit der Umlauffrequenz $f_{\text{rev}} = 27\text{km}/3 \cdot 10^8\text{ms}^{-1} = 11 \text{ kHz}$ folgt:

Teilchen legen den Weg Erde-Sonne 7 mal pro Stunde zurück!

Paketkollisionen = Pakete $\cdot f_{\text{rev}} = 3 \cdot 10^7/\text{s}$ pro Kreuzungspunkt.

- Um jeden Kollisionspunkt ist ein Experiment angeordnet.

• 4 große Experimente:

- ATLAS, CMS, LHC-b, ALICE

Maschinenschutzsystem im LHC

- **Strahl selbst ist gefährlich für den Beschleuniger:**

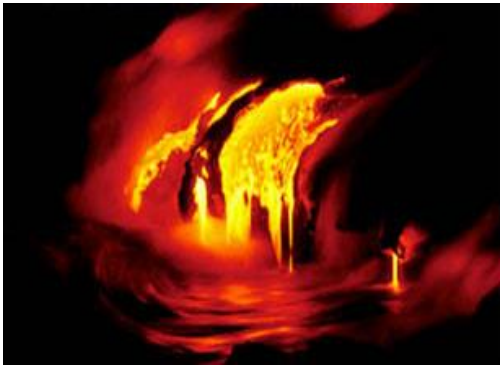
- Pro Strahl gespeicherte Energie bei 7 TeV (2 Strahlen insgesamt):

$$E_{\text{Strahl}} = 2808 \cdot 1,1 \times 10^{11} \cdot 7 \times 10^{12} \cdot 1,602 \times 10^{-19} = 350 \text{ MJ}$$

Teilchenpakete Teilchenenergie
Teilchen / Paket Ladung eines Protons

- **Energie der beiden Strahlen zusammen entspricht ...**

...der Energie um eine Tonne Kupfer zu schmelzen



...der Bewegungsenergie eines Flugzeugträgers bei 13 km/h



...der Bewegungsenergie des TGV bei 200 km/h



Maschinenschutzsystem im LHC

- **Maschinenschutz ist deswegen von höchster Bedeutung für den LHC!**
 - Unkontrollierter Teilchenverlust führt zur Zerstörung des Beschleunigers.
 - Spezielle Strahl- und Beschleunigerüberwachungssysteme.

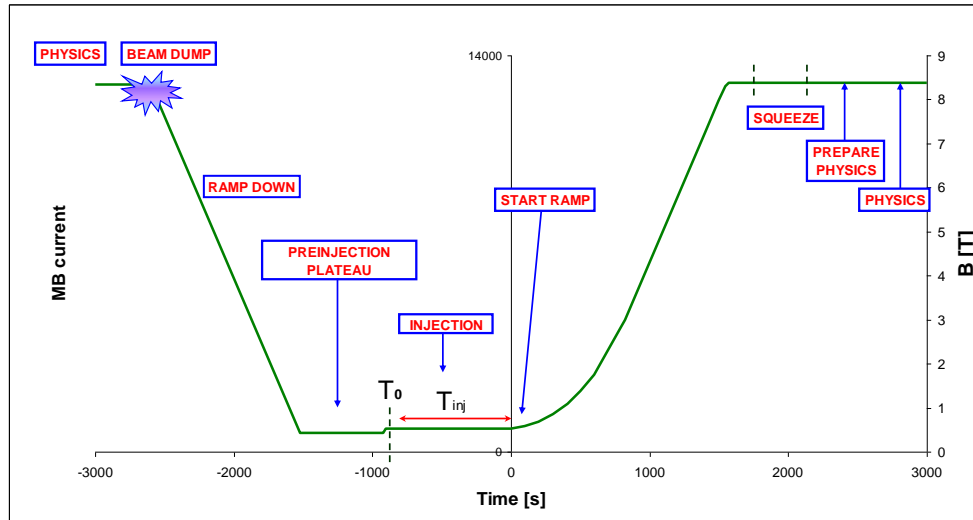


Geplanter Materialtest (Cu, 2mm)
72 (48) LHC Pakete, 450 GeV



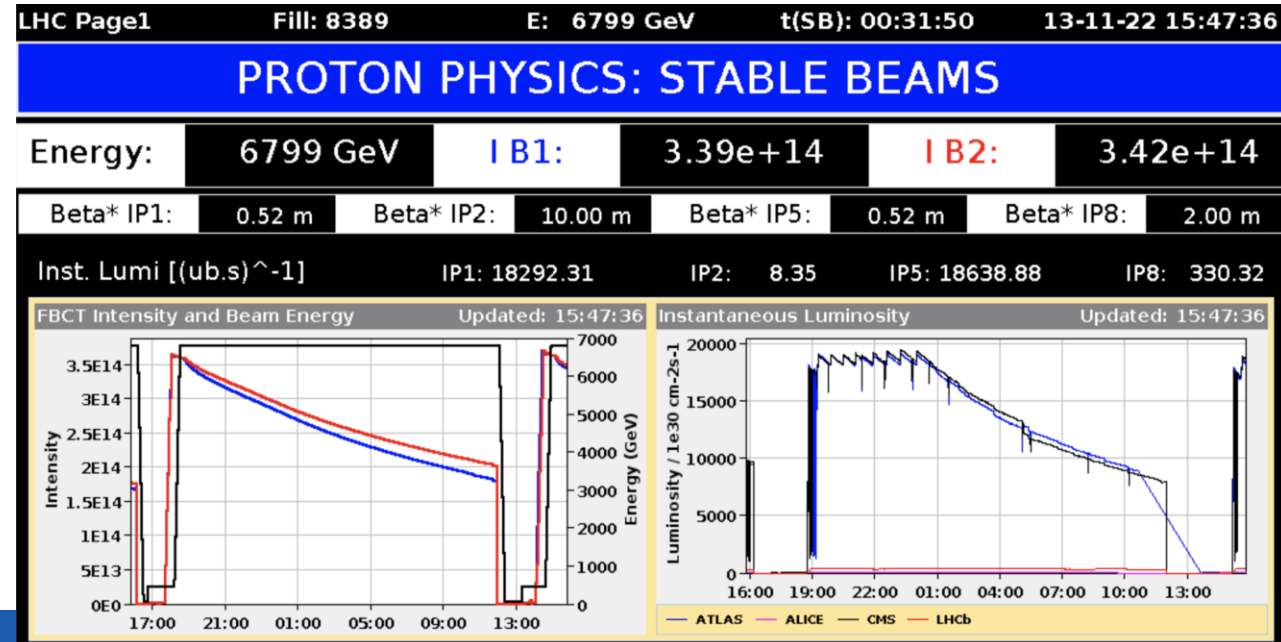
Nicht geplanter Materialtest (2004, SPS Extraktionsfehler, Stahl, 1.5mm)
288 LHC Pakete, 450 GeV: 25 cm Schnitt in Vakuumkammer, SPS Extraktionskanal.

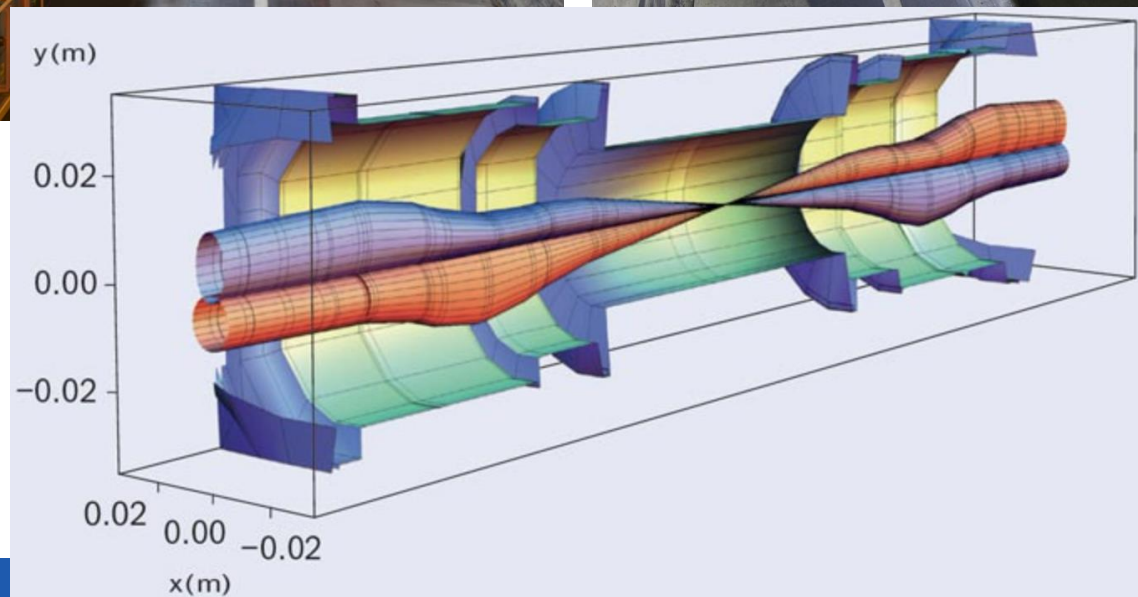
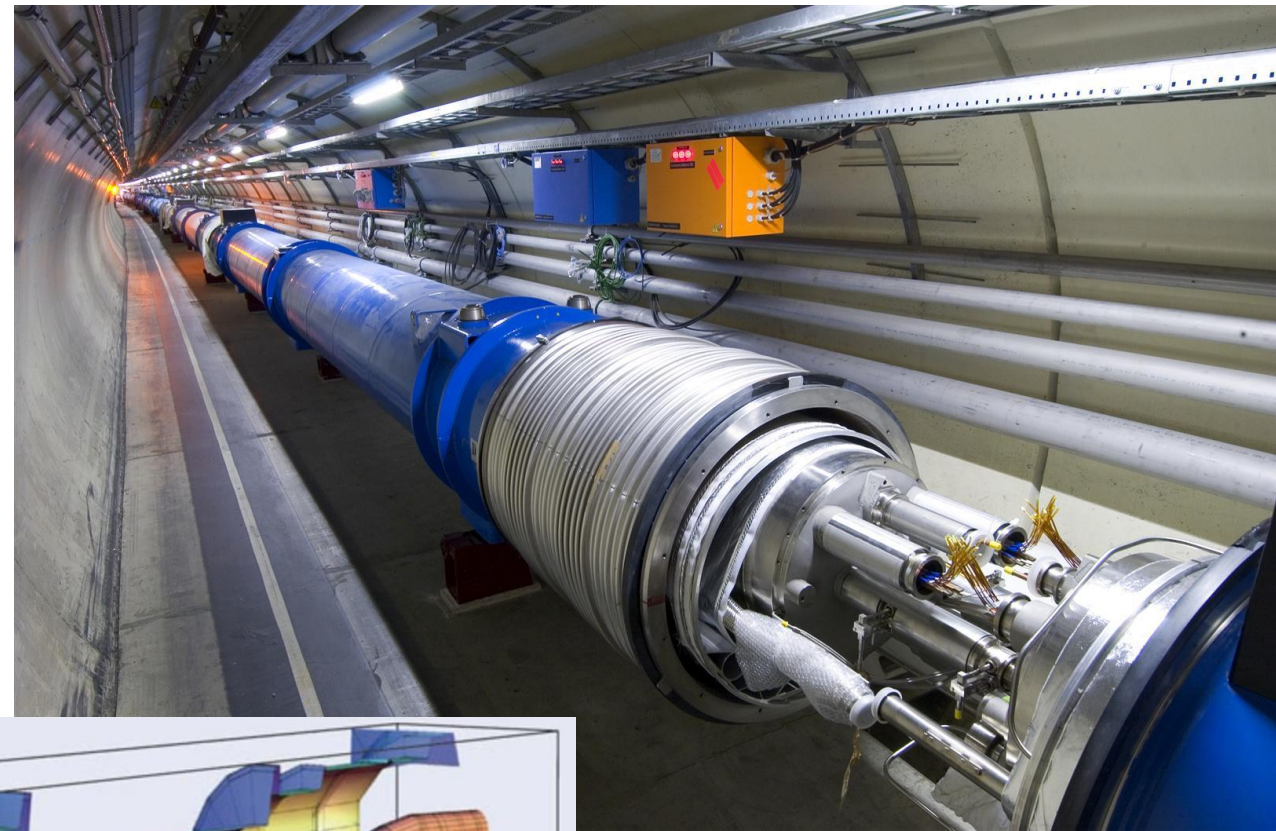
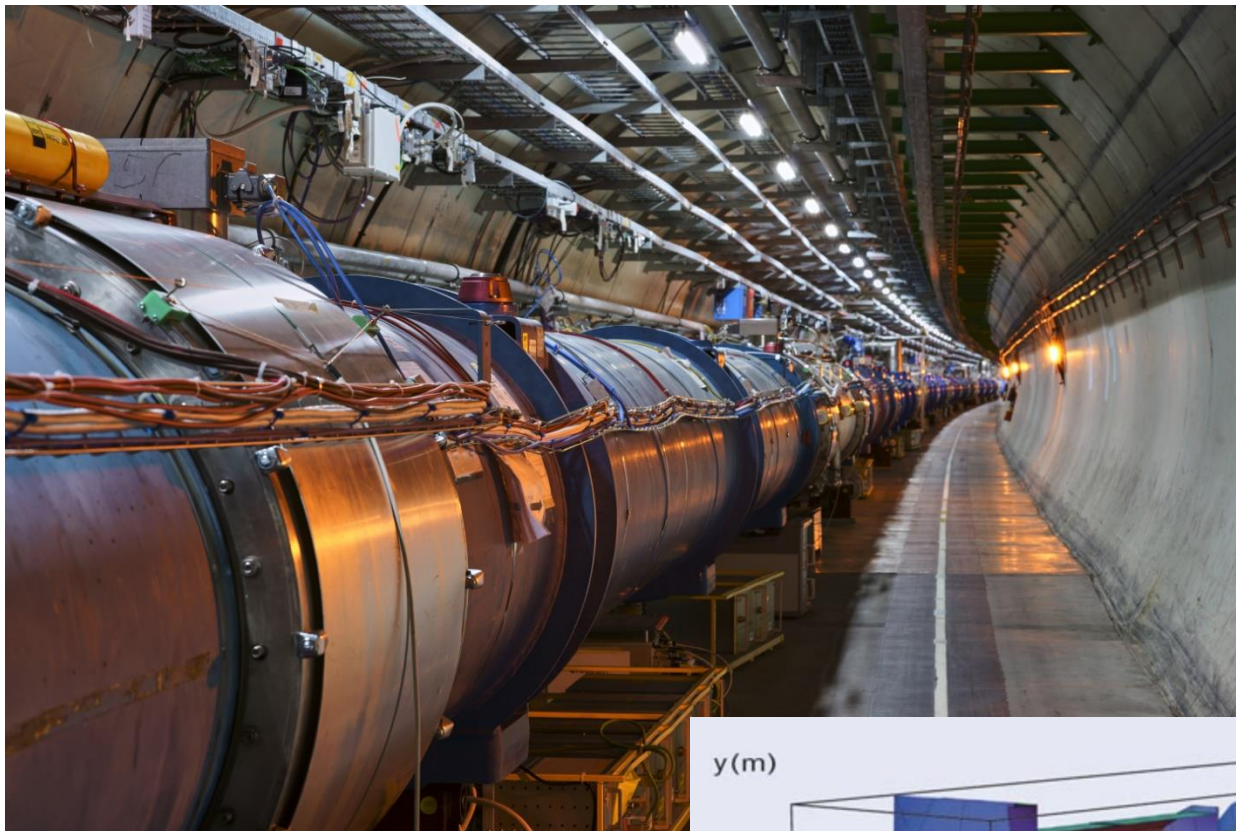
LHC Zyklus



Rampe negativ	≈ 20 Minuten
Vorinjektionsplateau	15 Minuten
Injektion	≈ 15 Minuten
Rampe	≈ 30 Minuten
Squeeze	< 5 Minuten
Vorbereitung Physik	≈ 10 Minuten
Physikmodus	10 - 20 Stunden

LHC vistar im CCC oder online

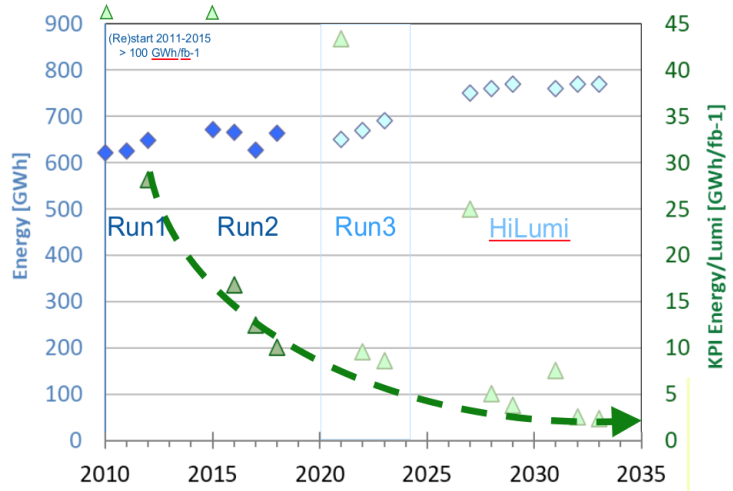




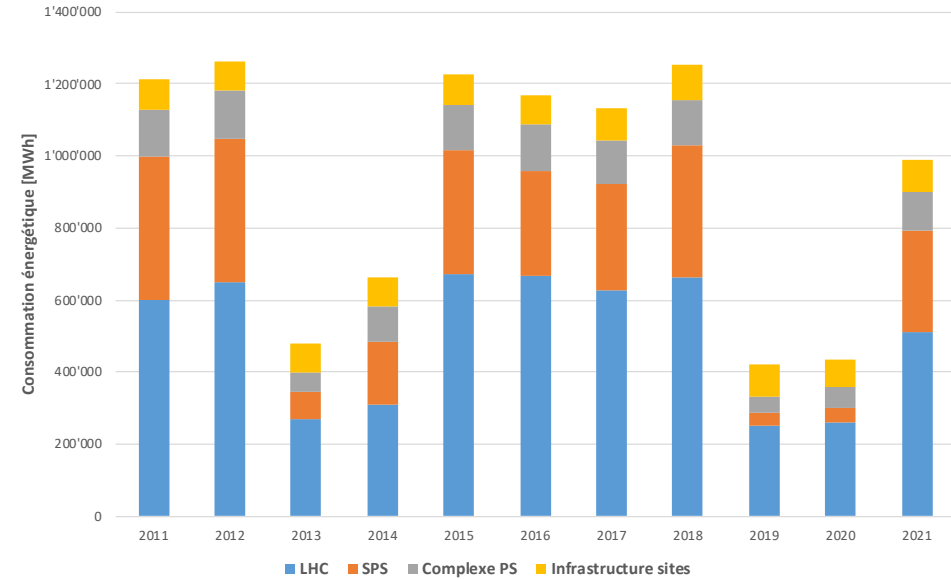
CERN Energiemanagement

• ISO 50001 Zertifizierung seit Ende 2022

- Kontinuierliche **Verbesserung der Energieeffizienz** durch Aufbau eines systematischen Energiemanagements basierend auf wesentlichen Kennzahlen (**KPIs**)
 - **Beispiel LHC:** Jährlicher Stromverbrauch pro integrierter Luminosität

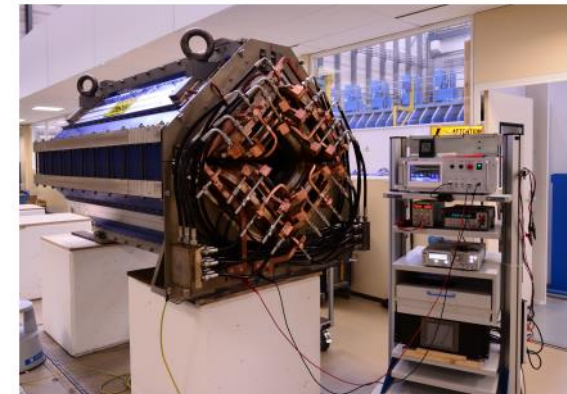


Consommation électrique du CERN sur la période 2011 à 2021



• Renovierung und Konsolidierung

- **DC zu gepulsten Magneten:** Beispiel **EAST Area**, 90% reduzierter Stromverbrauch durch modern Magnete, Stromversorgungen und Kontrollsysteme



Future Circular Colliders

Planning a research infrastructure for the 21st century



FUTURE
CIRCULAR
COLLIDER
Innovation Study



<http://cern.ch/fcc>



Work supported by the **European Commission** under the **HORIZON 2020** projects **EuroCirCol**, grant agreement 654305; **EASITrain**, grant agreement no. 764879; **ARIES**, grant agreement 730871, **FCCIS**, grant agreement 951754, and **E-JADE**, contract no. 645479



European
Commission

Horizon 2020
European Union funding
for Research & Innovation

photo: J. Wenninger

- The European Particle Physics Strategy Update 2020 issued the request for a feasibility study of the **FCC integrated programme** to be delivered for the next Strategy Update.
- The **FCC Feasibility Study** should inform about technical, territorial and financial feasibility of the FCC project and bring all elements needed to decide about a potential project.
- Strengthening links with **science, research & development**, high-tech **industry** and **society** at large will be essential to further advance and prepare the implementation of FCC as a long-term sustainable world-leading HEP research infrastructure for the 21st century to push the particle-physics precision and energy frontiers far beyond present limits.

OPEN QUESTIONS

Despite of impressive progress and discoveries in the past decades several fundamental question remain open:

Today 80 % of the mass of the universe is unknown.
What is the universe made of?

Is there only a single type of Higgs boson and does it behave exactly as predicted?

Why is the universe composed only of matter? Where has the anti-matter gone that was produced simultaneously in the big bang?

Why is the gravitation so much smaller than the other forces?
How to reconcile gravitation with quantum mechanics?

A Global FCC Collaboration

Increasing international collaboration as a prerequisite for success:
world-wide collaboration hosted by CERN

Links with science, research & development, high-tech industry and society at large will be essential to further advance and prepare the implementation of FCC as a long-term sustainable world-leading research infrastructure

147

Institutes

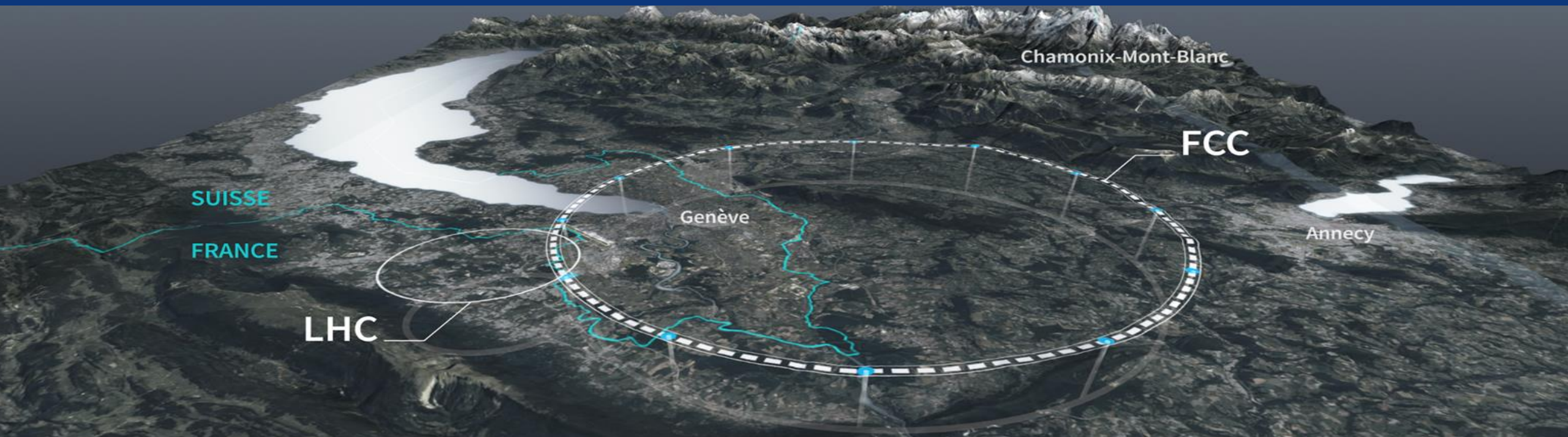
30

Companies

34

Countries





Increase mass of particles that could be produced and decreasing subatomic distances to be probed.

A new 91 km tunnel to host multiple colliders
100 – 300 m under ground
8 surface sites

FCC-ee: electron-positron @ 91, 160, 240, 365 GeV

FCC-hh: proton-proton @ 100 TeV, and heavy-ions (Pb) @ 39 TeV

FCC-eh: electron-proton @ 3.5 TeV

The FCC integrated program inspired by successful LEP – LHC programs at CERN

Comprehensive long-term program maximizing physics opportunities

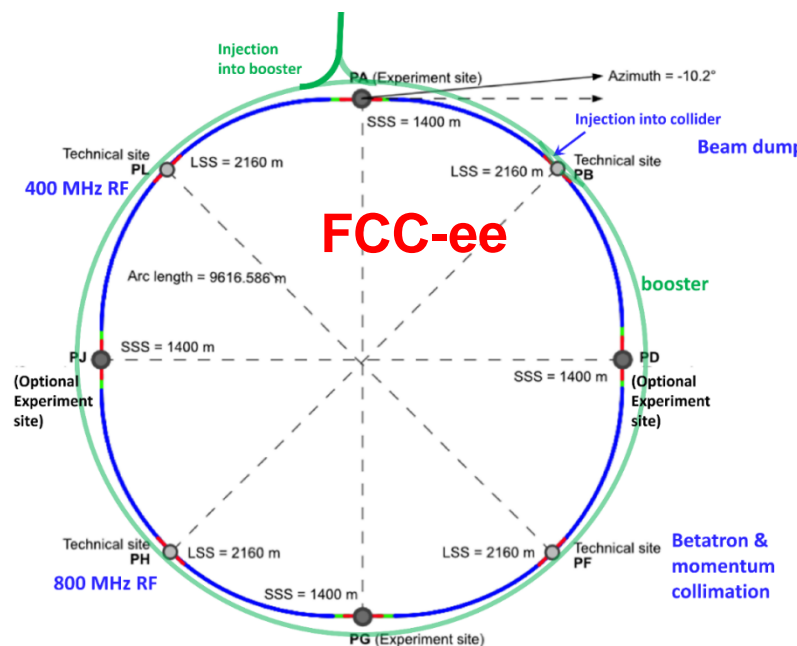
- common civil engineering and technical infrastructures, building on and reusing CERN's existing infrastructure

stage 1: FCC-ee: high-intensity electron-positron collider for detailed study of the Higgs boson (10^6), top-quark (10^6), W (10^8), Z (10^{12}) → indirect sensitivity to new physics up to ~ 70 TeV (> 10 times LHC)

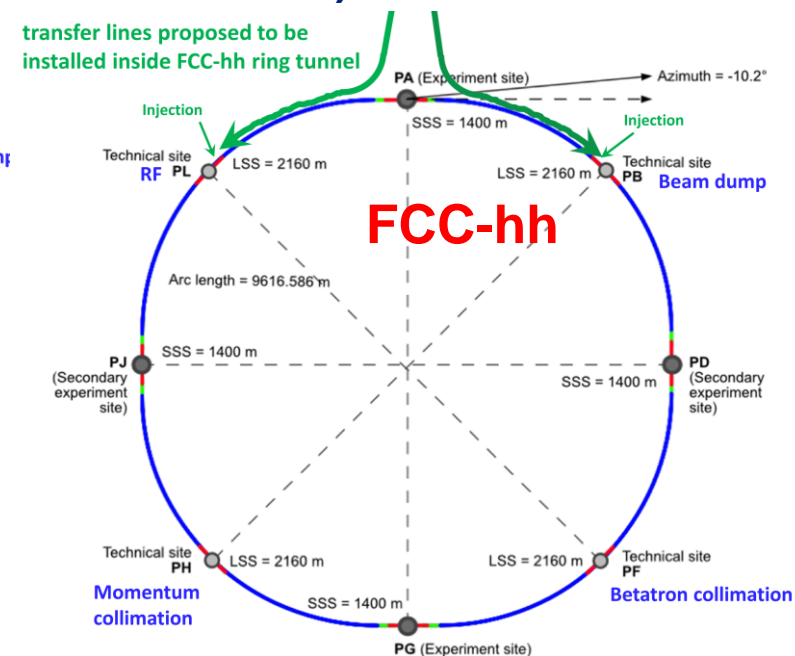
**stage 2: FCC-hh: proton-proton collider with collision energy of at least 100 TeV
→ direct discovery potential for new physics up to ~ 40 TeV (~ 10 times the LHC)**



2020 - 2040



2045 - 2060

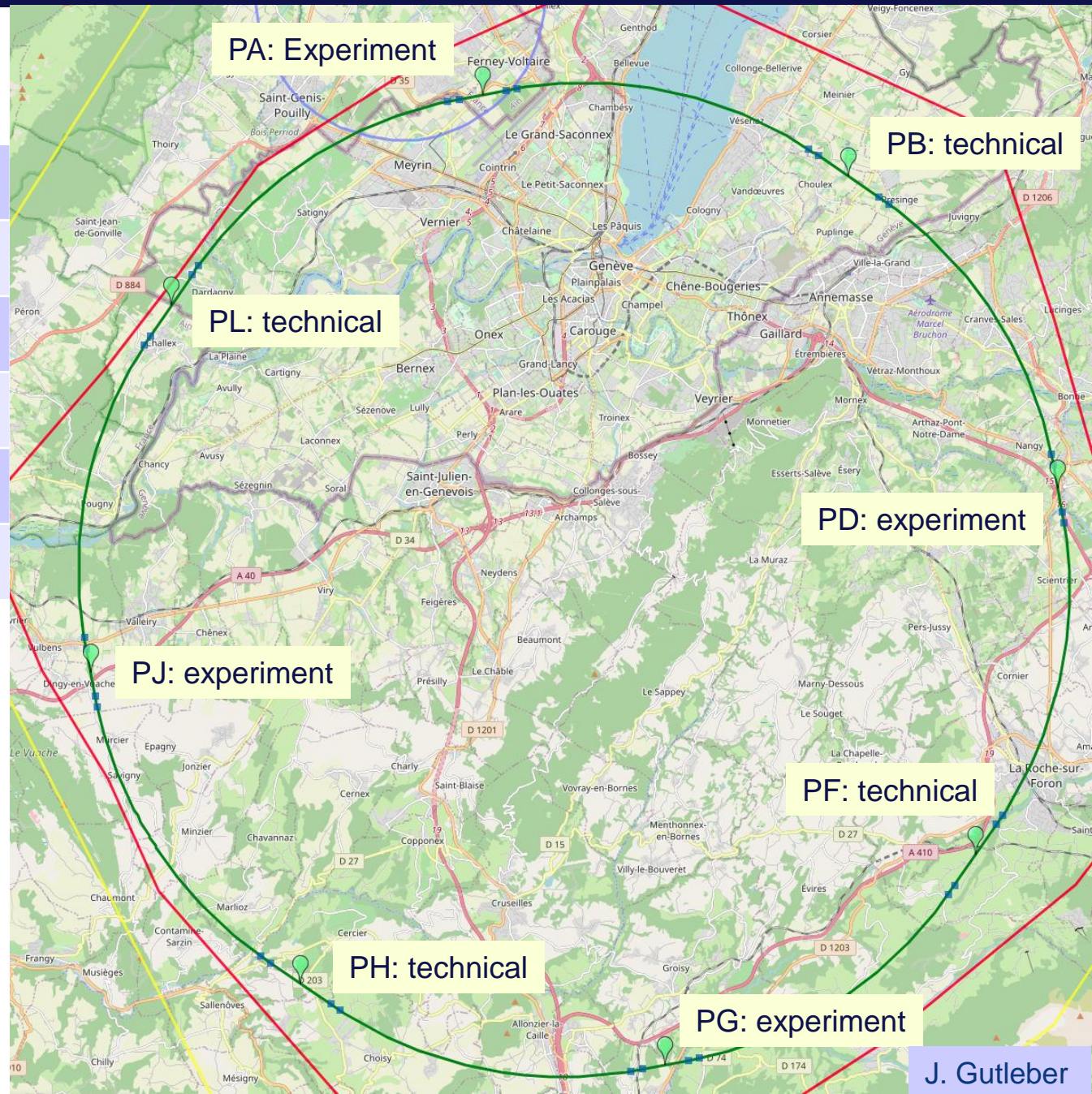


2070 - 2090++

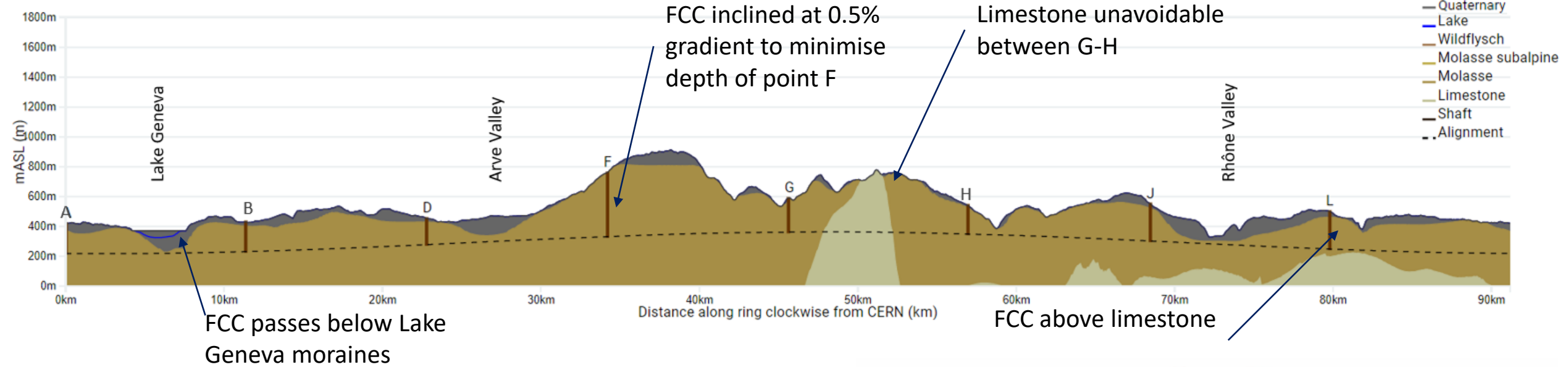
8-site baseline "PA31"

Number of surface sites	8
LSS@IP (PA, PD, PG, PJ)	1400 m
LSS@TECH (PB, PF, PH, PL)	2143 m
Arc length	9.6 km
Sum of arc lengths	76.9 m
Total circumference	91.1 km

- 8 surface sites <40 ha total land use
- Possibility for 4 experiment sites
- All sites close to road infrastructures (< 5 km of new road constructions required)
- Vicinity of several sites to 400 kV grid lines



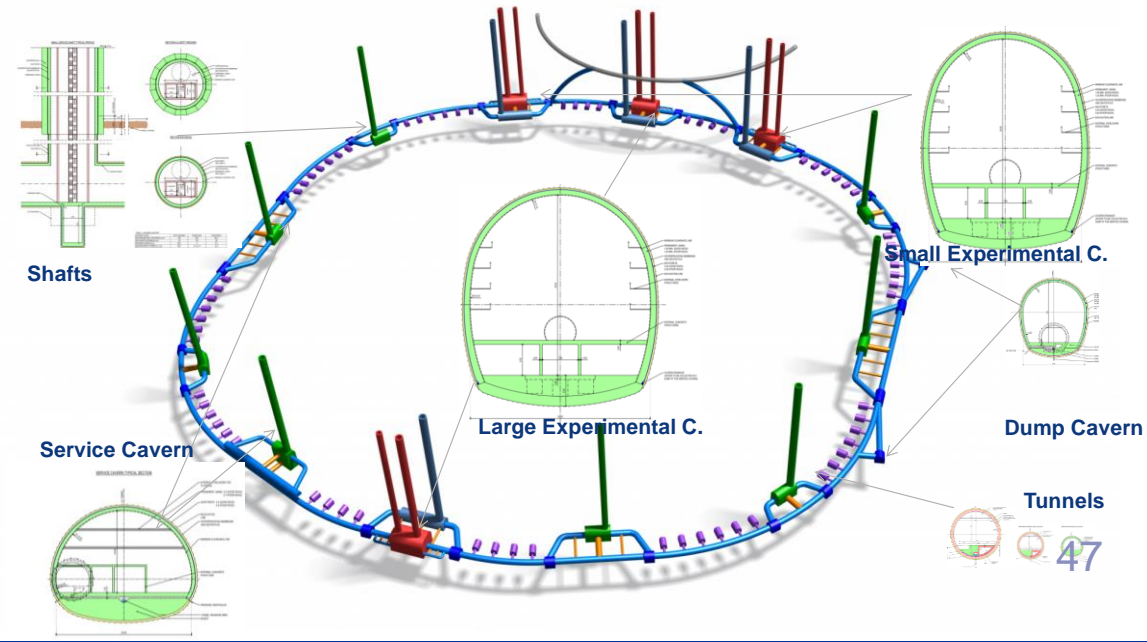
FCC tunnel - geological conditions



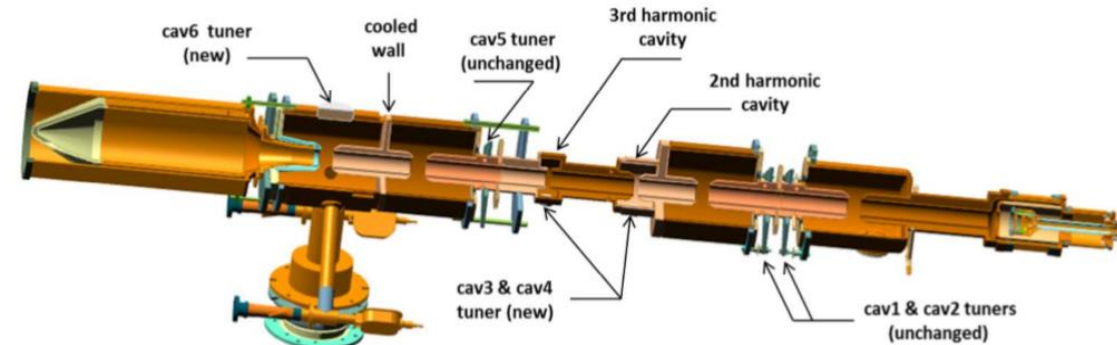
Tunneling mainly in moraine layer (soft rock), well suited for fast, low-risk tunnel boring machine (TBM) construction.

7 – 8 million m³ excavation material

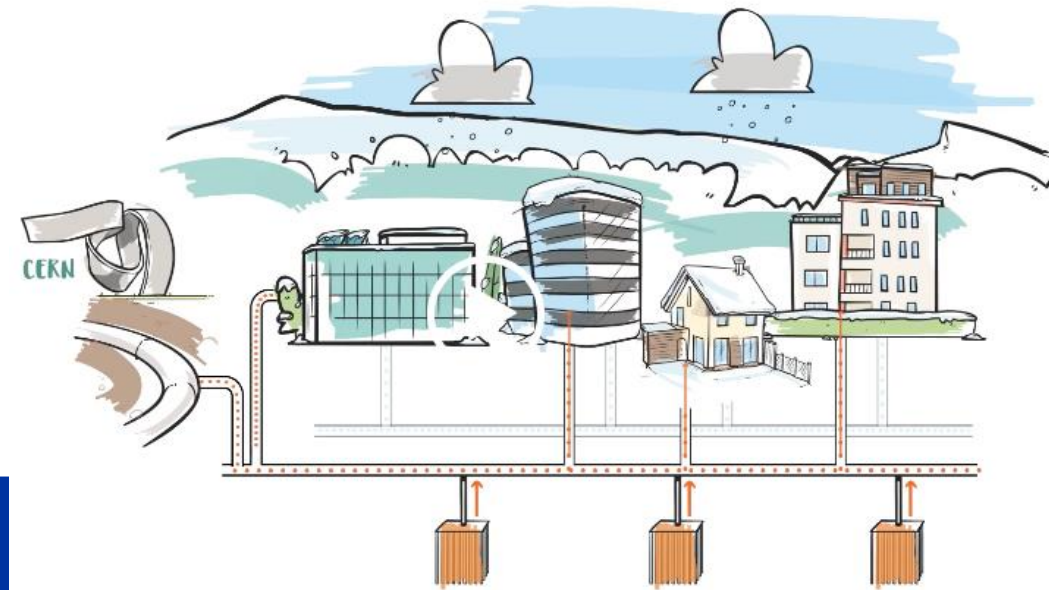
Site investigations campaign planned for 2024 – 2025: ~40-50 drillings, 100 km of seismic lines



- **Next generation facilities should meet high environmental standards and be energy efficient**
 - Needs to be addressed in all phases of the project (design, construction and operation)
- **Energy efficient technology - R&D with industry**
 - Radio-frequency power production efficiency
 - Efficiency of cryogenics plants, new coolants e.g. Helium, etc.
- **Optimisation of collider operation modes**
 - Adapt operation mode and energy consumption to the availability of electrical energy on the regional grid.
 - Source renewable power
- **Waste heat reuse (few 100 GWh/y potential)**
 - Identification of opportunities in the region,
 - Co-construction with local communes and regional industry. (LHC P8, 40 GWh/year).

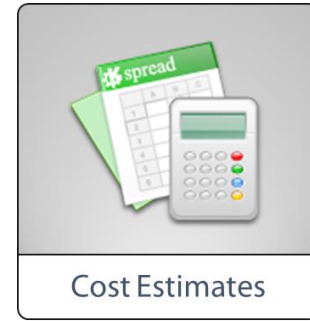
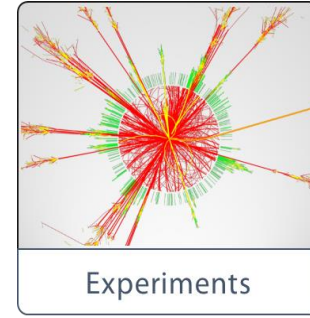
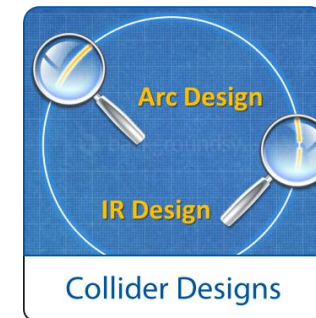
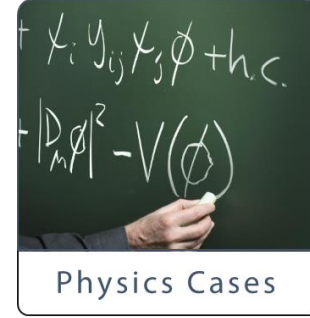
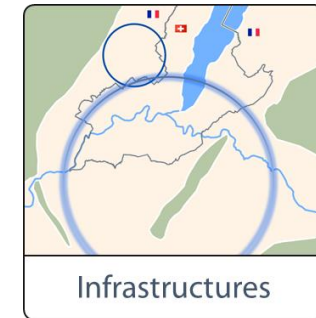


Parameter	present TH2167	CSM upgrade
Frequency [MHz]	400	
Beam voltage [kV]	54	
Saturated RF power [kW]	300	350
Efficiency [%]	60	70



High-level goals of the FCC Study

- together with the Host States, **optimisation of placement and layout of the ring**, and demonstration of the geological, technical, environmental and administrative feasibility of the tunnel and surface areas;
- **consolidation of the physics case** and detector concepts, optimisation of the **design of the colliders and their injector chains**, supported by targeted **R&D to develop the needed key technologies**;
- development of the technical infrastructure concepts and integration with territorial constraints and identification of opportunities for co-construction;
- elaboration of a **sustainable operational model for the colliders** and experiments in terms of human and financial resource needs, **environmental aspects and energy efficiency**;
- **identification of substantial resources** from outside CERN's budget for the implementation of the first stage of a possible future project;
- Final deliverable is a **Feasibility Study Report by end 2025**.





Danke fuer Ihre Aufmerksamkeit!

Fragen?