

# **Teilchenbeschleuniger**

-

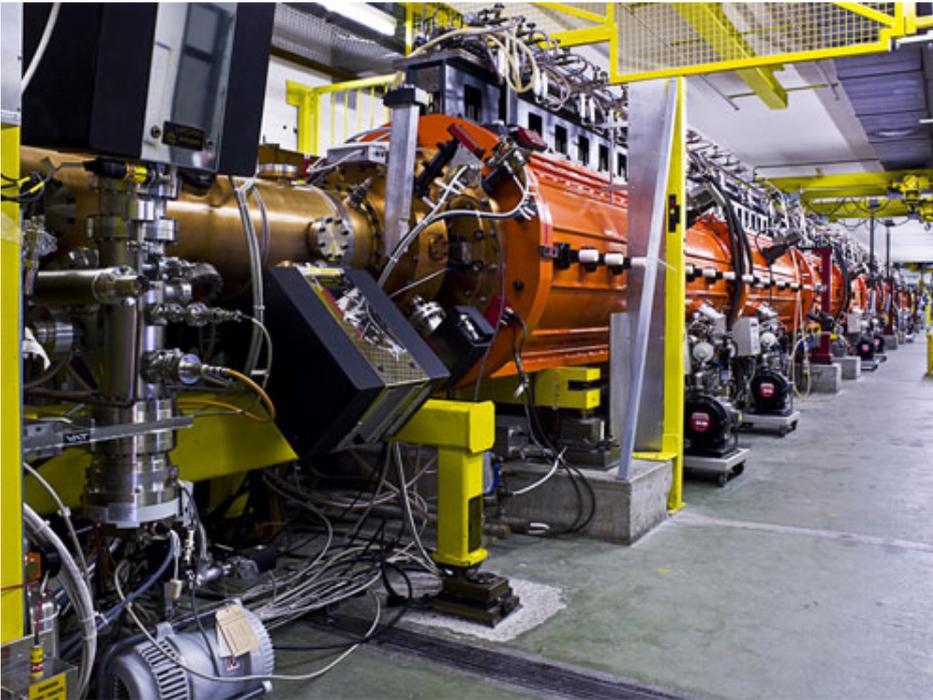
## **Österreichisches Lehrerprogramm**

Jürgen Pfingstner

24. Nov. 2014

Vielen Dank für die vielen “geliehenen” Folien und Graphiken bei  
M. Benedikt und dem Internet!

# Inhalt



- A. Einführung in Teilchenbeschleuniger
- B. Anwendungen von Teilchenbeschleuniger
- C. Teilchenbeschleuniger am CERN
- D. MedAustron

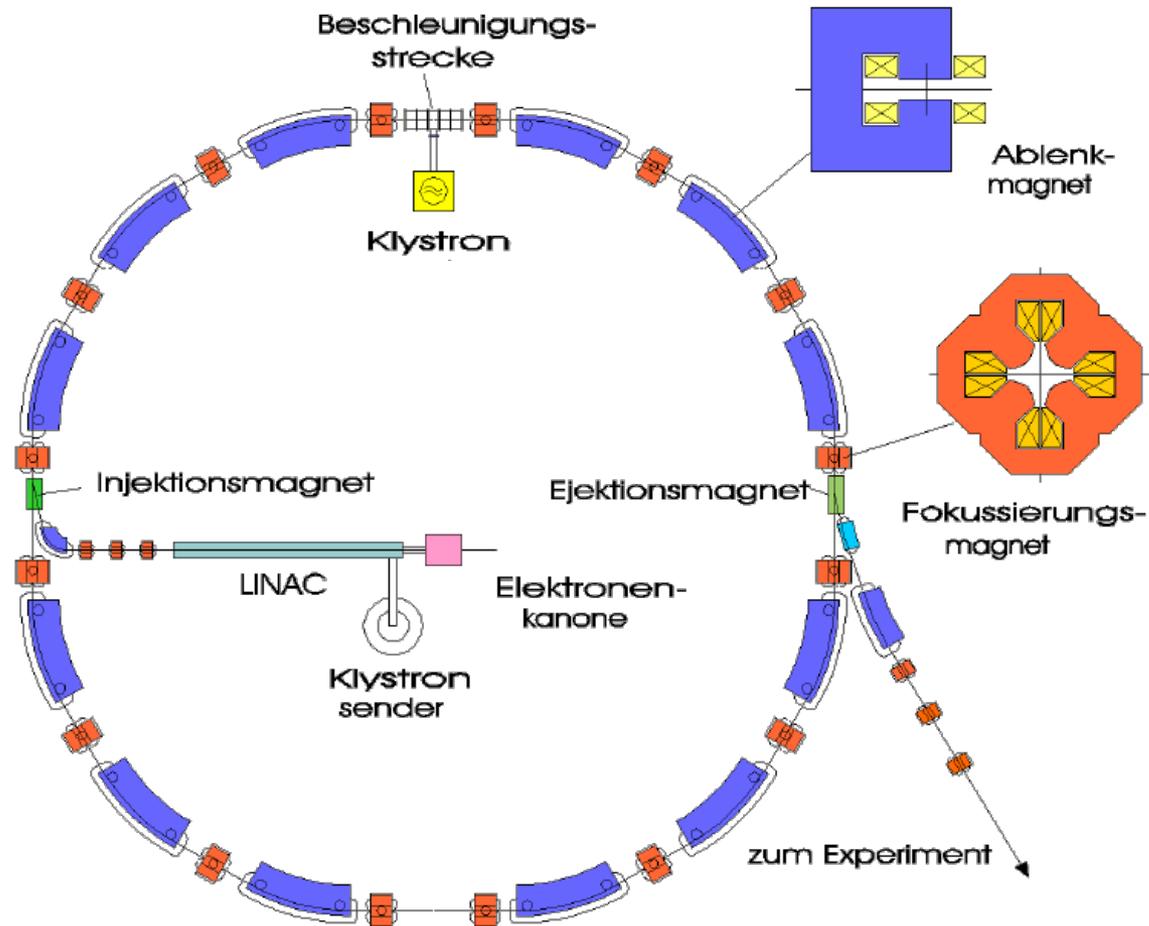
# **A. Einführung in Teilchenbeschleuniger**

# Überblick Teilchenbeschleuniger

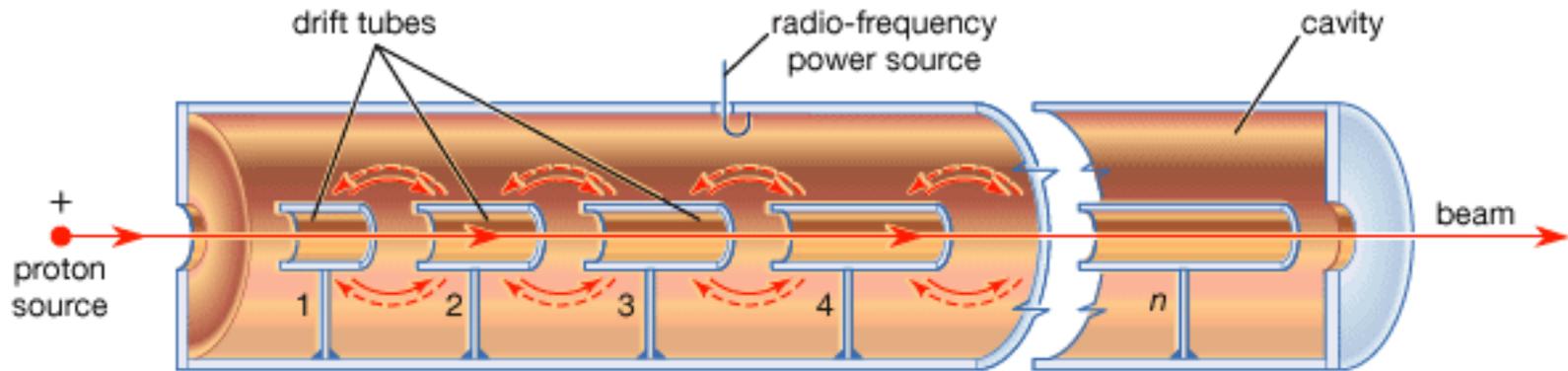
- **Zweck:** Maschinen zur Beschleunigung von Teilchenstrahlen
- **Einsatz** der Teilchenstrahlen:
  - Industrielle Anwendungen
  - Medizinische Anwendungen
  - Hilfssysteme für Kern- und Fusionsreaktoren
  - Forschungsinstrument (vielfältige Anwendung)
- **Energiebereich:**
  - Angabe in Elektronvolt: Energie eines Elektron das mit 1 Volt beschleunigt wurde
  - Man kann direkt die integrierte Beschleunigungsspannung ablesen
  - Von einigen KeV ( $10^3$  V) bis 7 TeV ( $7 \times 10^{12}$  V) am LHC am CERN
- **Beschleunigte Teilchenarten:**
  - Elektronen und Positronen (Leptonen)
  - Protonen (Hadronen)
  - Ionen
  - Pläne für Myonen (schwere Leptonen)



# Bausteine eines Beschleunigers

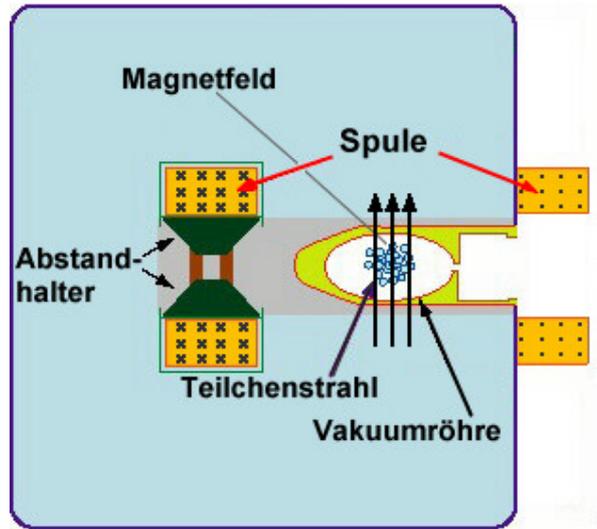


# Beschleunigung mit Wechselspannung



- Zu beschleunigende Teilchen haben elektrische **Ladung**.
- Sie können durch ein **elektrisches Feld beschleunigt** werden.
- Gleichspannungsquellen sind aber auf ca. 1MV begrenzt.
- Darum verwendet man **Wechselspannung**.
- Prinzip: Teilchen darf nur eine Halbwelle der Spannung ausgesetzt sein.
- Beispiel: Driftröhren-Beschleunigung in Linacs.
- Ähnliches Prinzip in Synchrotrons.

# Strahlenlenkung: Dipolmagnet

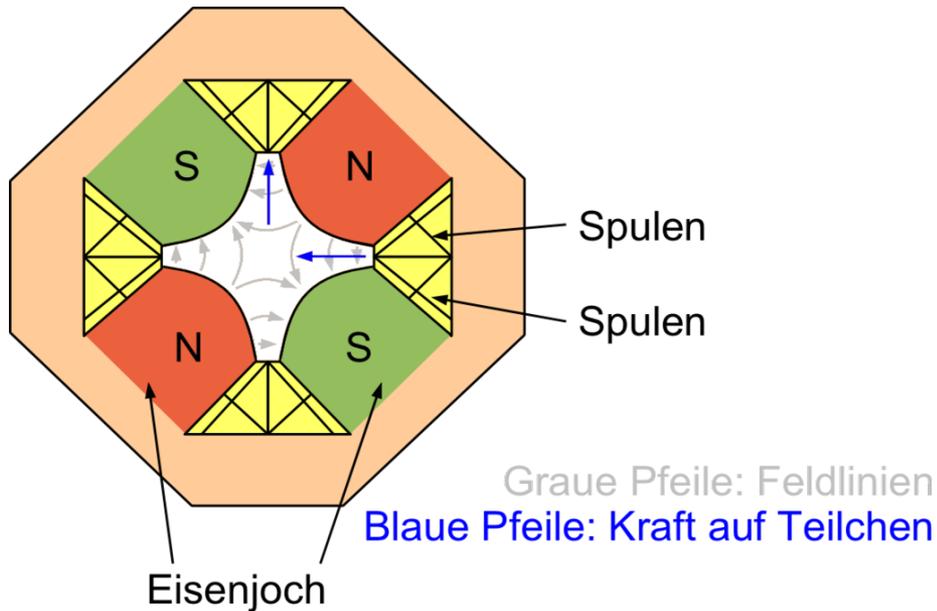


- Magnetfeld dient zur Ablenkung um Teilchen auf Kreisbahn zu halten.
- Rechte Hand Regel.
- Bewegungsgleichung (Newton & Lorentzkraft):

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = \vec{F} = e\vec{v} \times \vec{B}$$

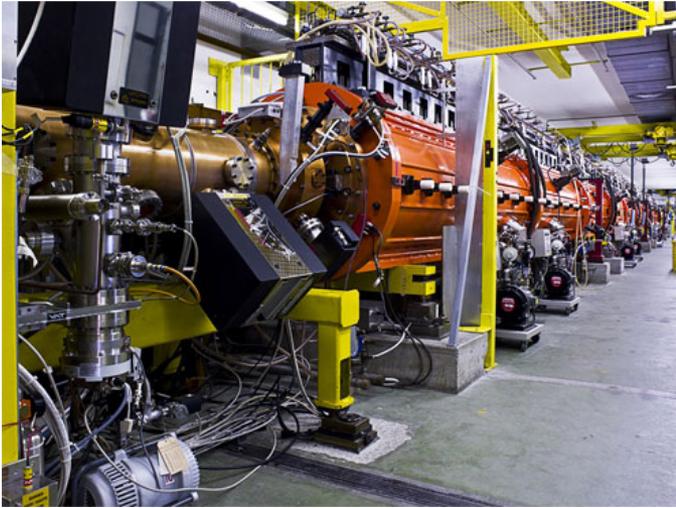
- Bei gegebenen Feld und Teilchenenergie lässt sich Ablenkwinkel berechnen.
- Normalleitende Magnete bis 1-2 Tesla.
- Supraleitende Magnete bis 8 Tesla.

# Strahlfokussierung: Quadrupolmagnet



- Teilchen eines Strahls haben Gaußsche Winkelverteilung.
- Größe des Strahls würde ständig anwachsen (Schrotgeschoss).
- Fokussierung ist notwendig um Strahlgröße zu kontrollieren.
- Quadrupolmagnet fokussiert in einer Dimension defokussiert aber in der anderen (prüfe mit der Rechten-Hand Regel).
- Geschicktes Aneinanderreihen mehrere Quadrupole schafft Fokussierung in beiden Dimensionen.

# Lineare und zirkuläre Beschleuniger: Linac und (meist) Synchrotron

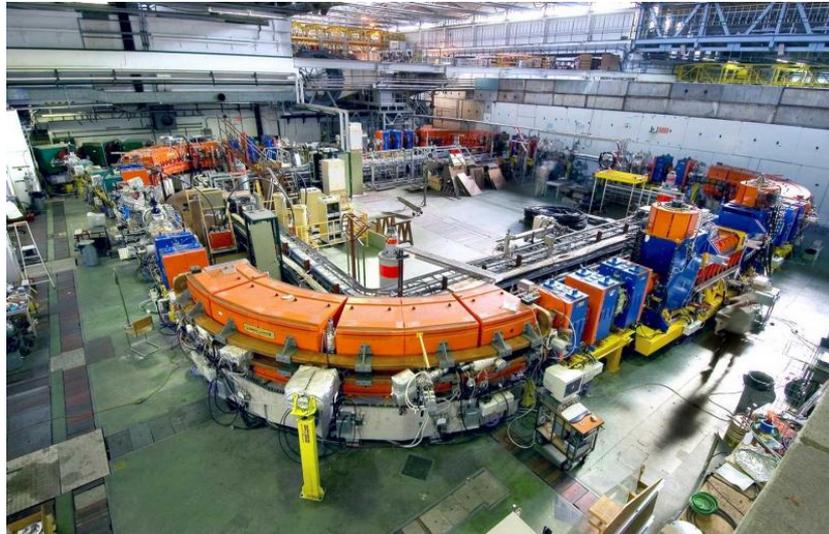


## Vorteile:

- Kaum Ablenkung notwendig
- Kaum Synchrotronstrahlung

## Nachteile:

- Sehr starke Beschleunigung notwendig
- Niedrige Energieeffizienz



## Vorteile:

- Beschleunigung ist einfacher
- Höhere Energieeffizienz

## Nachteile:

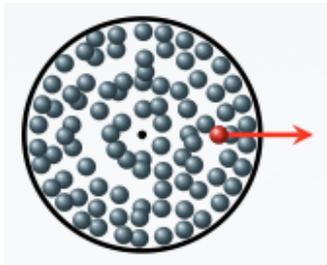
- Ablenkung ist aufwendig
- Synchrotronstrahlung speziell für Leptonen

# Aufgaben der Beschleunigerphysik

1. **Optik:** Entwurf von Konfigurationen von **Magneten** und Beschleunigungskavitäten zur gewünschten **Strahlenkung und Fokussierung**.

2. **Kollektive Effekte:** Abschätzung von Effekten von **Feldern** die durch den **Strahl** selbst oder **parasitäre Ladungsträger** erzeugt werden:

- Raumladungsfelder
- Kiefelder
- Elektronenwolke
- Restgas-Ionisation, u.a.



3. **Imperfektionen:** Abschätzung des Einflusses von **nicht perfekten Elementen**:

- Nichtlineare Feldkomponenten
- Mechanische Bauteilverschiebung, u.a.

4. **R&D:** Entwicklung von Konzepten für neuartige Problemstellungen.

## Strahldynamik:

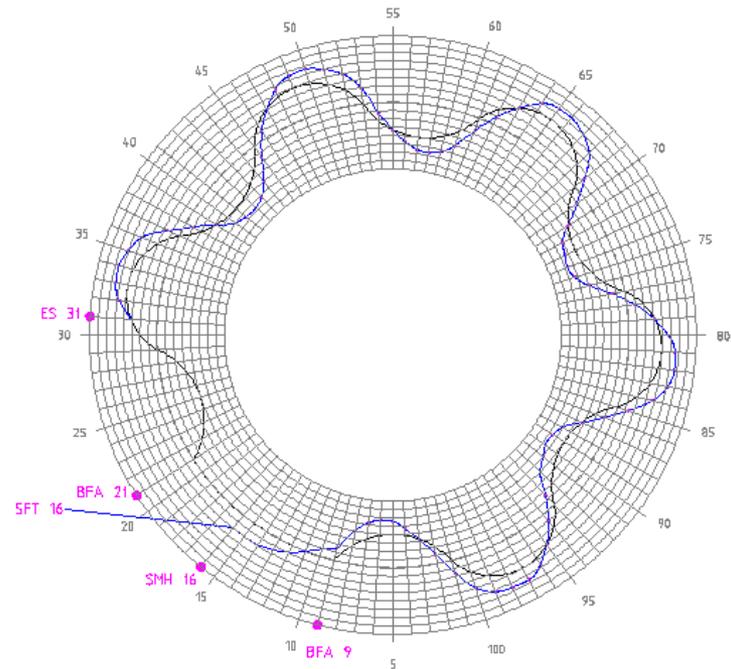
- Basis für alle Aufgaben der Beschleunigerphysik.
- Beschreibung/Berechnung der Bewegungen von Teilchen und Strahlen im Beschleuniger.

# Das Handwerkszeug: Teilchendynamik

- Beschreibung/Berechnung der Bewegung einzelner Teilchen oder des gesamten Strahls im Beschleuniger.
- Basisgleichung:

$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = \vec{F}_L = e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

- Durch komplizierte Felder und kreisförmiges Bezugssystem aber kompliziert.
- Lösung in erster Näherung:  
Schwingungen (Fokussierung) um die Referenzbahn (Ablenkung).
- Lösung für weitere wichtige Fälle mit Störungstheorie.

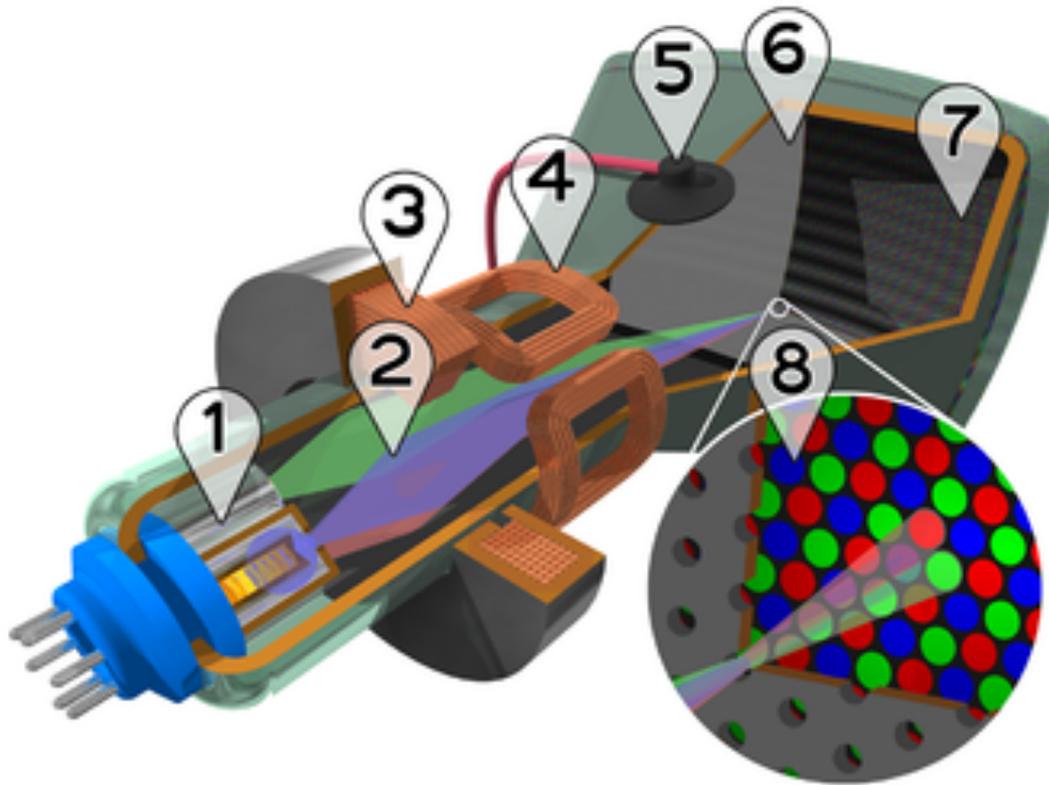


Strahltrajektorie im PS Beschleuniger

- Vollständige Behandlung mit Computersimulationen.
- Nicht in diesem Vortrag behandelt.

# **B. Anwendungen von Teilchenbeschleunigern**

# Ein vertrauter Linac: Röhrenbildschirm

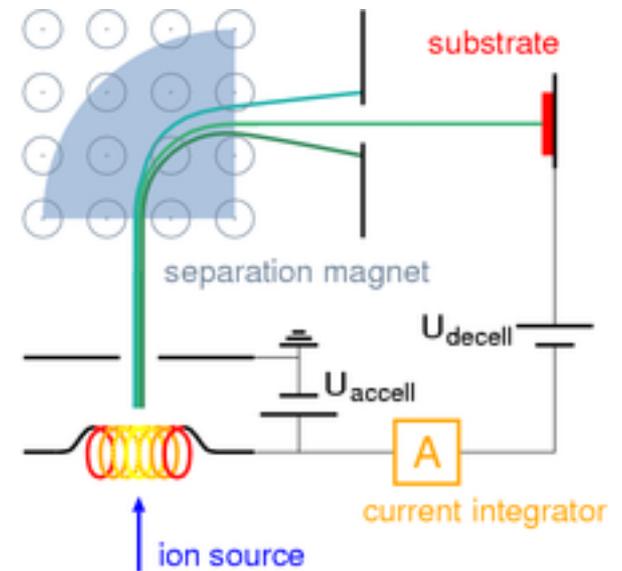


1. Thermische Elektronenquelle
2. Elektronenstrahl
3. Fokussierung
4. Strahlablenkung
5. Beschleunigung (hier durch Gleichspannung)

- Jeweils ein Linac für eine der drei Farben
- Beschleunigungsspannung: 25KV
- Elektronenenergie: 25KeV (280 Millionen mal größer im LHC)

# Industrielle Anwendungen (Auswahl)

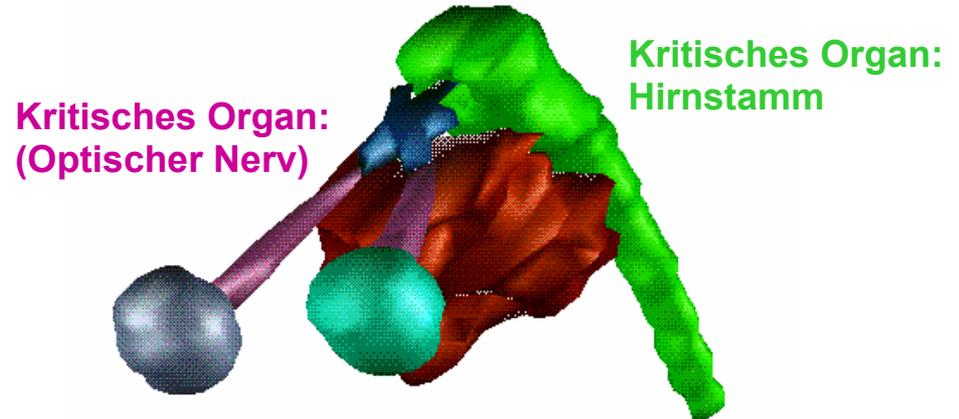
- **Ionenimplantation Halbleitern** (>10000 Maschinen)
- **Verbesserung von Materialeigenschaften** (2000 Maschinen):
  - Durch Anregung und Ionisation entsteht kurzzeitig eine höhere chemische Aktivität (Materialumformung)
  - Kunststoffe, Lacke, Holz, Textilien
- **Sterilisation** (500000 Tonnen pro Jahr):
  - Nahrung: verbesserte Haltbarkeit, keine chemischen Zusätze oder Erhitzung.
  - In Österreich nur getrocknete Kräuter und Gewürze
  - Medizinische Produkte



# Medizinische Anwendung: Radiotherapie

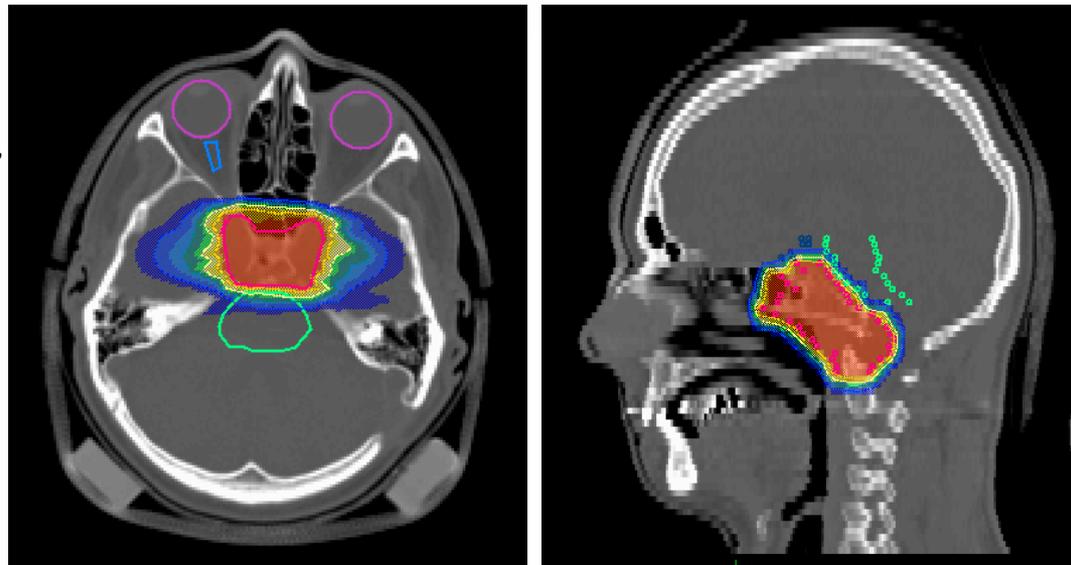
- **Ziel**

- Abgabe einer hohen Strahlendosis ans Zielvolumen, um Tumorzellen abzutöten.
- Schonung des gesunden Gewebes und kritischer Organe.
- Dosisverteilung an den Tumor angepasst.



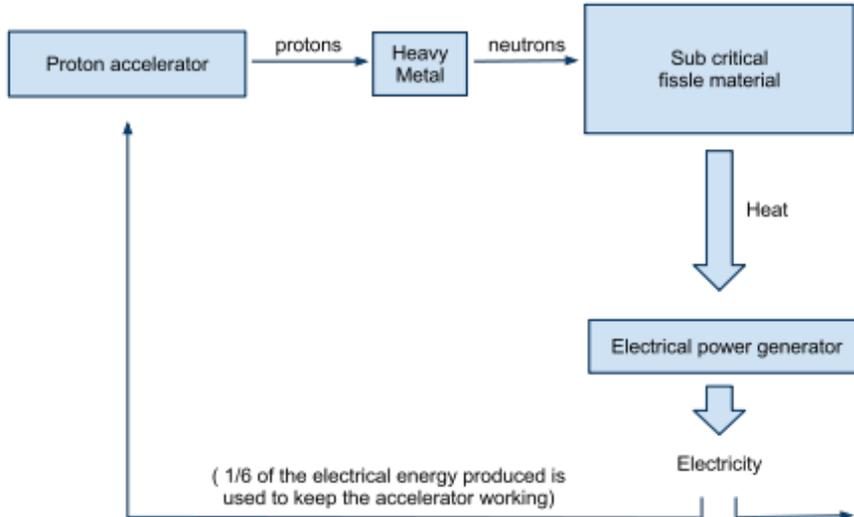
- **Strahlenarten**

- Konventionelle Therapie: Photonen, Elektronen (>10000 Beschleuniger)
- Hadrontherapie: Protonen, leichte Ionen
- **Erzeugung und/oder Beschleunigung mittels Teilchenbeschleunigern**



# Teilchenbeschleuniger und Kernenergie

## Accelerator Driven Reactor



- Reaktor wird subkritisch betrieben
  - Nur durch zusätzliche Neutronenquelle kritisch (Energieerzeugung).
  - Neutronen werden durch Protonenstrahl sehr hoher Leistung erzeugt.
  - Bei Ausfall der Anlage wird der Reaktor subkritisch und keine Kettenreaktion kann stattfinden.
  - Thorium als Brennstoff .
- 
- Sehr interessantes Konzept mit nur wenig aktueller Forschungsaktivität.
  - Vielen andere Anwendung von Beschleunigern in der Energieerzeugung: Umwandlung atomaren Abfalls, Plasmaheizung für Kernfusion.

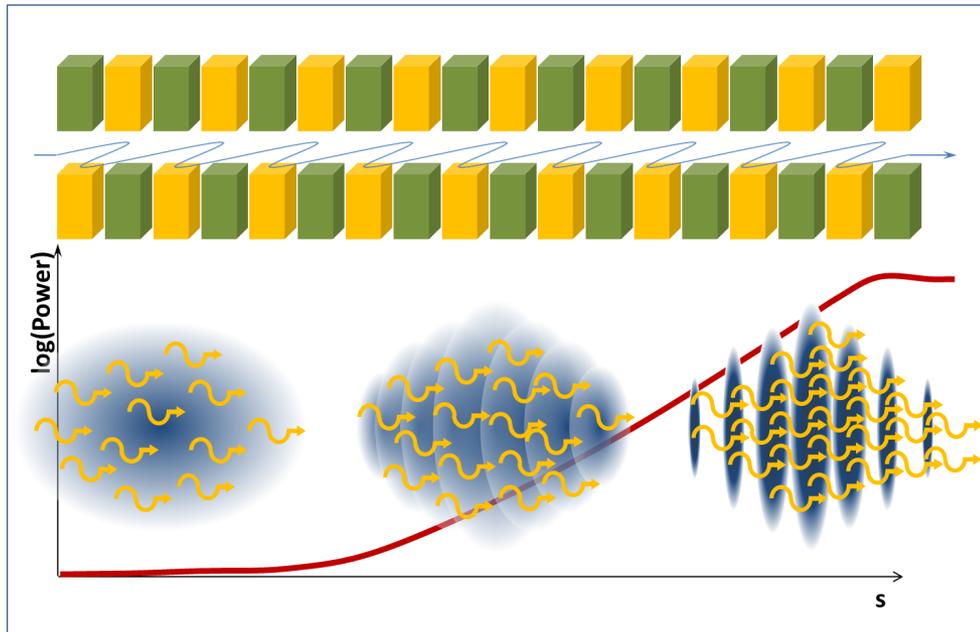
# Quellen von Röntgenstrahlen

- Beschleunigte Elektronen EM-Strahlung (siehe Antenne)
- Durch hohe Elektronenenergie in Synchrotrons reicht diese Strahlung bis in den Röntgenbereich (Synchrotronstrahlung)
- Die extrem hohe Intensität dieser Strahlen wird für Experimente genutzt
- Weltweit ca. 50 speziell entworfene Synchrotrons



Soleil in Paris: Anlage und schematischer Aufbau

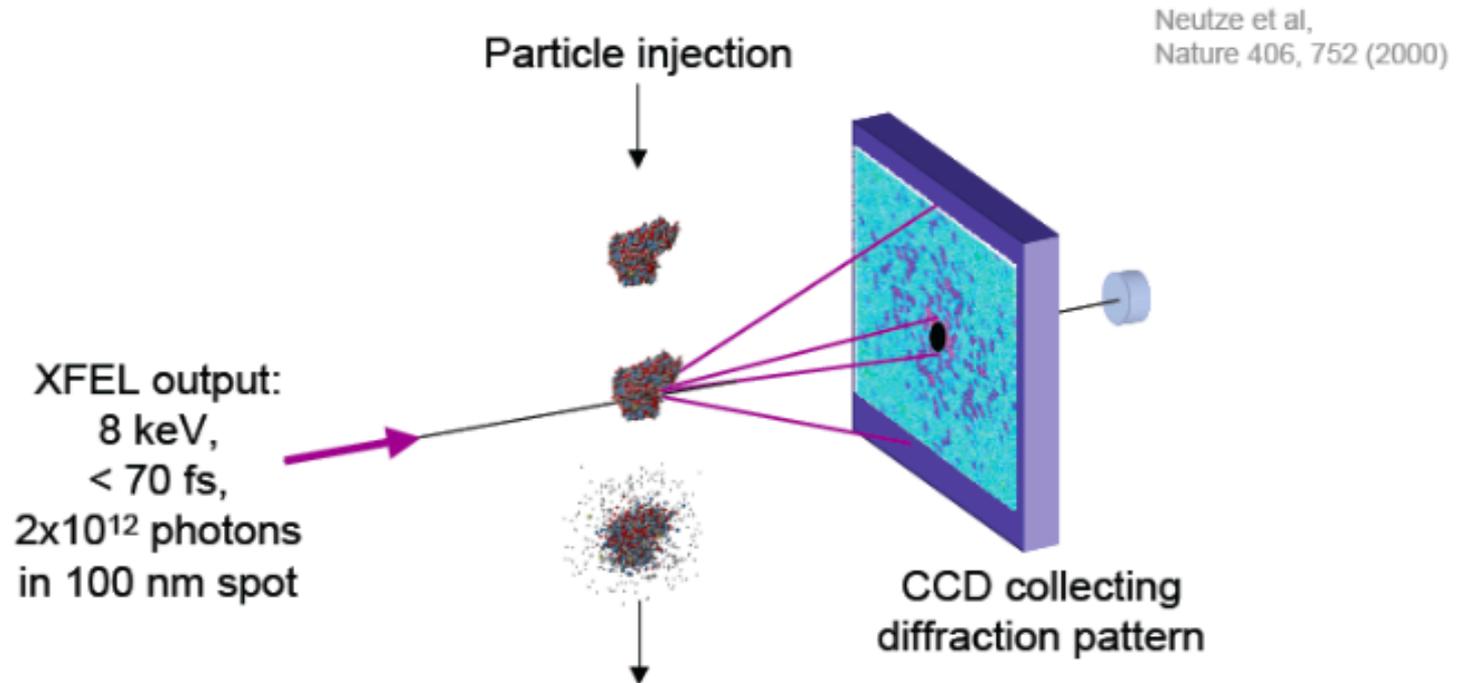
# Frei-Elektronen Laser (FEL)



Undulatorprinzip und Microbunch-Entwicklung

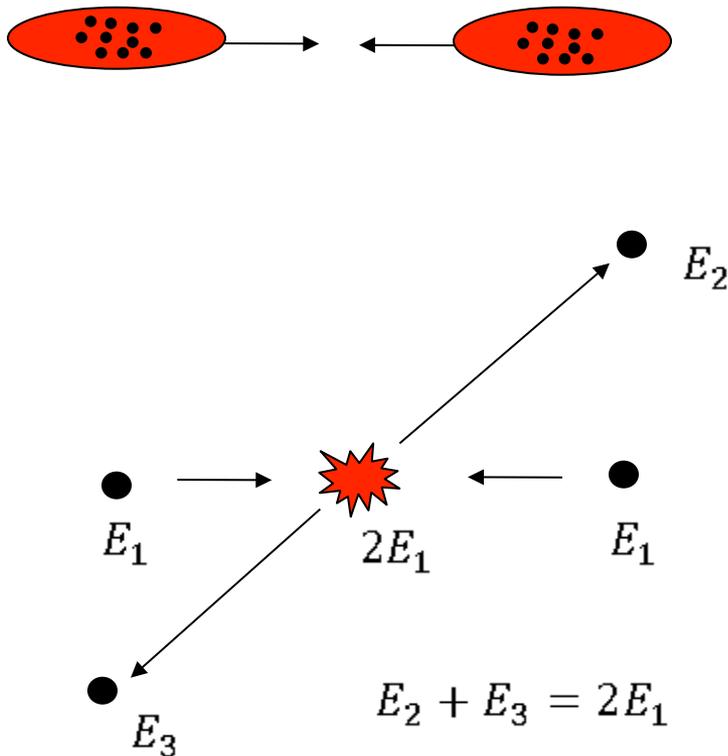
- Basiert auf Linac und anschließendem Undulator.
- Teilchenbewegen sich auf sinus-Bahn.
- Durch Interaktion der Teilchen mit den produzierten Photonen bilden sich Teilchenpakete.
- Dadurch strahlen alle Teilchen kohärent.
- $10^{10}$  höhere Röntgenstrahlintensität als Synchrotrons.
- Erst 4 FELs im Einsatz; hohes aktuelles Interesse.

# Experimente mit Synchrotronstrahlung



- Durch kurze Wellenlänge der Röntgenstrahlung sind kleinere Strukturen auflösbar
- Bilder von kleinsten biologischen Strukturen: Zellen, Proteinen
- Synchrotron-Röntgenquellen: Mittelung über länger Zeit notwendig
- FELs: Fast Ein-Pulse-Bildgebung ermöglicht die Dynamik von Molekülen zu studieren.

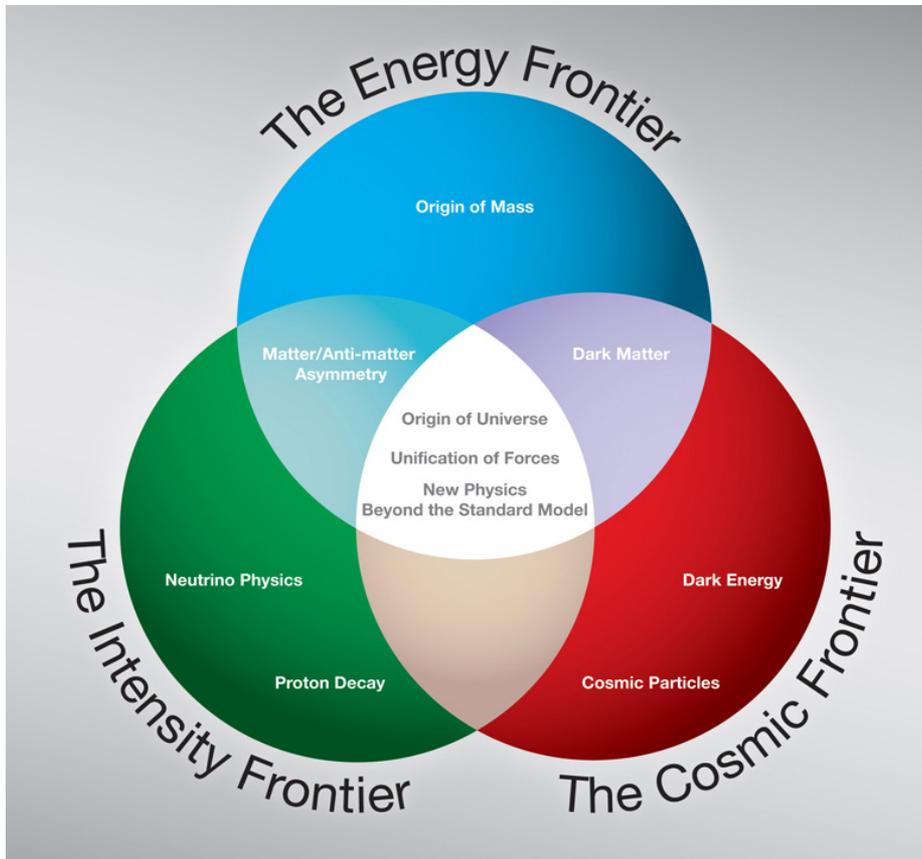
# Hochenergiephysik mittels Teilchenkollisionen



- **Teilchen** wie  $e^-/e^+$  oder  $p^+$  werden zu Teilchenstrahlen gebündelt ( $\sim 10^{11}$  Einzelteilchen) und miteinander **kollidiert**.
- Nur sehr wenige individuelle Teilchen der zwei Teilchenstrahlen “treffen” sich.
- Kurzlebiges Zwischenteilchen entsteht
- Dieses **zerfällt in andere Teilchen** für welche Erhaltungssätze erfüllt sein müssen (Energie, Moment, Spin, ...)
- Aus leichten Teilchen können so **exotische, instabile Teilchen, mit hoher Masse produziert werden**.

- Je höher die **Teilchenenergie** desto exotischere Teilchen werden erzeugt
- Je höher die **Strahldichte** desto mehr dieser Teilchen werden erzeugt

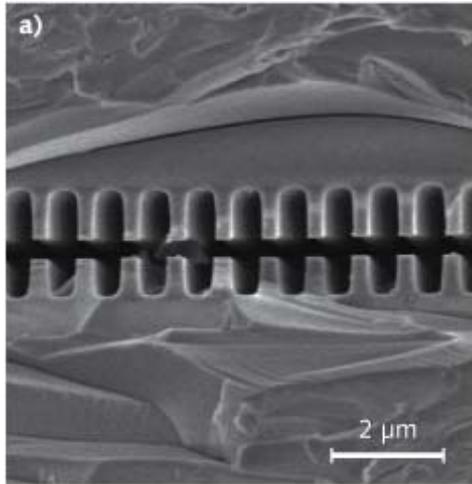
# Hochintensitätsphysik



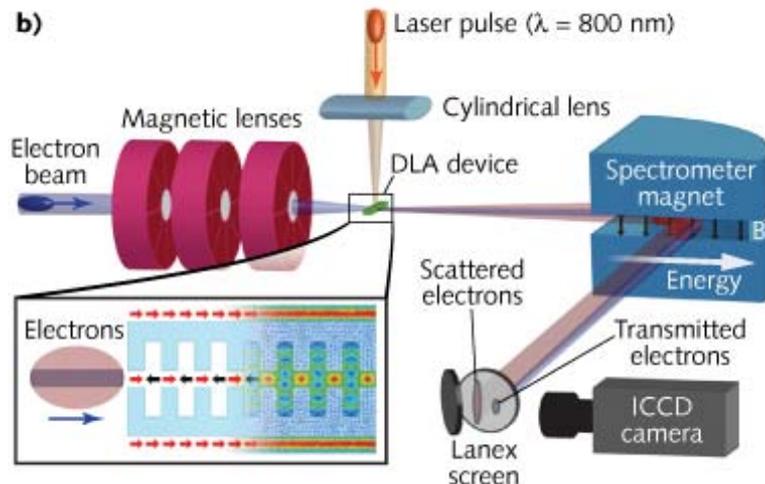
Forschungsmethoden in der Teilchenphysik

- Untersuchung von extrem seltenen Phänomenen (niedriger Wirkungsquerschnitt)
- Für Statistik werden sehr viele Teilchen gebraucht
- Energieanforderungen der einzelnen Teilchen geringer.
- Beispiel: Neutrino-Experimente
- Beschleuniger die speziell für höchste Teilchenzahlen optimiert sind:
  - Europa: CERN
  - USA: Project X (gestoppt)
  - Japan: JPARC

# Entwicklung 1: Direkte Laser Beschleunigung

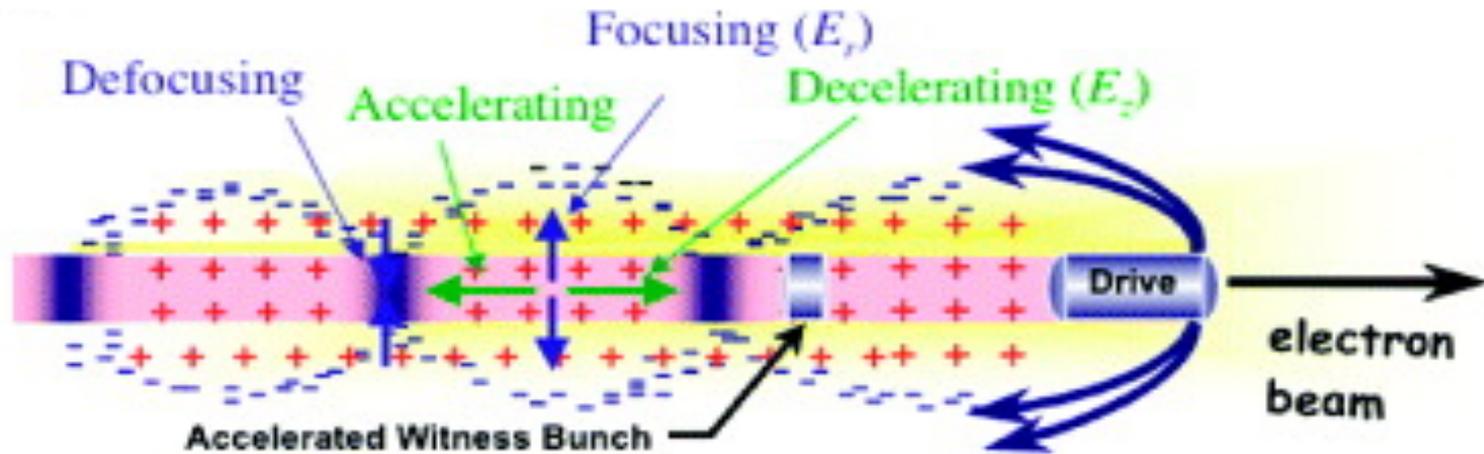


Stanford University/  
SLAC National Laboratory



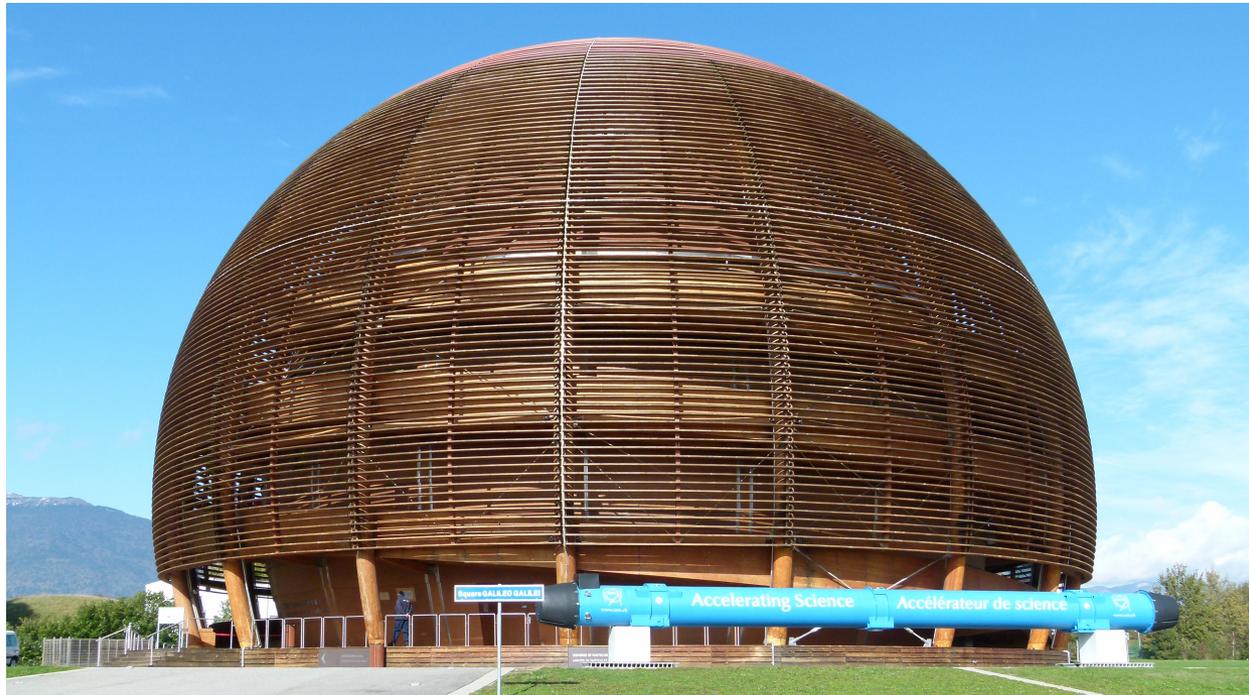
- Laserstrahl wird direkt zur Beschleunigung benutzt.
- Höhere Frequenzen -> kleinere Abmessungen: Dielektrisches Strukturen.
- Faktor 5-10 höhere Gradienten möglich ( $\sim 0.5 \text{ GV/m}$ ).
- Würde sehr kompakte Beschleuniger ermöglichen: vielfältige Anwendung.
- Prototypstadium: Entwicklung der Lasertechnik wird entscheidend sein.

# Entwicklung 2: Plasma-Kielfeld Beschleunigung (plasma wakefield acceleration)



- Anregungsstrahl (oder Laserpuls) regt **Plasmaschwingungen** an.
- Es entstehen **sehr hohe Feldstärken** auf Grund der Trennung der Teilchenarten.
- Zweiter Strahl kann stark beschleunigt und fokussiert werden.
- Gradienten: **10-100GeV/m**.
- Sehr hohes Potential und sehr aktives Forschungsfeld.
- Prototypenstadium: noch viele Implementierungsprobleme.
- Prototyp auch am CERN gebaut (**AWAKE**).

# C. Teilchenbeschleuniger am CERN

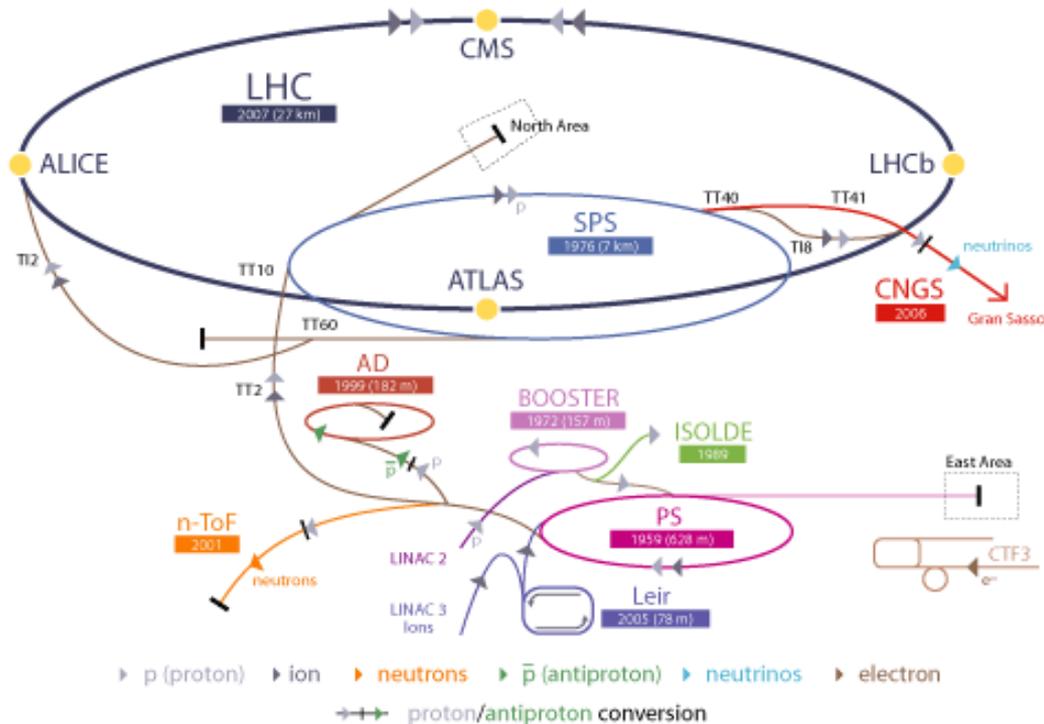


# CERN und seine Beschleuniger

- **Aufgabenbereich:** Entwurf, Bau und Betrieb von:
  - Beschleunigeranlagen
  - Teilchendetektoren
  - Datenauswertesoftware
- **Ressourcen:**
  - Budget: ca. 900 MEuro (große Universität).
  - Ca. 2500 Fixangestellte.
  - Aber viele Kollaborationen mit Universitäten: ca. 10000 involvierte Personen.
- **Forschung:**
  - Weltweit führendes Institut für Hochenergiephysik: LHC und seine Experimente.
  - Aber auch Hochintensitätsphysik: Neutrino-Experimente.
  - Und Nuklear- und Antimaterieforschung: ISOLDE, AD/Elena, u.a.
- **Primäres Forschungsinstrument:**
  - Vielzahl von verschiedenen Teilchen-Beschleunigern mit dem Flakschiff LHC.

# Die CERN Beschleunigerkette

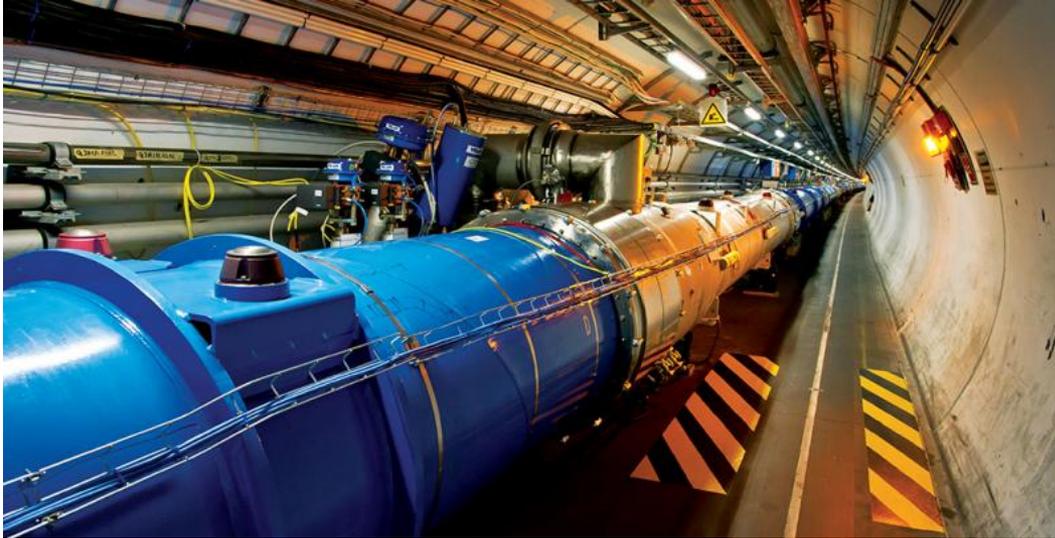
CERN Accelerator Complex



LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron  
 AD Antiproton Decelerator CTF3 Clic Test Facility  
 CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice  
 LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINEAR ACcelerator n-ToF Neutrons Time Of Flight

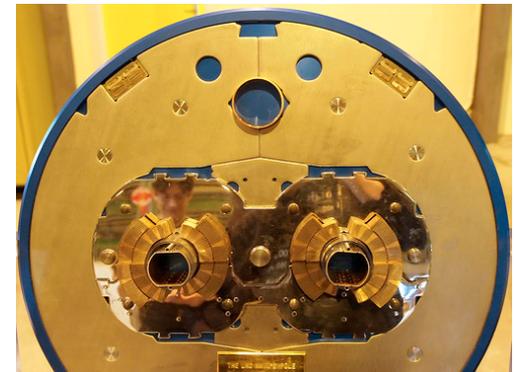
- Jeder Beschleuniger ist begrenzt auf gewissen Energiebereich.
- Kette von Beschl. notwendig um Energien zu erreichen.
- Protonen: p-Quelle, LINAC4, Booster, PS, SPS, LHC
- Ionen: Ionen-Quellen, LINAC3, LEIR, PS, SPS, LHC
- Experimente:
  - LHC: Hochenergiephysik
  - SPS: Fixed Target (Nuklearphysik)
  - SPS: CNGS (Hochintensitätsphysik)
  - ISOLDE: Nuklearphysik
  - AD/ELENA: Antimaterieexperimente
  - Viele Kleinere Experimente

# Large Hadron Collider (LHC)

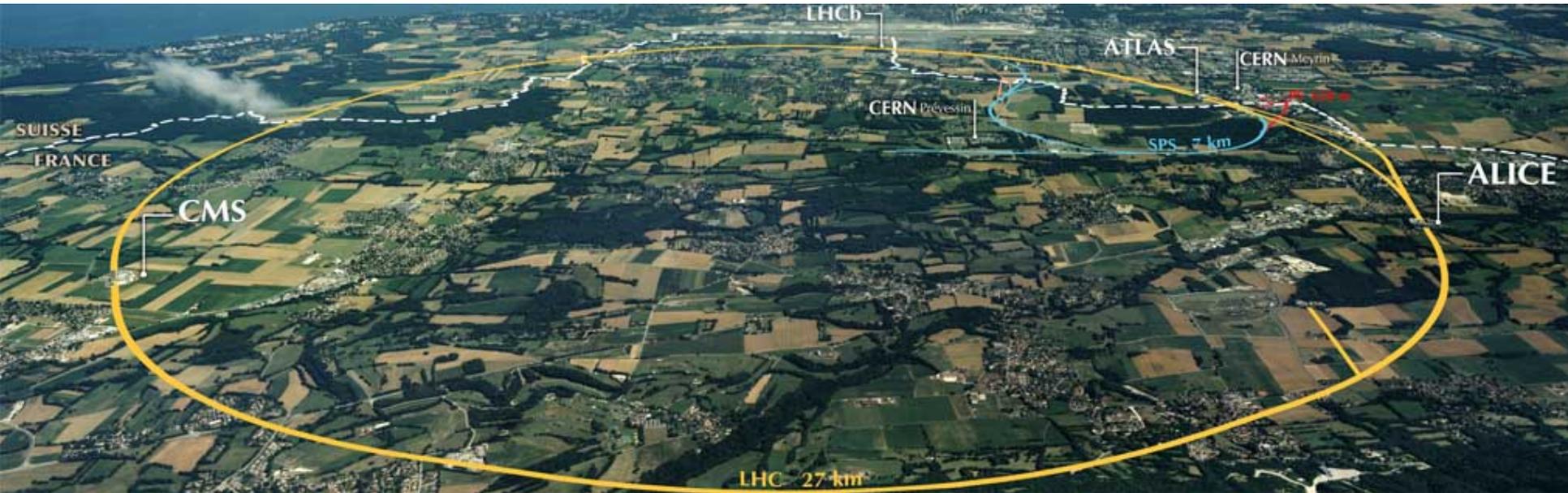


- Flakschiff CERNs.
- Beschleuniger mit der höchsten Teilchenenergie weltweit: 7 TeV (Design).
- Beschleunigung von Protonen.

- Zwei Teilchenstrahlen in umgekehrten Richtungen in getrennten Strahlrohren.
- An 4 Stellen im Ring werden die Strahlen aufeinander gelenkt (Experimente/Detektoren).



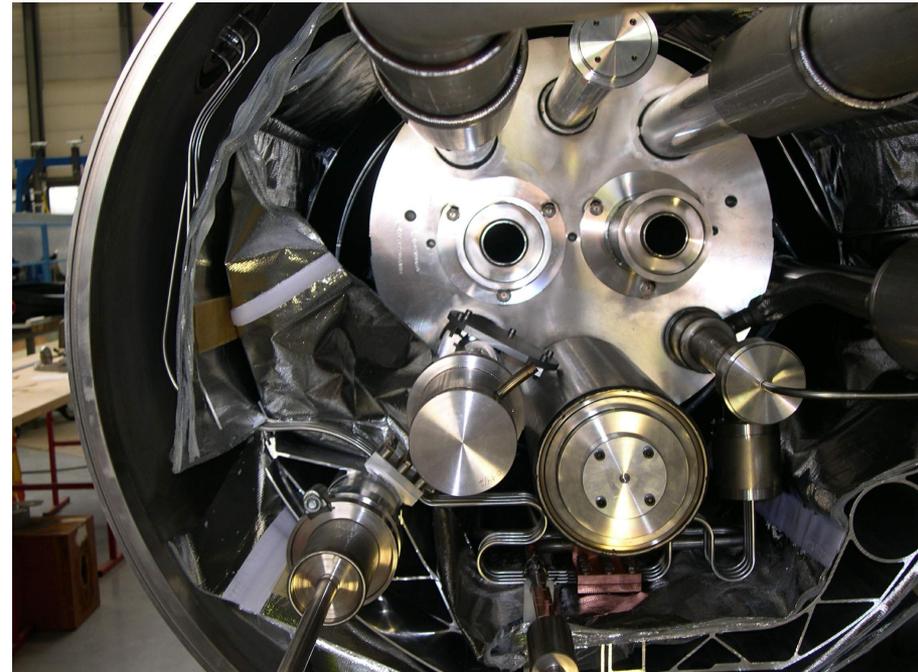
# Large Hadron Collider - Dimensionen



- Unterirdisch: 50-175 Meter
- Tunnellänge: 27km
- Durchmesser: 9,6km
- Großteils in Frankreich, aber auch in der Schweiz.
- 4 Großexperimente

# LHC – Magnet- und Tieftemperaturtechnik

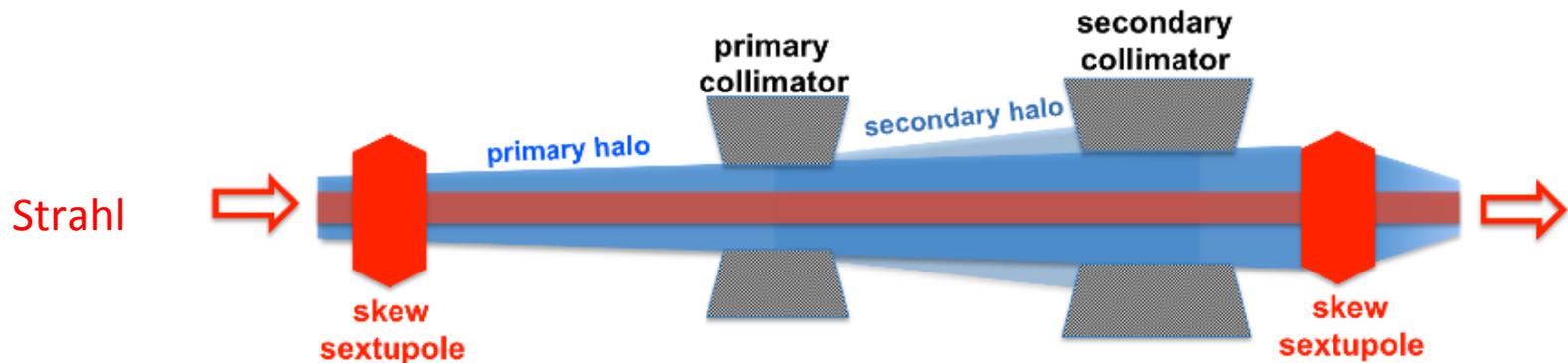
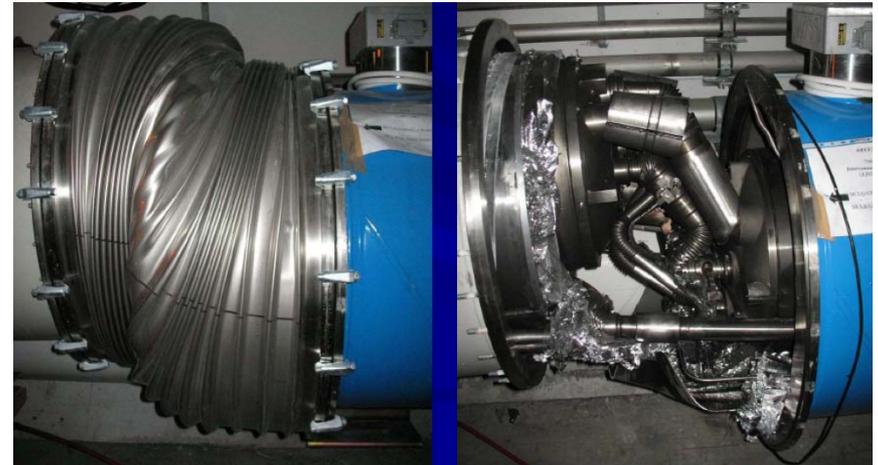
- Größte Herausforderung des LHC: Strahl mit diesen Energien auf einer Kreisbahn zu halten.
- Lösungen:
  - Normale Magnete (1-2 Tesla) und größerer Tunnelradius.
  - Stärkere Magnete.
- Stärkere Magnete (LHC 8.3 Tesla) brauchen höhere Ströme. Nur möglich in supraleitenden Leitern.
- LHC Magnete benutzen Niobium-Titan Leiter und führen 11700A.
- NiTi wird auf 1.9K gekühlt um supraleitend zu werden.



- Kühlung in mehrstufigen Gyrostat.
- Energieaufwand LHC: 700-800GWh/ Jahr (10% von Kanton Genf).

# LHC – Maschinenschutzsystem

- Durch Teilchenverlust im Beschleuniger ein Leite die Supraleitfähigkeit verlieren (der Magnet quencht).
- Dann passiert das (2008, nicht durch Teilchenverlust in diesem Fall):
- Kollimation fängt zu weit abweichende Teilchen ab.



# Large Hadron Collider - Detektoren



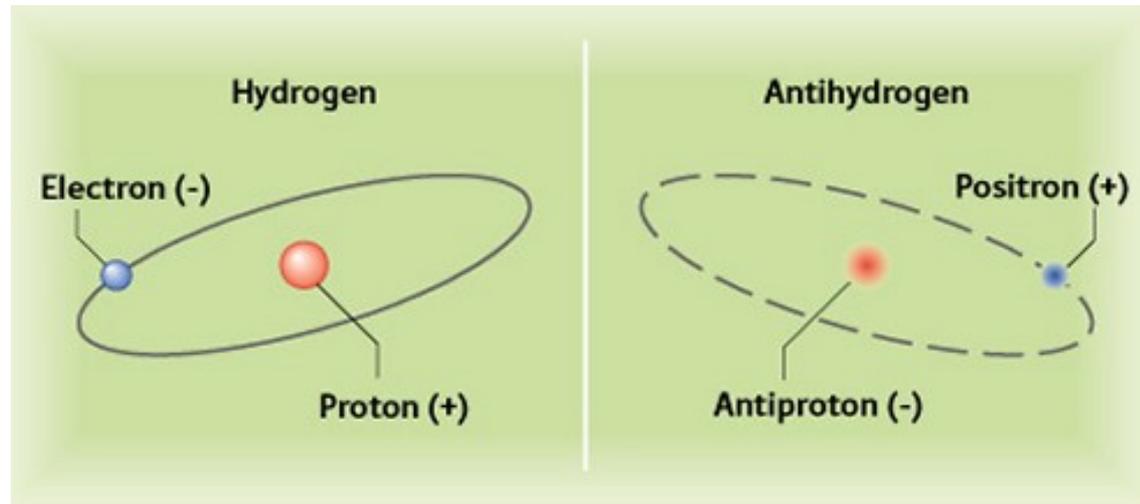
Besuch in der CMS-Halle

- **ALICE:** Ionenkollisionen: Quark-Gluonen Plasma
- **ATLAS:** Mehrzweck (z.B. Higgs, Supersymmetrie)
- **CMS:** Mehrzweck (z.B. Higgs, Supersymmetrie)
- **LHCb:** B-Mesonzerfall (CP Verletzung)

- Teilchenstrahlen werden an 4 Stellen im LHC kollidiert.
- Neue kurzlebige Teilchen entstehen bei diesen unelastische Streuversuchen.
- Zur genauen Beobachtung dieser Teilchen wurden riesige Teilchendetektoren gebaut worden.
- LHC-Strahlen kollidieren im Zentrum der riesigen Detektoren.
- Mehr Details von Werner Riegler.

# Antiproton-“Entschleuniger“ (AD) und Elena

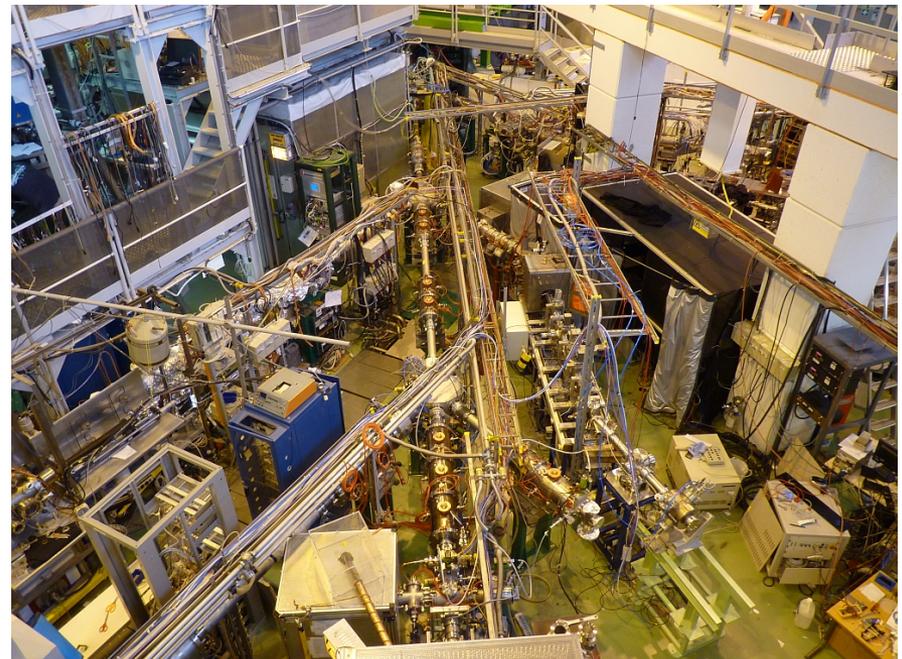
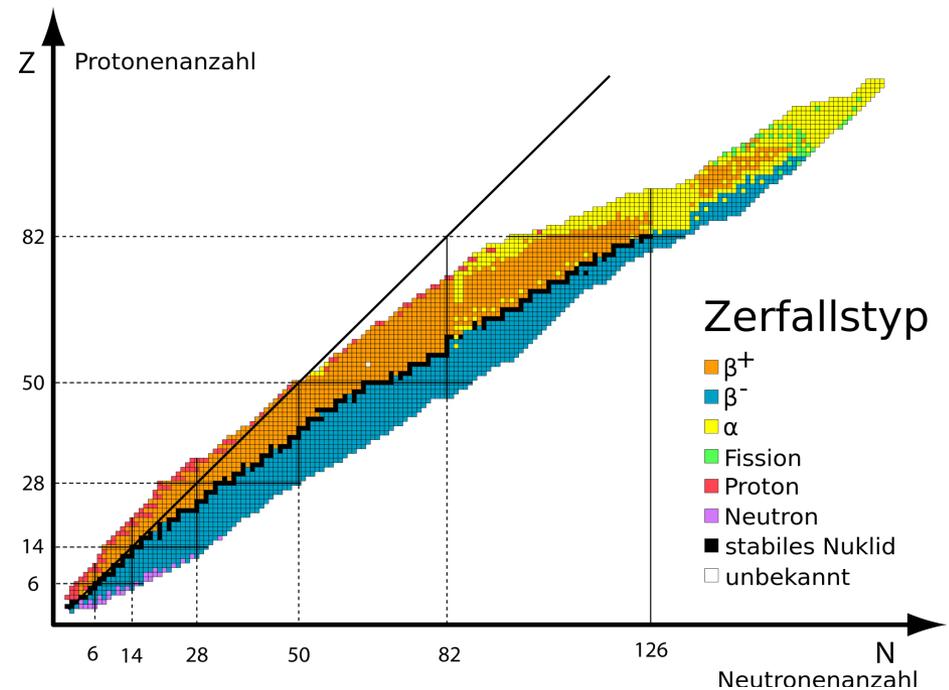
- Mehrere Antimaterie-Experimente:
  - Spektroskopie
  - Gravitation
- Für die Erzeugung von Antimaterie:  
Zusammenbringen von Antiprotonen und Positronen
- Teilchen müssen langsam genug sein. Speziell Antiprotonen sind problematisch!
- Zwei spezielle Entschl. um Antiprotonen abzubremesen:  
[AD und ELENA](#)



- Spezielle Verfahren um die Antiprotonen zu kühlen:
  - Stochastische Kühlung (Nobelpreis)
  - Elektronenkühlung
- Siehe Vortrag von Michael Doser.

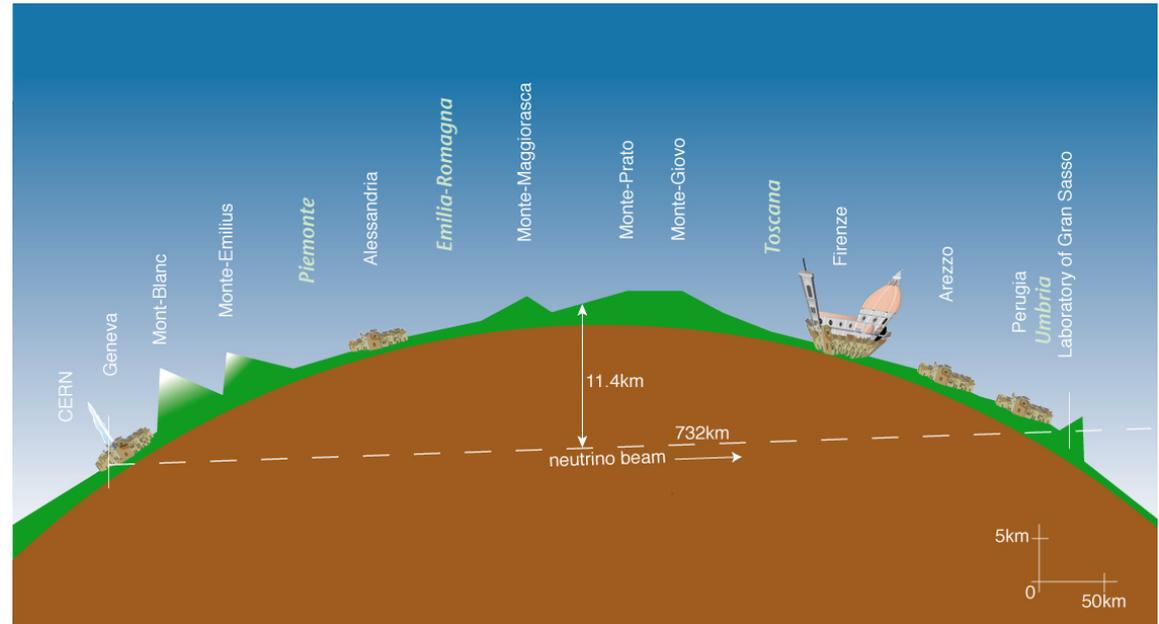
# ISOLDE

- Protonen-Strahl (PS) wird zur Erzeugung von exotischen Isotopen verwendet.
- Zerfall dieser radioaktiven Kerne wird untersucht.
- Nuklearphysik: Gesetz des Aufbaus von Atomkernen (nicht vollständig verstanden).



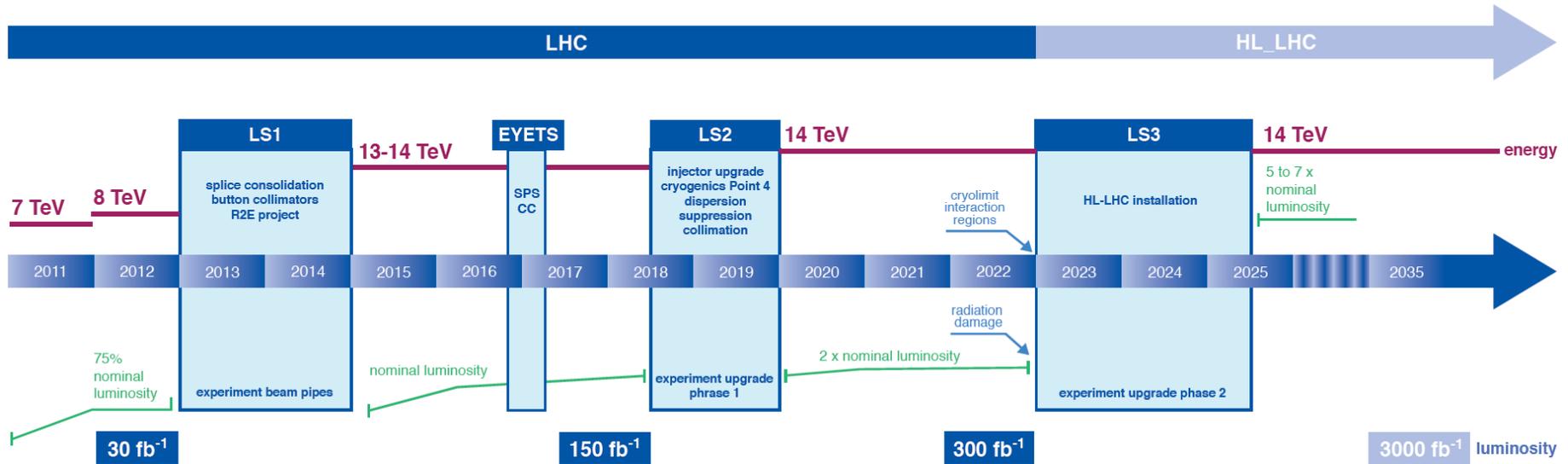
# Neutrinos to Gran Sasso (CNGS)

- Vermutlich ändern Neutrinos ihren Typ über lange Distanz (**Neutrinooszillationen**)
- Zur Untersuchung werden **Neutrinos am CERN erzeugt und nach Italien geschickt.**
- Neutrinos interagieren nur sehr wenig mit Materie (Gestein und Detektoren)
- Detektion ist problematisch da geringe Interaktion



- Man braucht extrem viele Neutrinos um Statistik zu verbessern (**Hochintensitätsphysik**).
- Experiment vor kurzem eingestellt. Nachfolgeprojekt in Planung

# Die nahe Zukunft: High-Lumi LHC



- Eventuelles Upgrade des LHC zu High-Lumi LHC 2023-2025
- 5-7 mal höhere Luminosität
- Mehrere technische Verbesserungen geplant: Stärkere Magnete bei Kollisions-Fokussierung (13T), Crab-cavities.

- Teilchenproduktionsrate  $N$ :
  - Energie  $E$  (welche Teilchen)
  - Luminosität  $L$  (wie viele Teilchen)

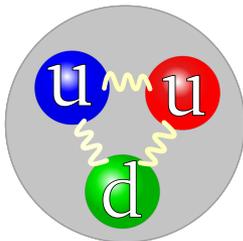
$$\frac{dN}{dt} = \sigma(E)\mathcal{L}$$

$N$  ... produzierte Teilchen

$\sigma$  ... Wirkungsquerschnitt eines gewissen Prozesses

# Die vielleicht ferne Zukunft V1: Compact Linear Collider (CLIC)

- CLIC ist ein geplanter **zu- künftiger Teilchen-beschleuniger** und steht für **Compact Linear Collider**.
- Möglicher Nachfolger des LHC (Large Hadron Collider).
- **Elektronen und Positronen** kollidieren mit einer Energie von **3TeV (14TeV LHC)**.
- **Linearer Beschleuniger** ca. **50 km**.
- Beschleunigerbetrieb ca. 2030.



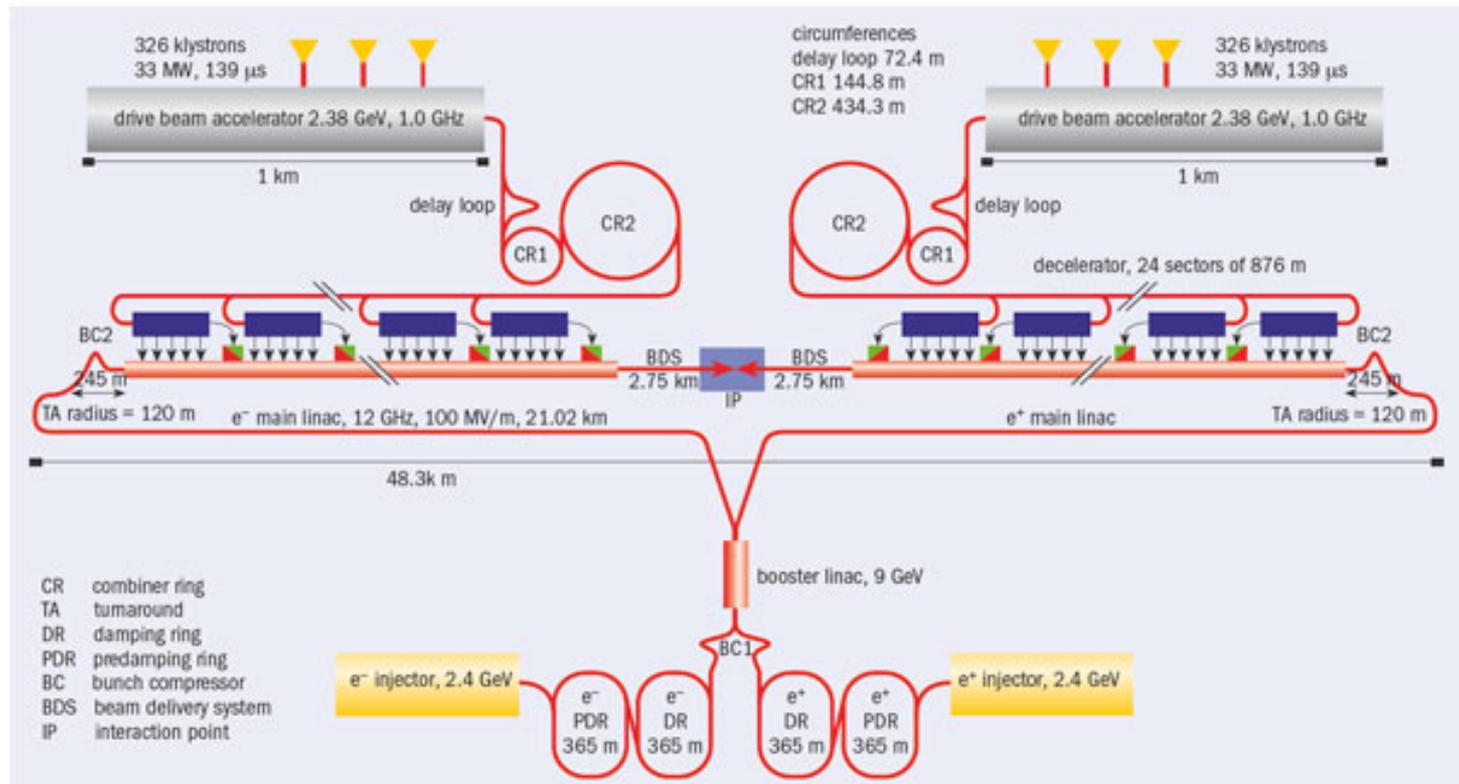
## Warum noch einen riesigen Beschleuniger mit niedrigerer Energie?

- **LHC** kollidiert Protonen, welche nicht elementar sind. Die Kollisionsenergie ist nicht genau definiert. Darum ist der LHC eine **Entdeckungsmaschine aber keine Messmaschine**.
- Beschleuniger mit elementaren Teilchen wird benötigt um Resultate mit **präzisen Messungen** zu komplementieren.

## Warum linear?

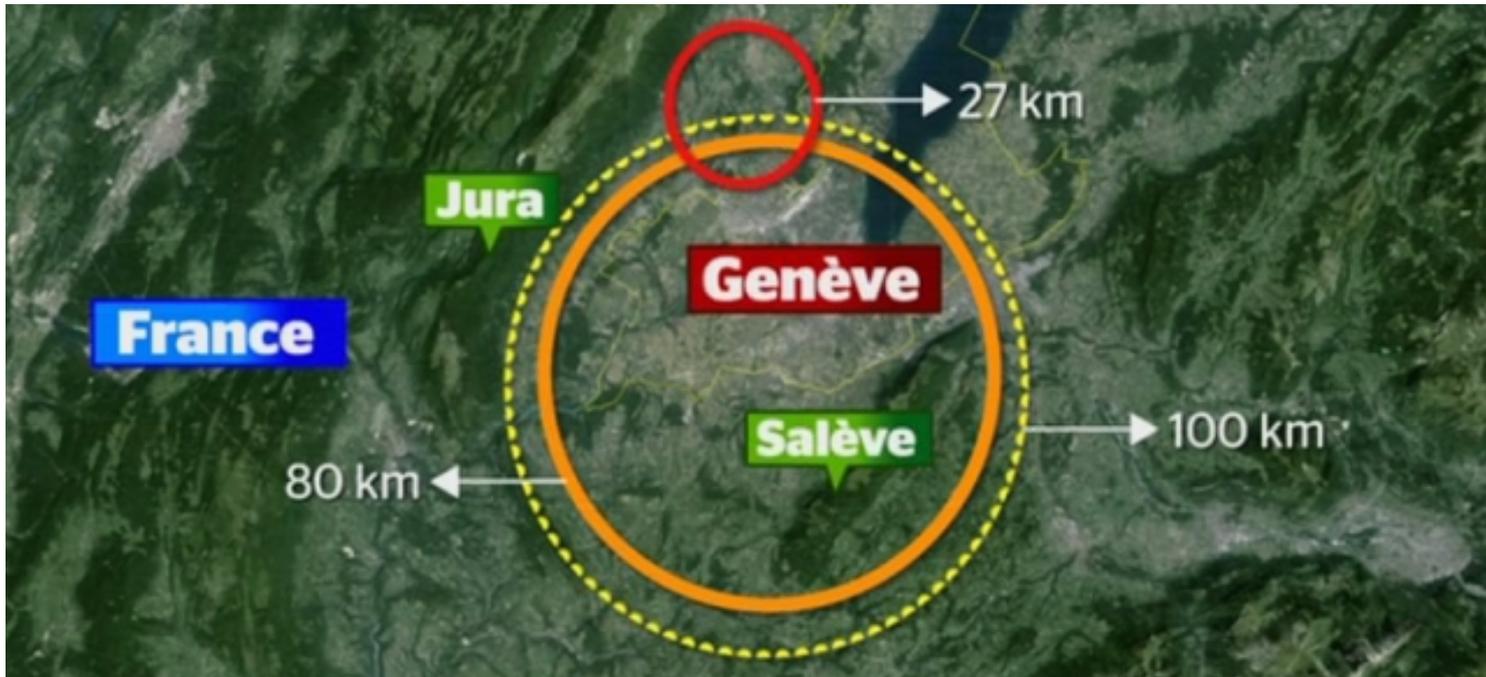
- Da die verwendeten leichten Teilchen viel mehr **Synchrotronstrahlung** produzieren als Protonen.

# Der CLIC Komplex



- **Beschleunigung** kritisch wegen Länge.
- **100MV/m Beschl.-Strukturen**.
- Starke R&D in Beschl.-Strukturen mit höherer Frequenz (X-Band).
- Keine effiziente RF-Quelle verfügbar.
- **Zweistrahlsbeschleunigung** aus Energie-effizienz Gründen.

# Die vielleicht ferne Zukunft V2: Futur CERN Collider (FCC-pp)



- Um mit Ringbeschleunigern auf noch höhere Energien zu kommen:
  - Längerer Tunnel
  - Stärkere Magnete
- Plan für eine 80-100km Tunnel
- Neue supraleitende Magnet-technologie:  $\text{Ni}_3\text{Sn}$  (16-20T)
- Strahlenergie 50TeV (LHC 7TeV)

# D. MedAustron



**Österreichische Ionentherapie- und  
Forschungszentrum**

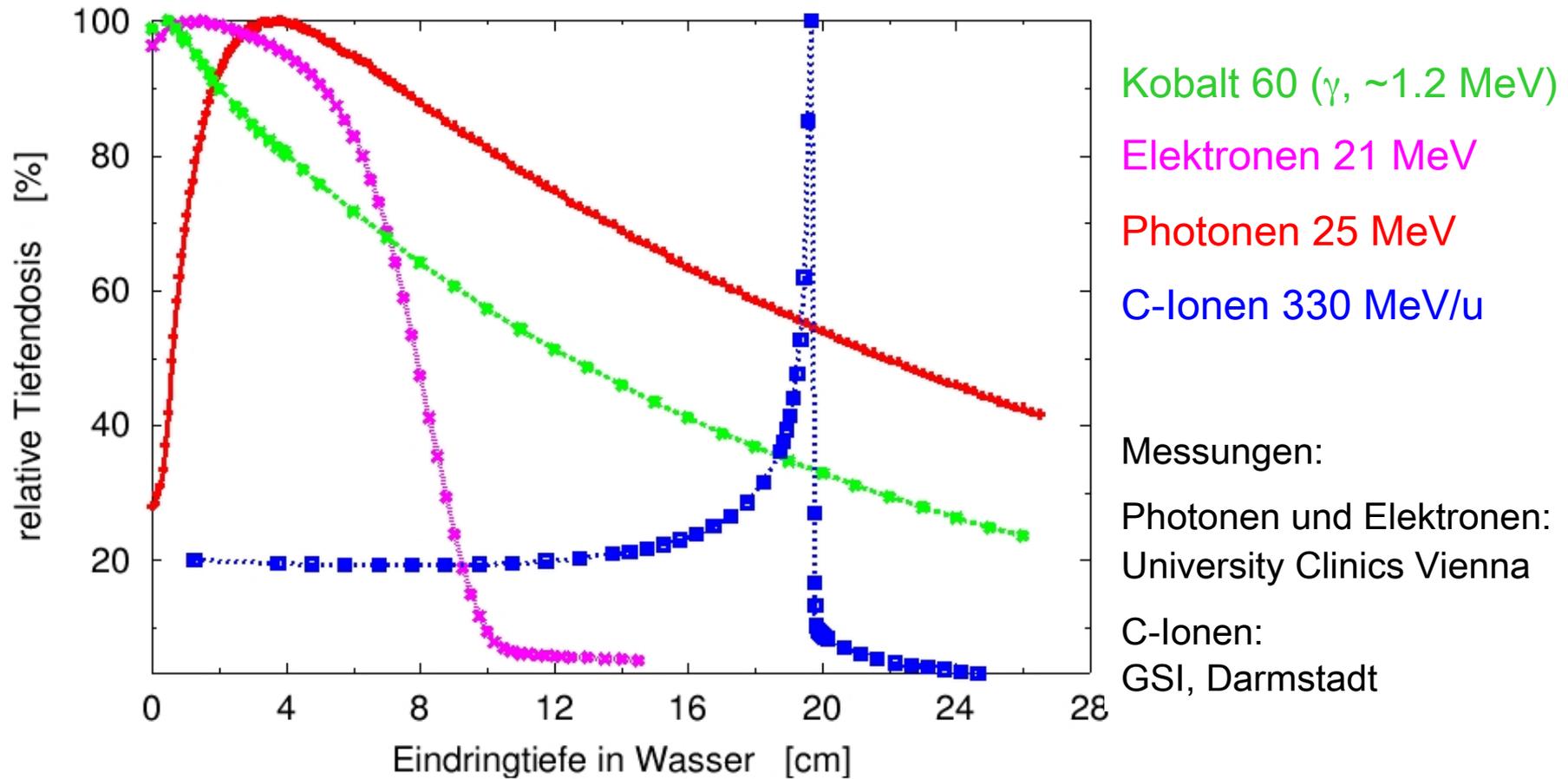
**Wiener Neustadt**

# Tumorbehandlung

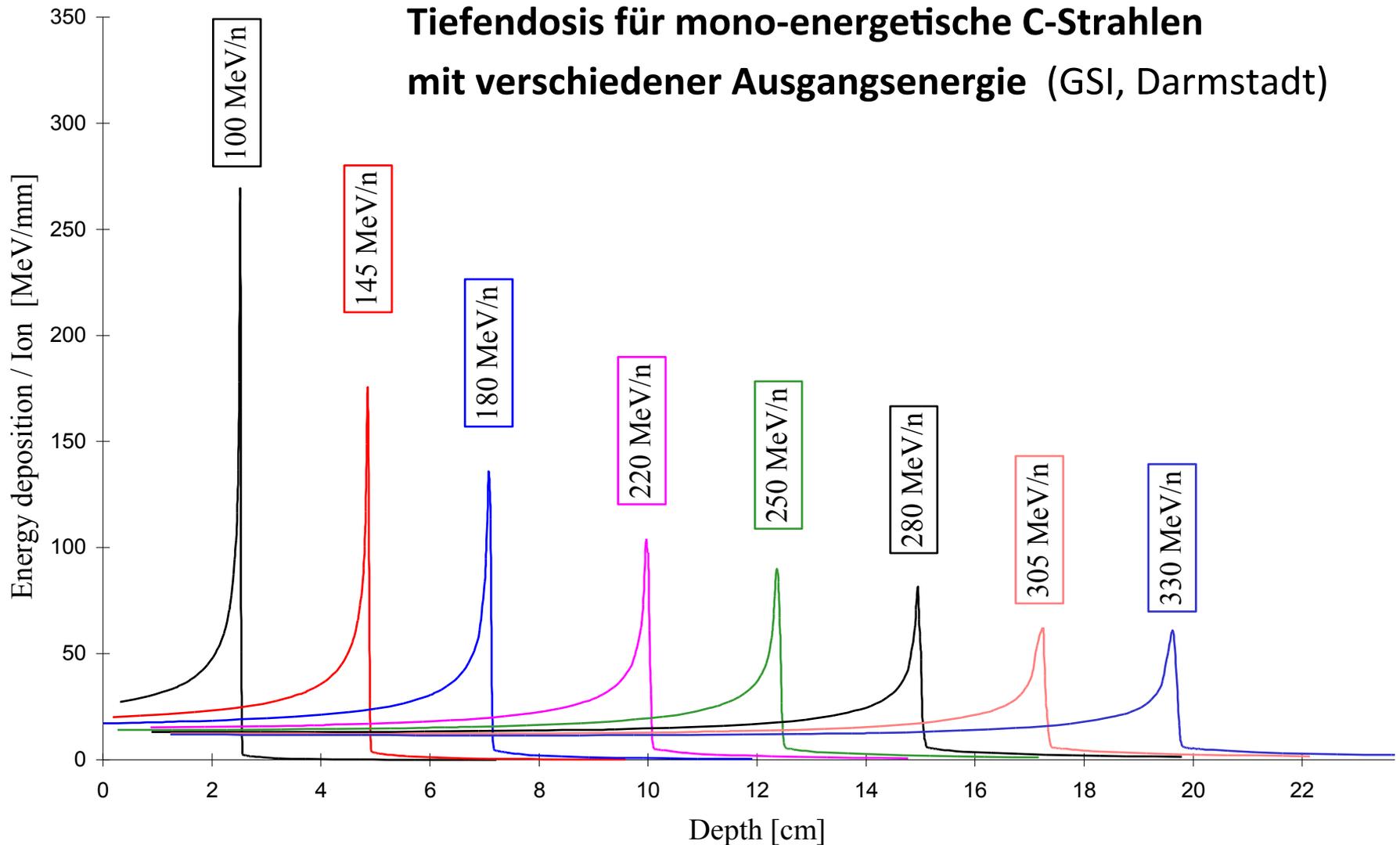
- **Bestrahlungstherapie:** Photonen und Elektronen werden standardmäßig zur Behandlung von Tumoren eingesetzt.
- **Hadrontherapie:** Bei Bestrahlung mit Protonen und Ionen lässt sich Strahlungs-dosis besser auf Tumor bündeln:
  - Umliegendes Gewebe wird weniger geschädigt.
  - Signifikant erhöhte Heilungsraten bei lokalen Tumoren.
- Für etwa 2000 – 3000 Patienten in Österreich wäre die Ionentherapie die optimale Behandlungsmethode.
- Aber dafür braucht man einen leistungsfähigen Teilchenbeschleuniger (Synchrotron).

# Prinzip der Ionentherapie – “Bragg-Spitze”

Messungen im Wasserphantom (~gewebeäquivalent)

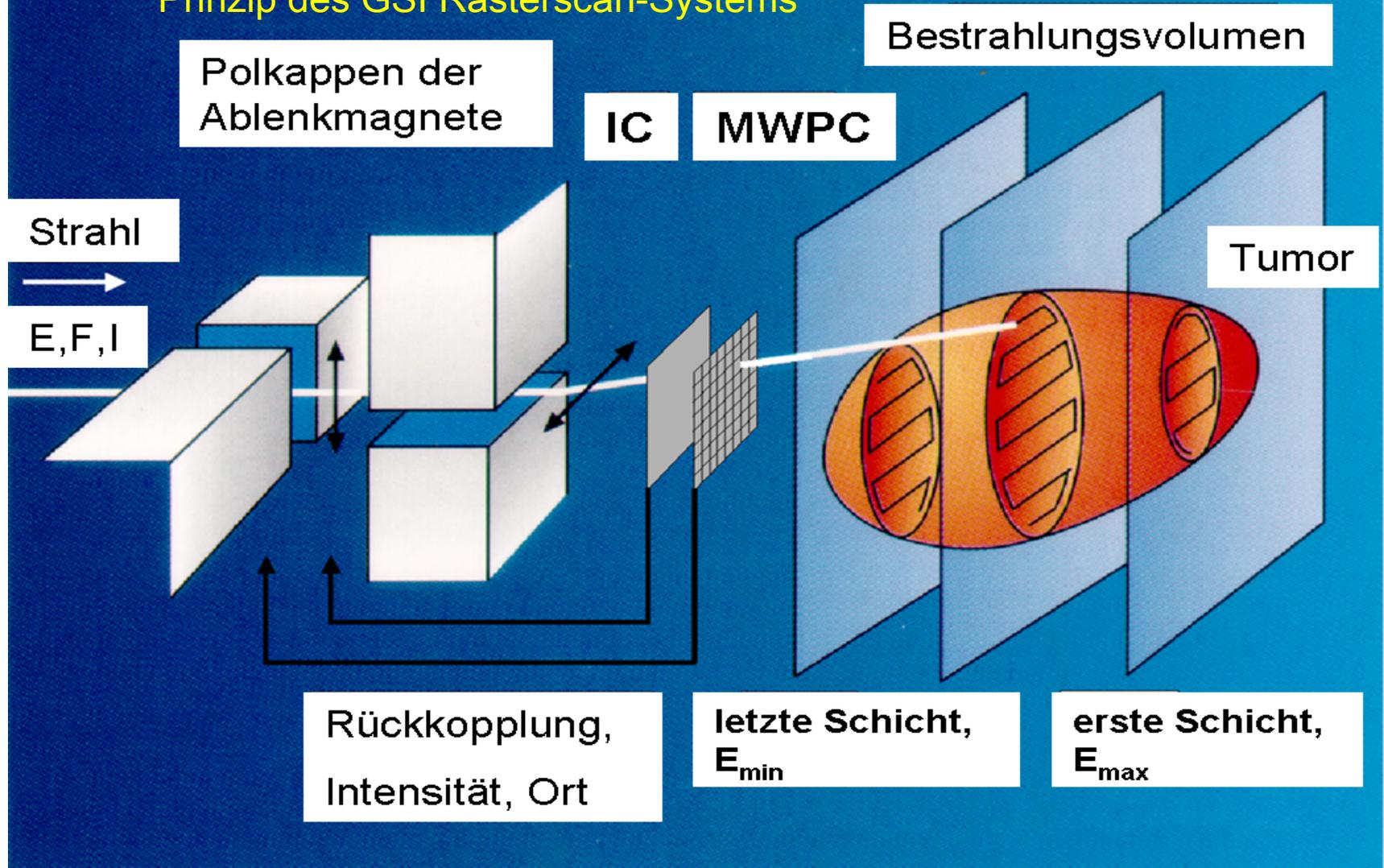


# “Bragg-Spitze” - Energieabhängigkeit



# Aktive Strahlaufbereitung

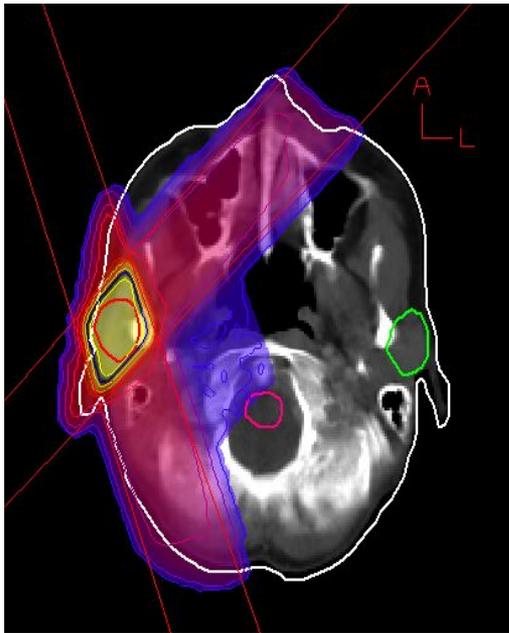
## Prinzip des GSI Rasterscan-Systems



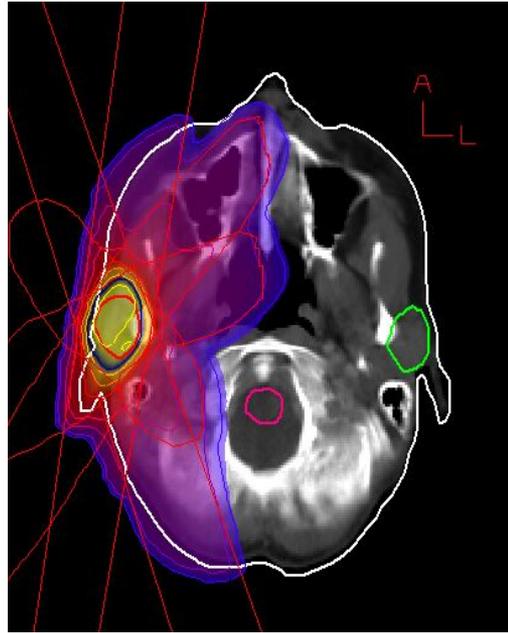
# Verteilung der Bestrahlungsdosis

Beispiel: Glandula parotid cancer (Ohrspeicheldrüsenkarzinom)

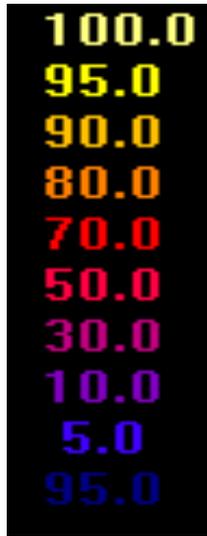
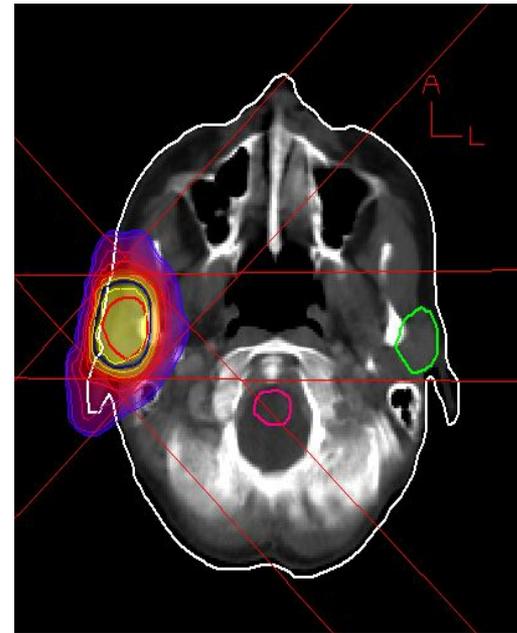
Roentgenstr. aus 2 Richtungen



Roentgenstr. aus 5 Richtungen



Protonen aus 3 Richtungen



# Das MedAustron-Projekt

- Ionentherapieanlage für Österreich.
- Eine der ersten Ionentherapieanlagen in Europa (bereits einige bestehende in Japan und USA).
- Kapazität: ca. 1200 Patienten pro Jahr.
  
- Entwurf in Zusammenarbeit mit CERN.
- Standort: Wiener Neustadt.
- Finanzierung: Republik Österreich, Land Niederösterreich und Stadt Wiener Neustadt.
  
- Zeitplan:
  - MedAustron wird derzeit in Betrieb genommen.
  - Erste Patientenbehandlung: Ende 2015.

# Standort Wiener Neustadt

- Norden von Wiener Neustadt, 32.000 m<sup>2</sup>
- Nähe Fachhochschule Wiener Neustadt
- Angrenzend an Areal für Neubau KH Wiener Neustadt



# MedAustron Beschleunigeranlage

- Synchrotron-Beschleuniger
- 3 Behandlungsräume
- 1 Raum für klinische Forschung



# MedAustron Inbetriebnahme (Nov. 2013)



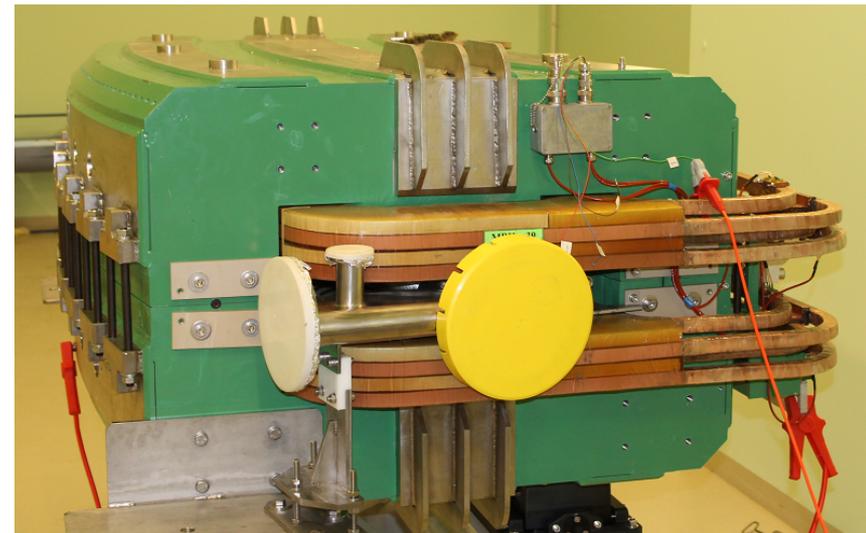
Gebäude



Injektorhalle mit Ionenquellen



Synchrotron



Dipolmagnet (zur Ablenkung)

Vielen Dank für ihre  
Aufmerksamkeit!