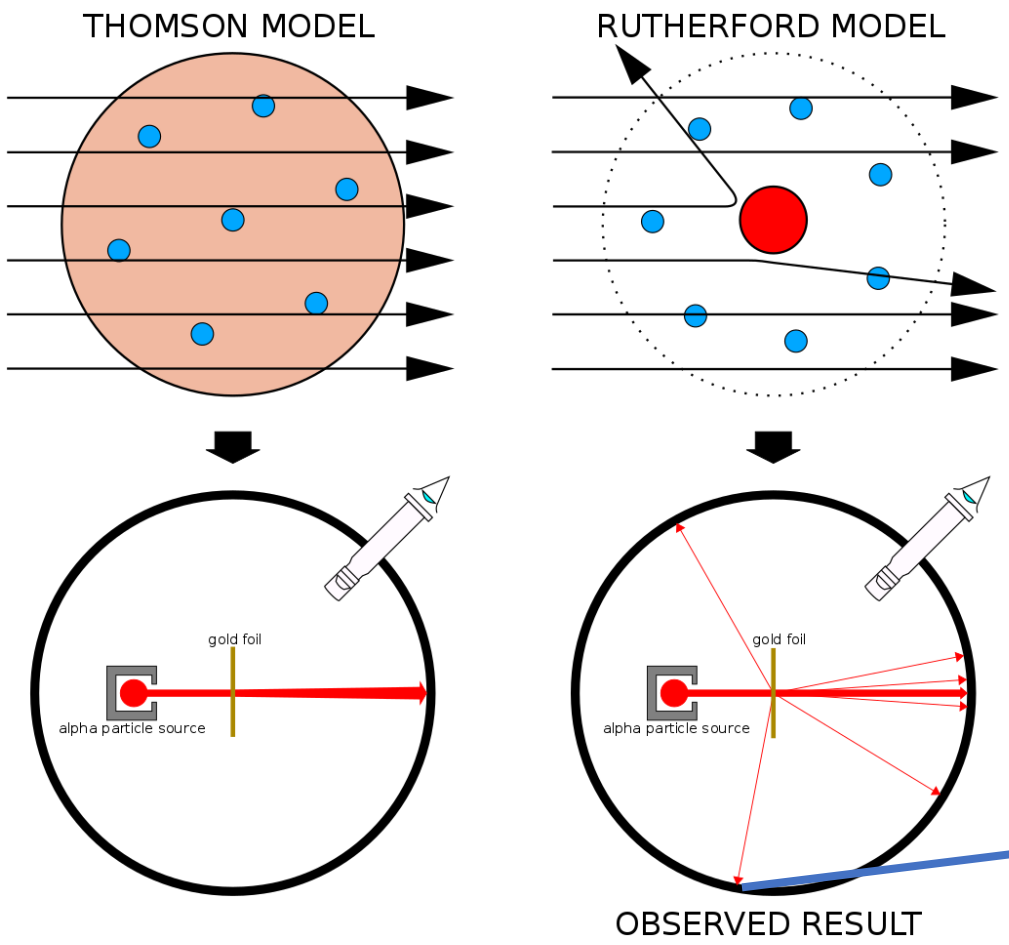
Einführung in die Beschleunigerphysik

Daniel Noll
CERN – BE/ABP/HSL

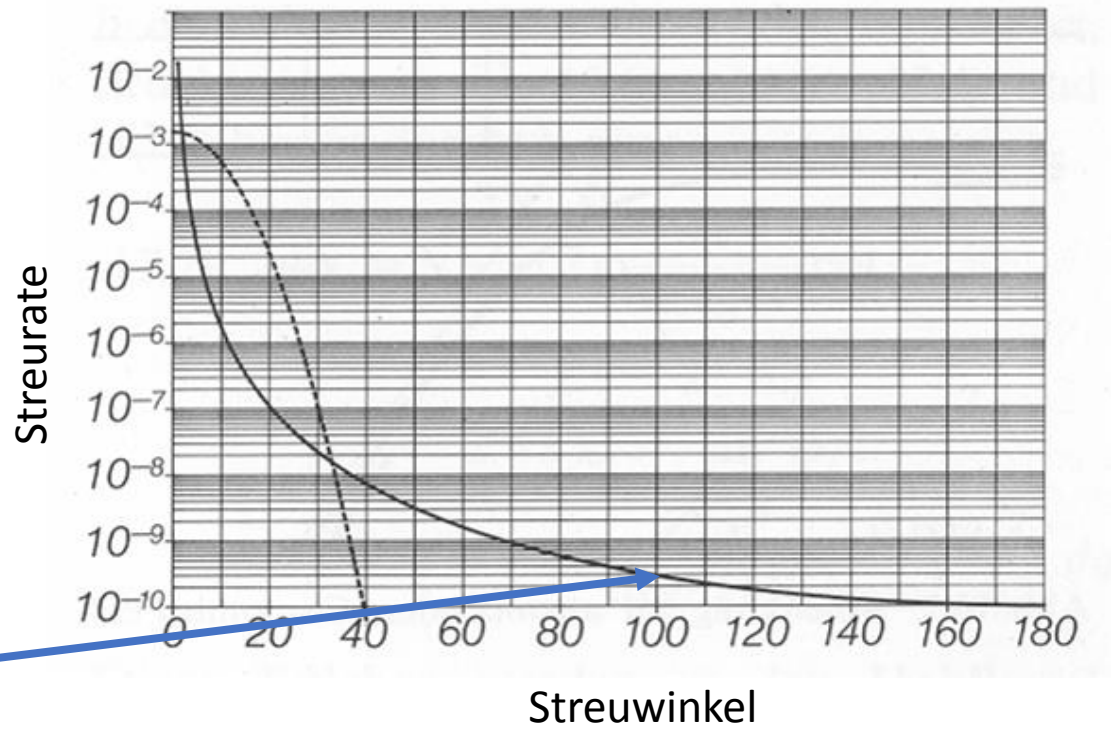
Überblick

- Ein historischer Einstieg
- Funktionsprinzip eines modernen Linacs: Linac4
- Kreisbeschleuniger: Theorie und der LHC als Beispiel
- Anwendungen von Teilchenbeschleunigern

Das Geiger-Marsden- / Rutherford-Experiment

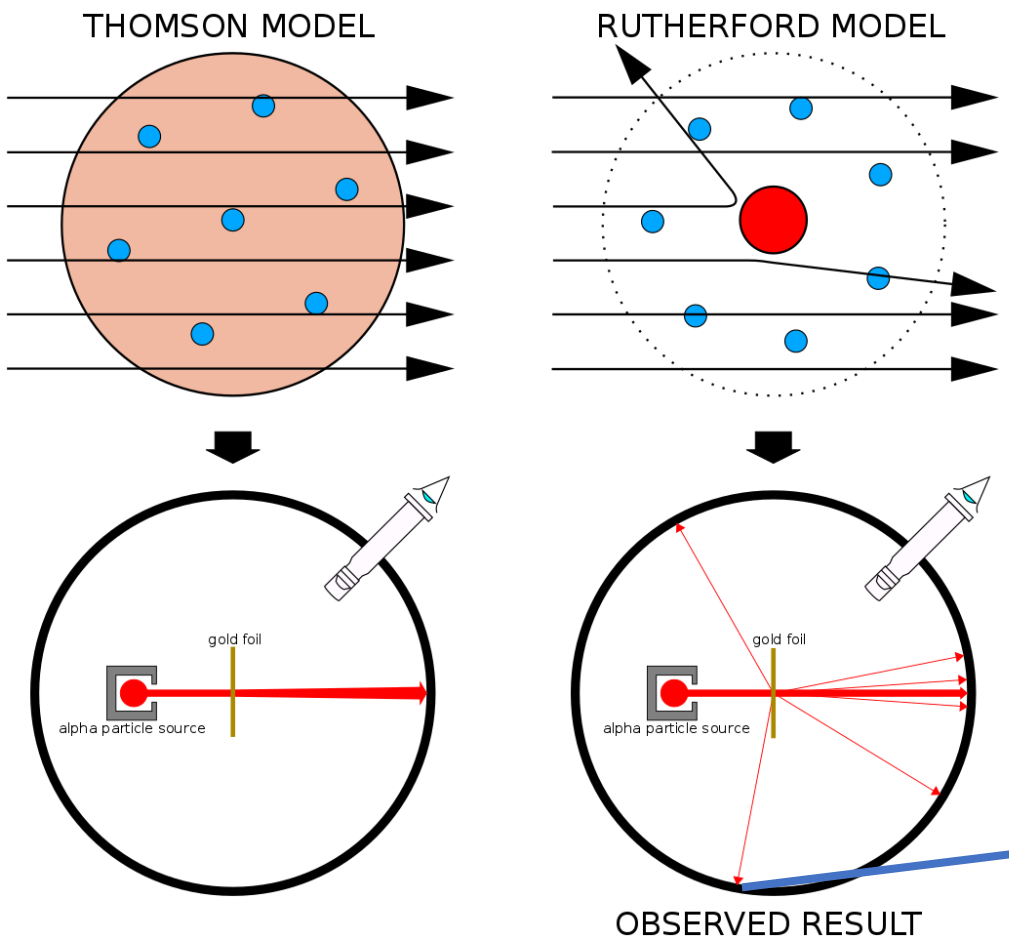


Geiger, Marsden & Rutherford, 1911
α-Teilchen mit einigen MeV
(Radon, Radium oder Bismuth)

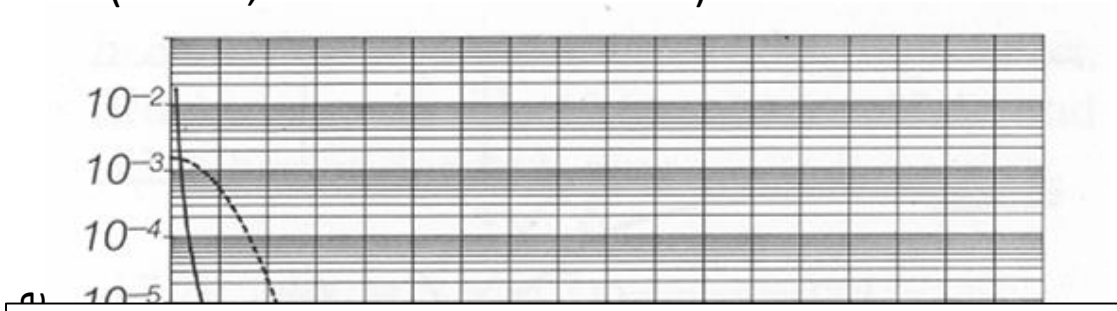


https://history.aip.org/history/exhibits/rutherford/

Das Geiger-Marsden- / Rutherford-Experiment



Geiger, Marsden & Rutherford, 1911
α-Teilchen mit einigen MeV
(Radon, Radium oder Bismuth)



"It has long been my ambition to have available for study a copious supply of atoms and electrons which have an individual energy far transcending that of the α and β-particles from radioactive bodies. I am hopeful that I may yet have my wish fulfilled, but it is obvious that many experimental difficulties will have to be surmounted before this can be realised on a laboratory scale."

(*Proceedings*, Royal Society, 1927)

https://history.aip.org/history/exhibits/rutherford/

Lorentzkraft

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Beschleunigung

- Keine Energieänderung durch magnetische Felder

$$\Delta W = \int (\vec{v} \times \vec{B}) \mathrm{d}\vec{s} = \int \left(\frac{\mathrm{d}\vec{s}}{\mathrm{d}t} \times \vec{B} \right) \mathrm{d}\vec{s} = 0$$

Lorentzkraft

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Beschleunigung

Ablenkung, Strahloptik

- Keine Energieänderung durch magnetische Felder

$$\Delta W = \int (\vec{v} \times \vec{B}) \mathrm{d}\vec{s} = \int \left(\frac{\mathrm{d}\vec{s}}{\mathrm{d}t} \times \vec{B} \right) \mathrm{d}\vec{s} = 0$$

- Warum Magnetfelder für die Strahloptik?

Lorentzkraft

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Beschleunigung

Ablenkung, Strahloptik

- Keine Energieänderung durch magnetische Felder

$$\Delta W = \int (\vec{v} \times \vec{B}) \mathrm{d}\vec{s} = \int \left(\frac{\mathrm{d}\vec{s}}{\mathrm{d}t} \times \vec{B} \right) \mathrm{d}\vec{s} = 0$$

- Warum Magnetfelder für die Strahloptik?

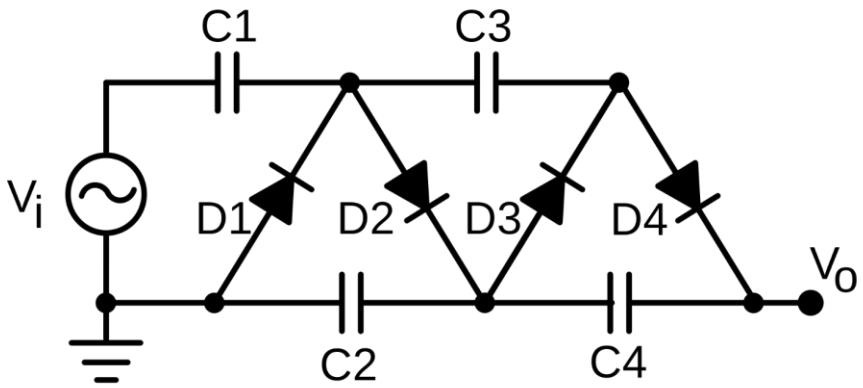
Wann ist $F_{el} = F_{mag}$?

Für v = c und B = 1 T: $E = vB = cB = 299.8 \ \frac{\mathrm{MV}}{\mathrm{m}}$

Maximale Feldstärke über 1 m in Luft: $\approx 3 \ \frac{\mathrm{MV}}{\mathrm{m}}$

Elektrostatische Maschinen: Cockcroft-Walton

- Hochspannungskaskade (Greinacher, 1919)

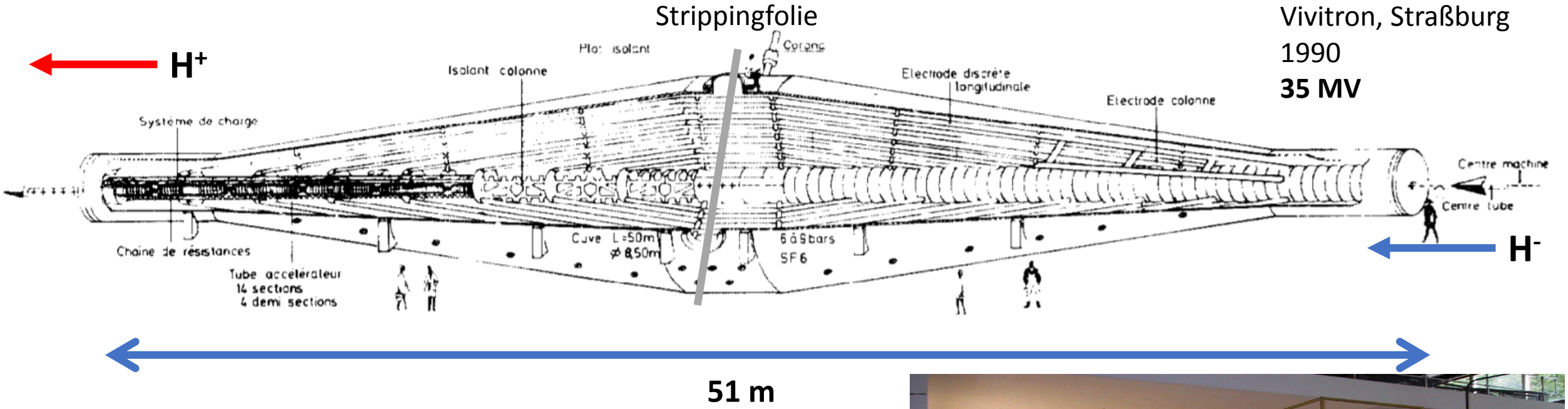


- Erstmals künstliche Kernreaktionen (“Kernzertrümmerung”) in 1932, Nobelpreis in 1951
- Lange Zeit in Verwendung als Vorbeschleuniger (z.B. am CERN bis 1993)

810 kV Cockroft-Walton am Paul-Scherrer Institut, 2018

Tandem-Beschleuniger

Vivitron, Straßburg
1990
35 MV



51 m

- Verdoppelte Strahlenergie durch Umladung: z.B. $H^- \rightarrow H^+$

12 MV tandem, Heidelberg

Zyklotron

- Entwickelt 1929-1930 in Berkeley
- Idee: Lenken die Teilchen auf Kreisbahn und verwenden die selbe Spannung vielfach

Lorentzkraft: $F = q\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right) = qvB$

Zentrifugalkraft: $F = m\omega^2 R$

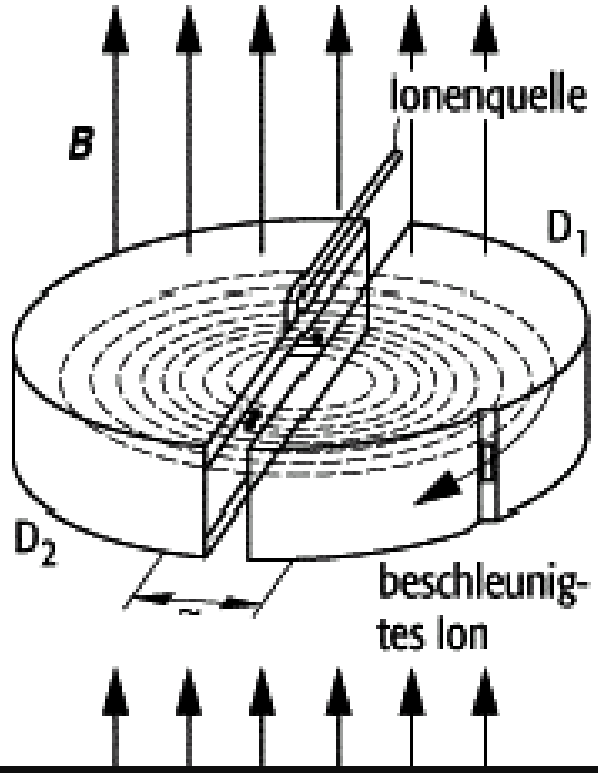
$$qvB = q\omega RB \overset{!}{=} m\omega^2 R$$

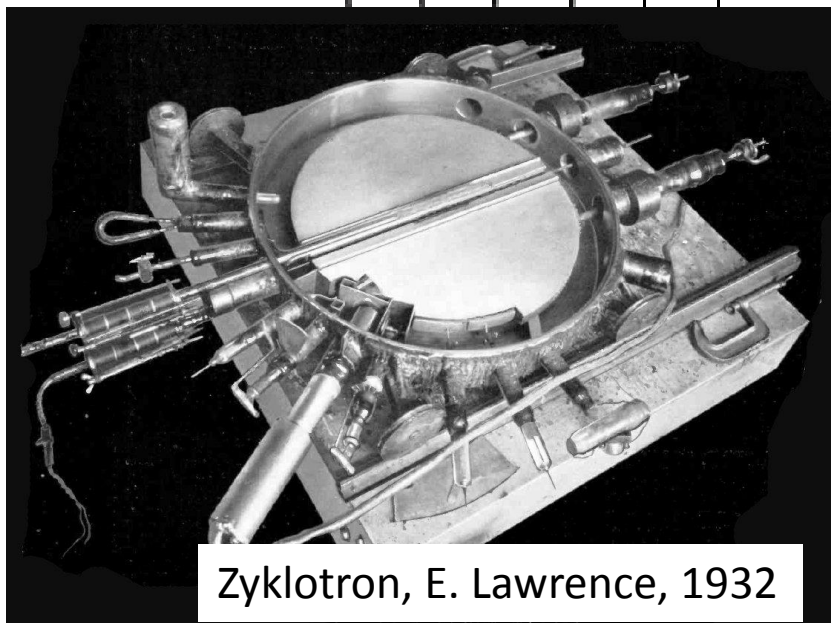
RF-Frequenz: $f_{\mathrm{RF}} = \frac{1}{2\pi}\frac{qB}{m}$

Radius: $R = \frac{mv}{qB}$

Wenn: **B** ↗ f_{RF} ↗

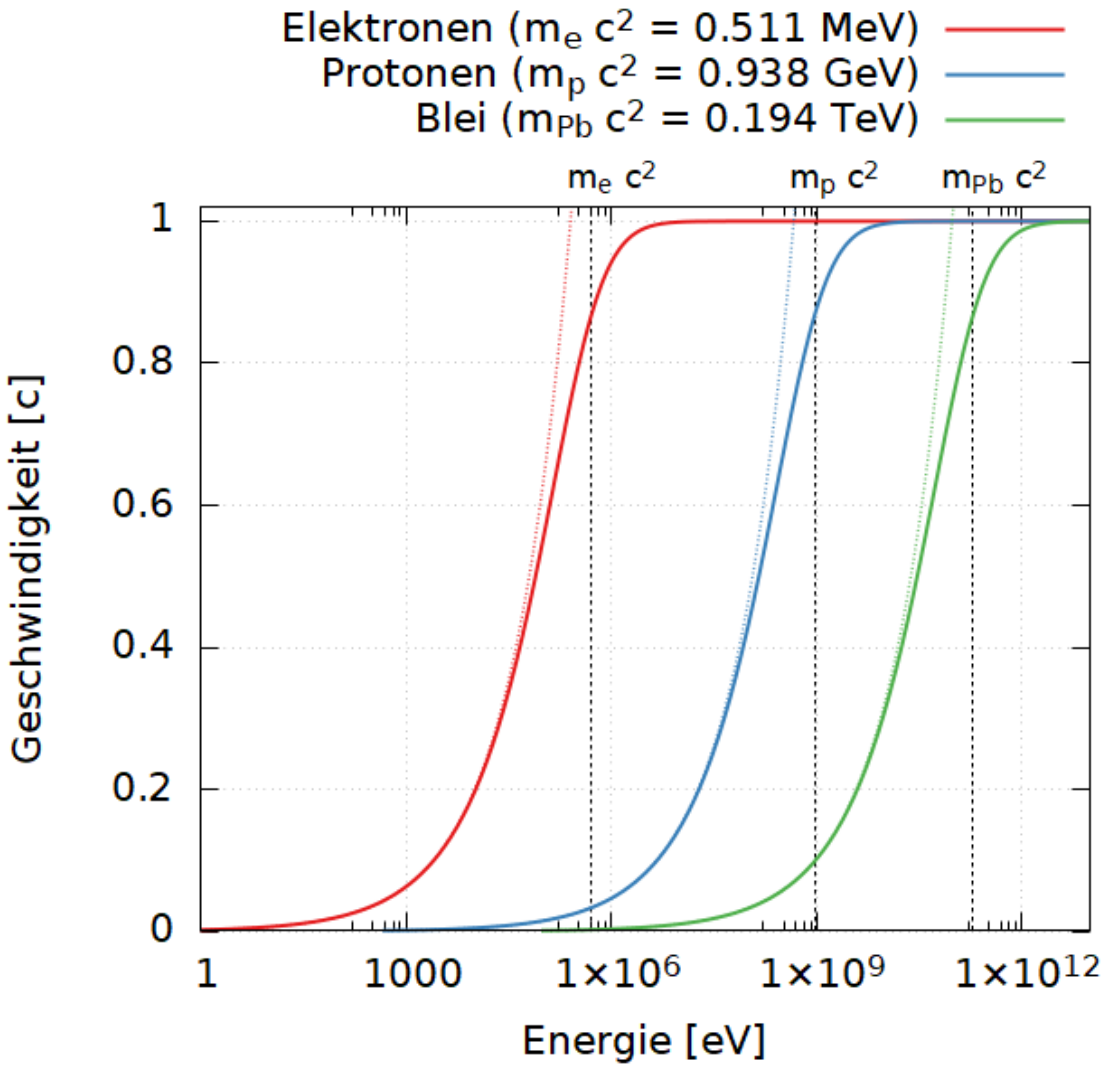
E ↗ $\boldsymbol{v}$ ↗ $\boldsymbol{R}$ ↗





Zyklotron, E. Lawrence, 1932

Beschleunigung und Teilchengeschwindigkeit



- Geschwindigkeit nach Newton:

$$v = \sqrt{2E/m}$$

- Geschwindigkeit nach der speziellen Relativitätstheorie:

$$v = c\sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} \qquad \gamma = 1 + E/mc^2$$

- Teilchen bewegen sich wie als ob ihre Masse zunehmen würde

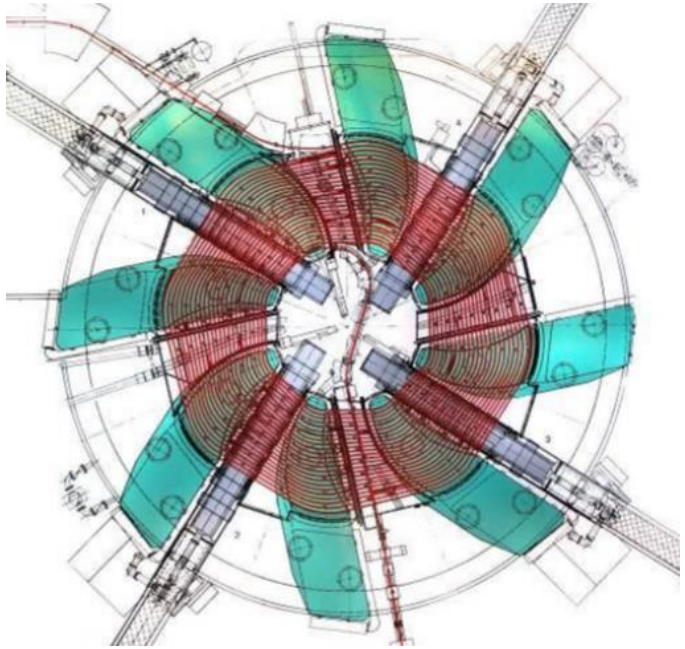
$$m = \gamma m_0$$

Zyklotron: Varianten

- Relativistische Massenzunahme

$$f_{\mathrm{RF}} = \frac{1}{2\pi}\frac{qB}{\gamma(E)m} \qquad \gamma(E) = 1 + \frac{E}{mc^2}$$

E ↗ $\boldsymbol{\gamma}$ ↗ **B** → $\boldsymbol{\frac{B}{\gamma(E)m}}$ ↘



- Synchrozyklotron $\quad f_{\mathrm{RF}}(E) = \frac{1}{2\pi}\frac{qB}{\gamma(E)m}$

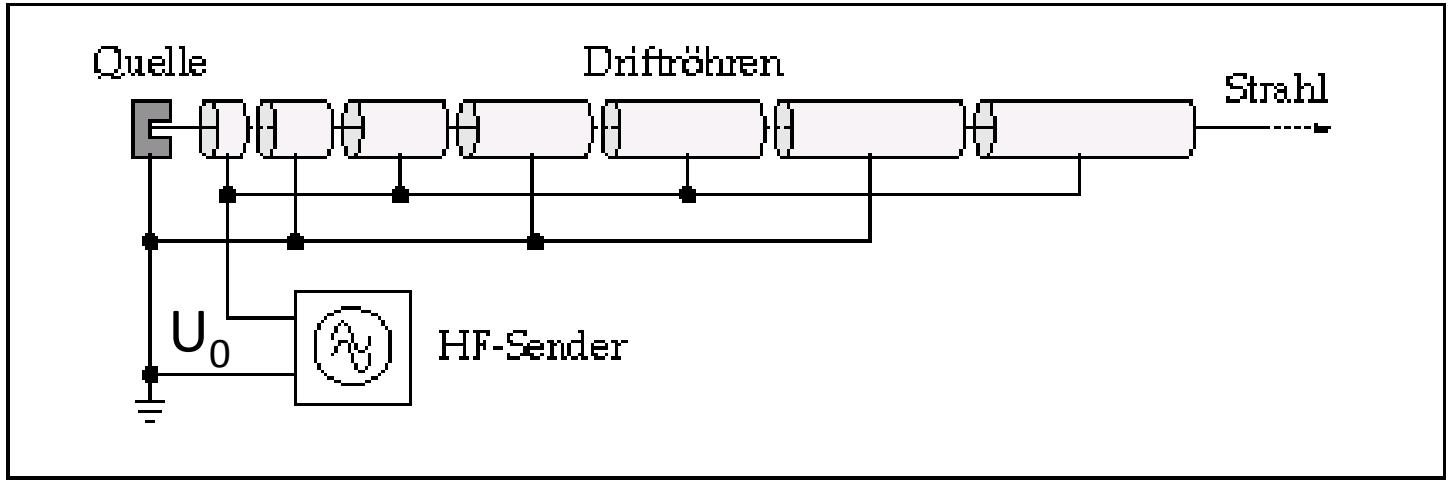
→ Niedrige Intensität, da nur ein Puls beschleunigt werden kann

- z.B. Separated Sector Cyclotron: Feld nimmt nach außen hin zu

→ Anderes Fokussierschema benötigt

Funktionsprinzipien eines modernen Linearbeschleunigers

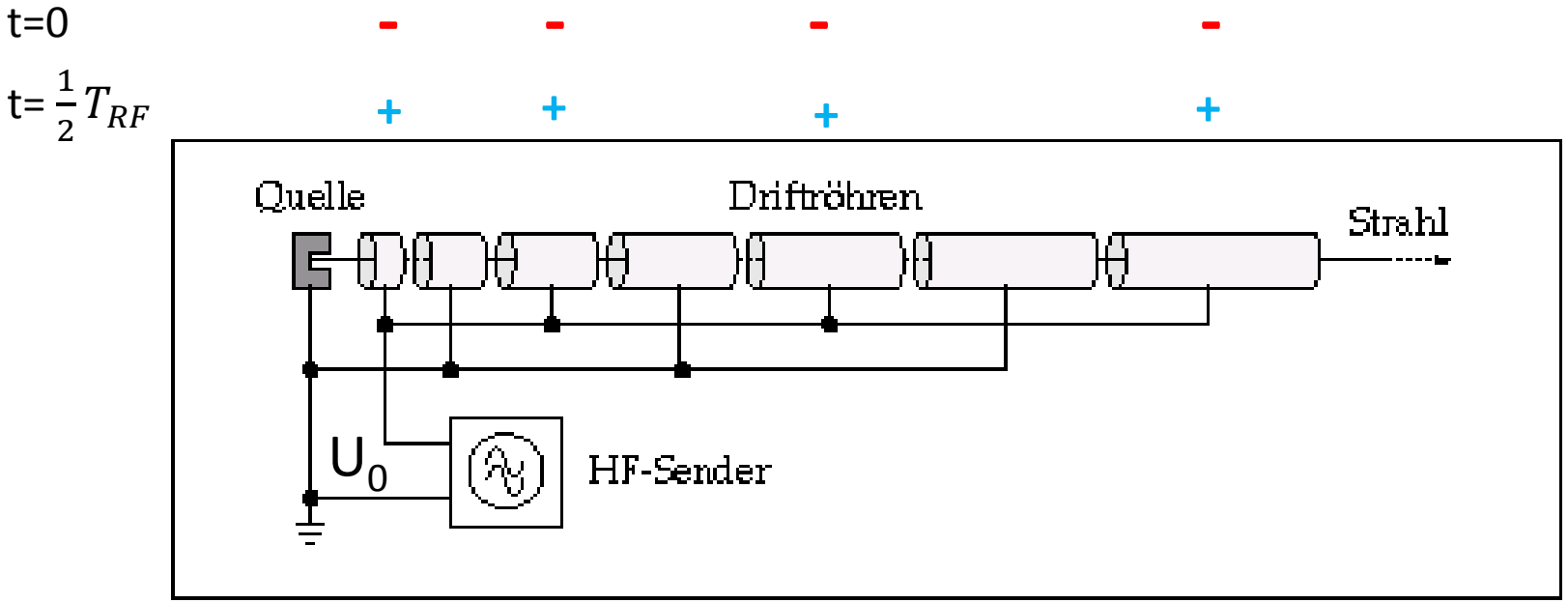
Der erste Linac: „Widerøe“-Beschleuniger



- 1924 vorgeschlagen von Ising,
  erste Maschine 1929 von Widerøe (25 kV, 1 MHz, 2 Gaps)
- Abschirmung der Teilchen in der negativen Halbwelle des Feldes
- Teilchenenergie nach n Spalten: $E_n = n \cdot q \cdot U_0 \cdot \cos \varphi_s$ Sollphase

Teilchenladung Generatorspannung

Der erste Linac: „Widerøe“-Beschleuniger



Synchronisation mit der RF:

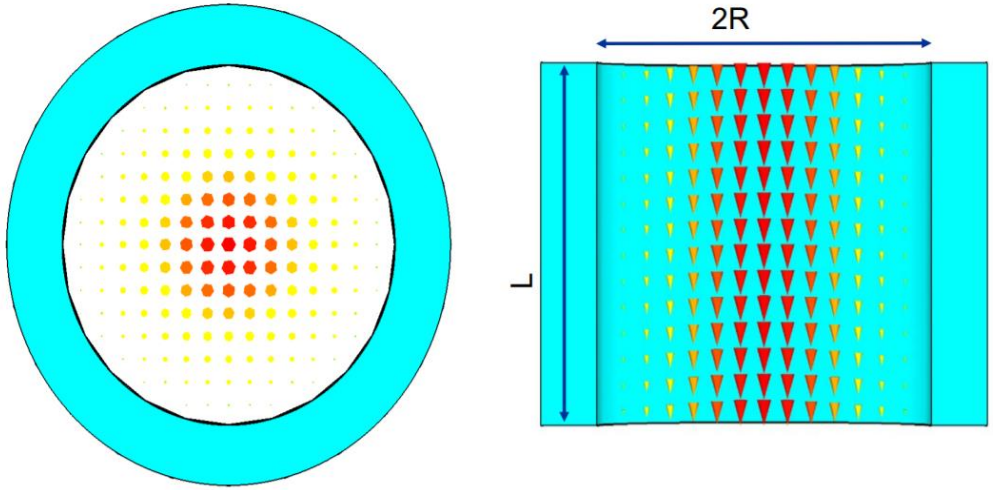
- Dauer der Halbwelle: $t = \frac{1}{2}T_{RF} = \frac{1}{2f}$
- Teilchengeschwindigkeit: $v = \sqrt{\frac{2E}{m}} = \sqrt{\frac{2nqU\sin\psi_s}{m}}$

$$L_n = \frac{1}{2f}\sqrt{\frac{2nqU\sin\psi_s}{m}}$$

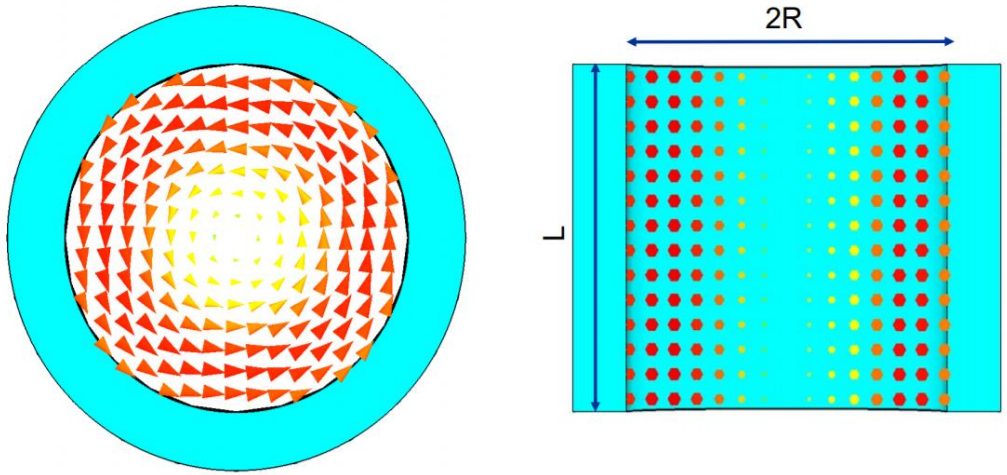
Für Widerøe’s Na-Strahl: 22.9 & 32.3 cm!

Grundlage moderner Linacs: Hohlraumresonatoren

E-Feld (zu t = 0):

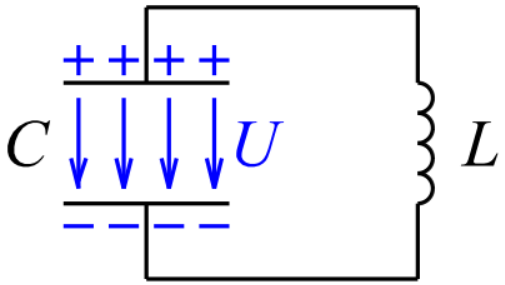


B-Feld (zu t = $T_{rf}/4$):



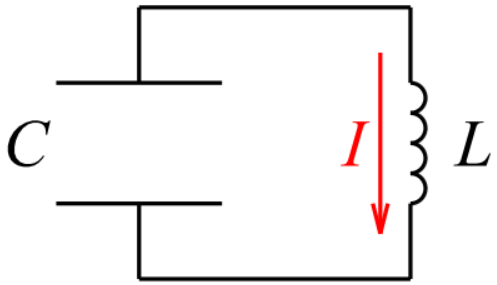
$$U = \max \qquad I = 0$$

$$W = \frac{1}{2}\, C\, U^2$$



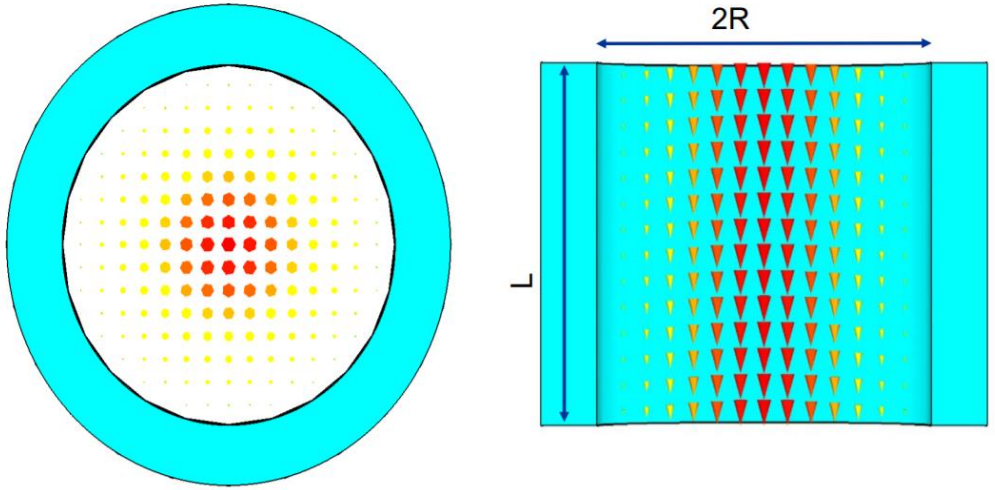
$$U = 0 \qquad I = \max$$

$$W = \frac{1}{2}\, L\, I^2$$

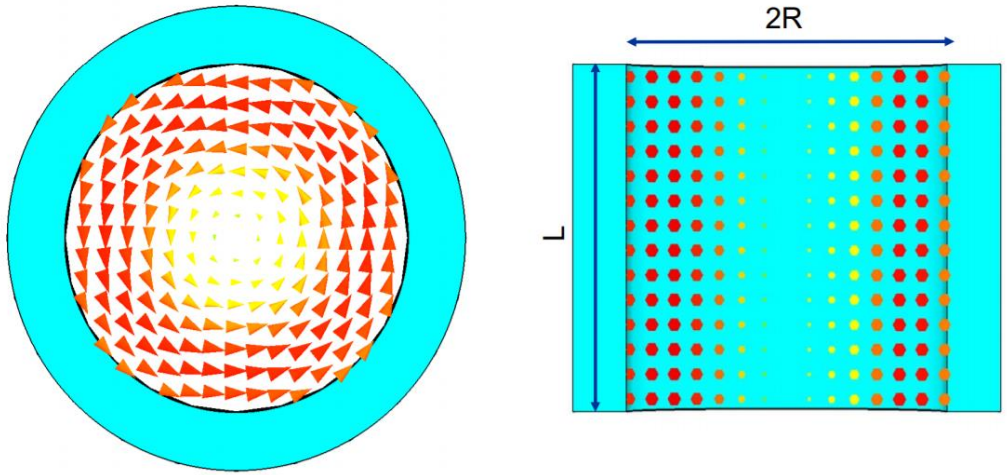


Grundlage moderner Linacs: Hohlraumresonatoren

E-Feld (zu t = 0):



B-Feld (zu t = T_{rf}/4):



Niedrigste Schwingungsmode in einem zylindrischen Resonator:

$$f_{010} = 2.405 \frac{c}{2\pi R}$$

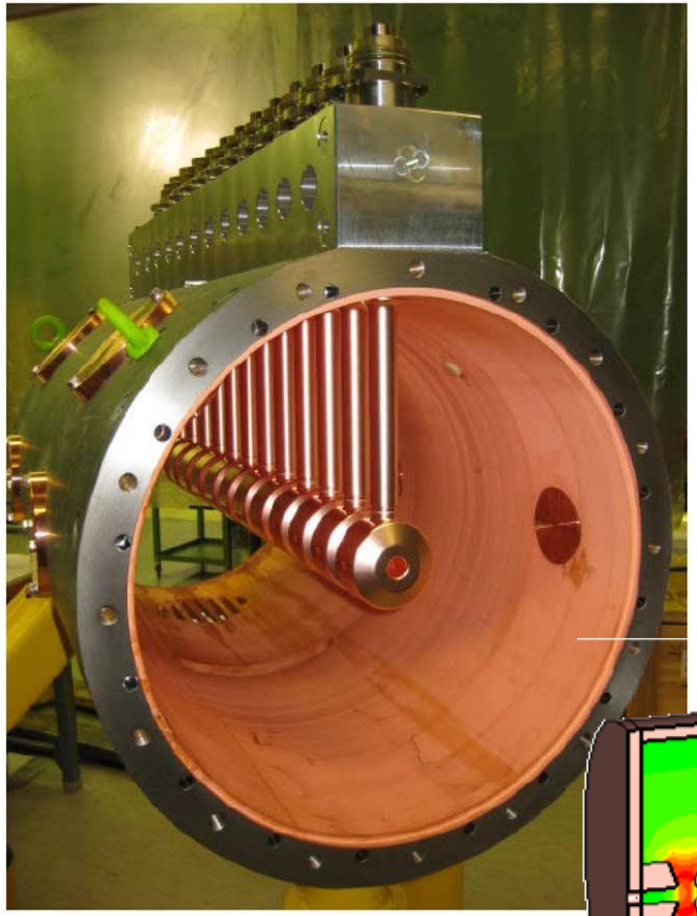
$$E_0 = \sqrt{\frac{3.08}{\pi c \varepsilon_0} \frac{Q_0 P}{LR}}$$

Zum Beispiel für
- R = 40 cm
- L = 1 m
- P = 1 MW
- Q = 40000

$$f_{010} = 286.9 \text{ MHz}$$

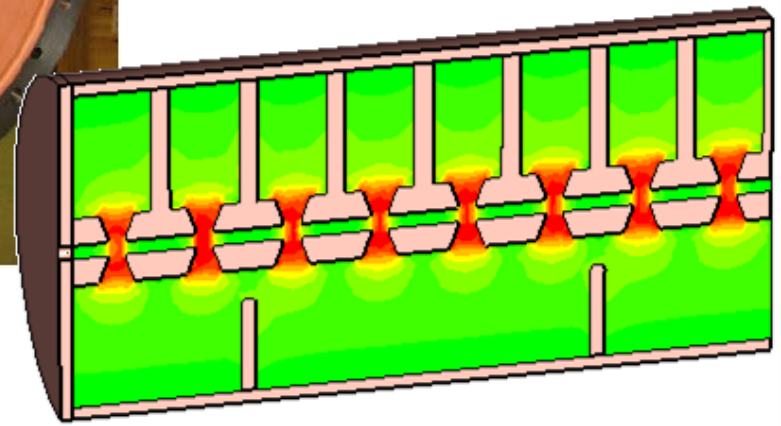
$$E_0 = 6.1 \frac{\text{MV}}{\text{m}}$$

Alvarez-Beschleuniger



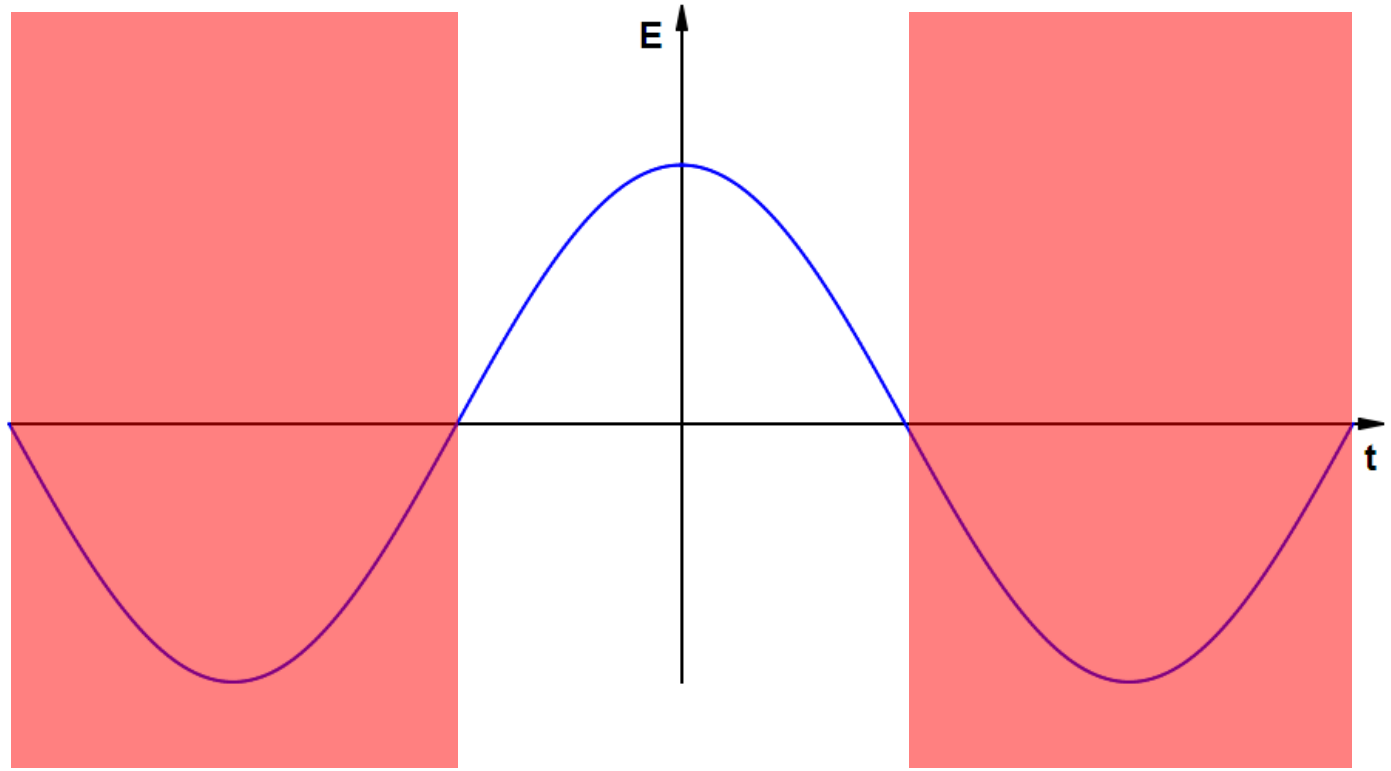
352 MHz-DTL, Linac4, CERN

- ... oder einfach DTL (Drift Tube Linac)
- Aus Kupfer oder kupferbeschichtet (el. Widerstand)
- Driftröhren:
  - Teilen die totale Spannung und konzentrieren das Feld auf die Achse
  - Feld zeigt zu einem Zeitpunkt nur in eine Richtung



- Über die Aufhängung fließt idealerweise kein Strom
- Enthalten (oft) Quadrupole zur Strahlfokussierung

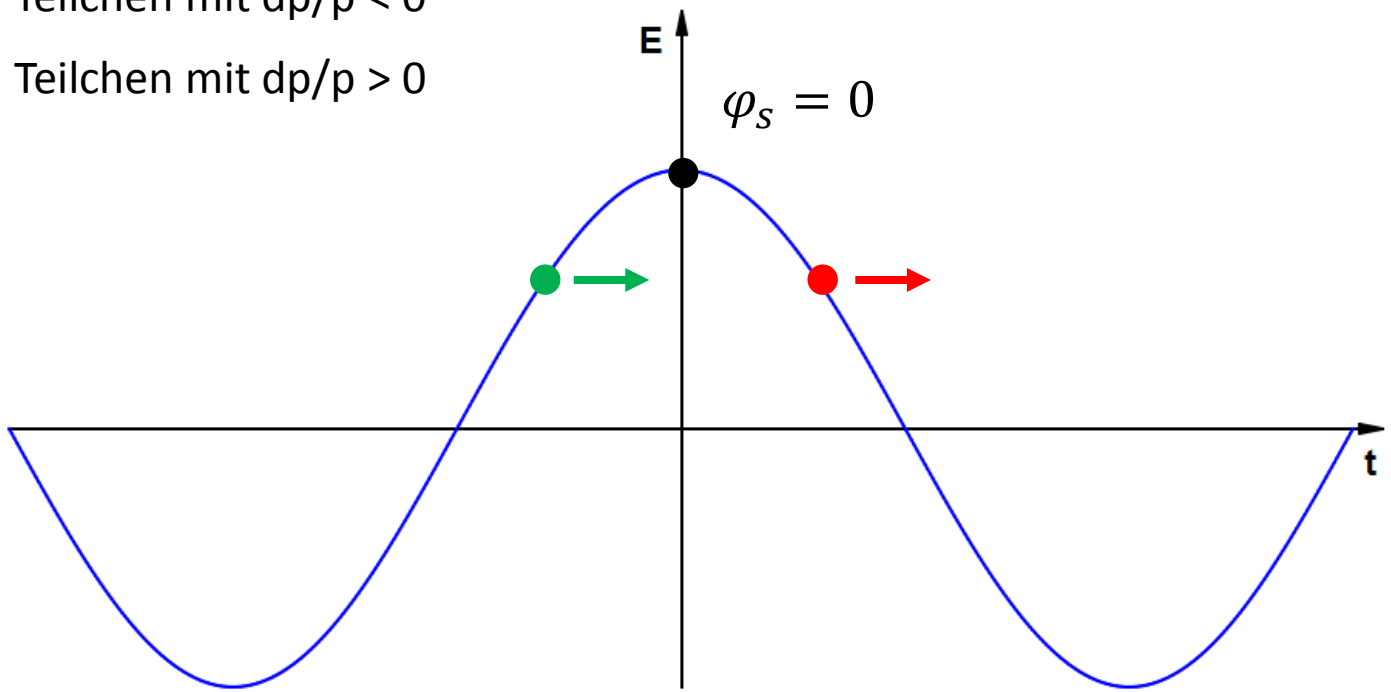
Phasenstabilität



- 180° ist das Feld abbremsend: ein RF-Linac beschleunigt also immer nur Pulse (Bunches)

Phasenstabilität

- Referenzteilchen
- Teilchen mit dp/p < 0
- Teilchen mit dp/p > 0



$$E_n = n \cdot q \cdot U_0 \cdot \cos\varphi_s$$

Sollphase

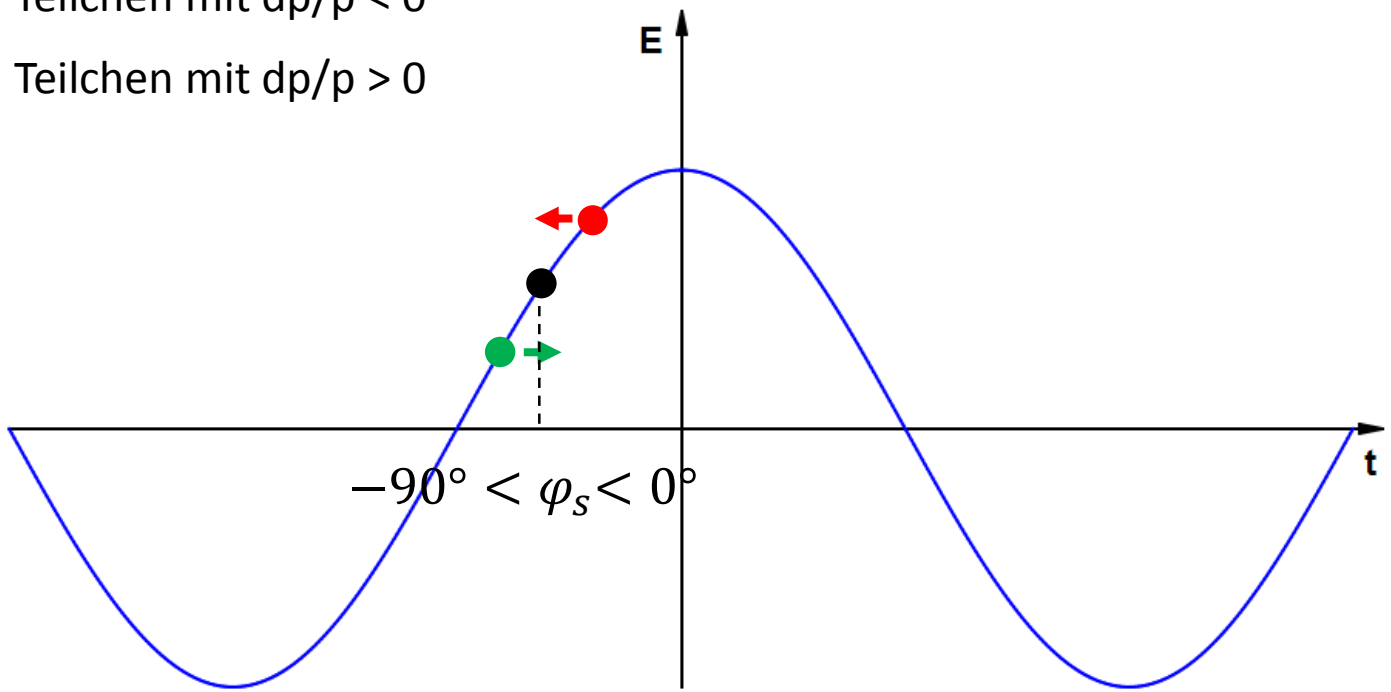
Teilchenladung

Generatorspannung

- 180° ist das Feld abbremsend: ein RF-Linac beschleunigt also immer nur Pulse (Bunches)
- Maximale Beschleunigung bei φ = 0°, aber instabil!

Phasenstabilität

- Referenzteilchen
- Teilchen mit dp/p < 0
- Teilchen mit dp/p > 0



$$E_n = n \cdot q \cdot U_0 \cdot \cos\varphi_s$$

Sollphase

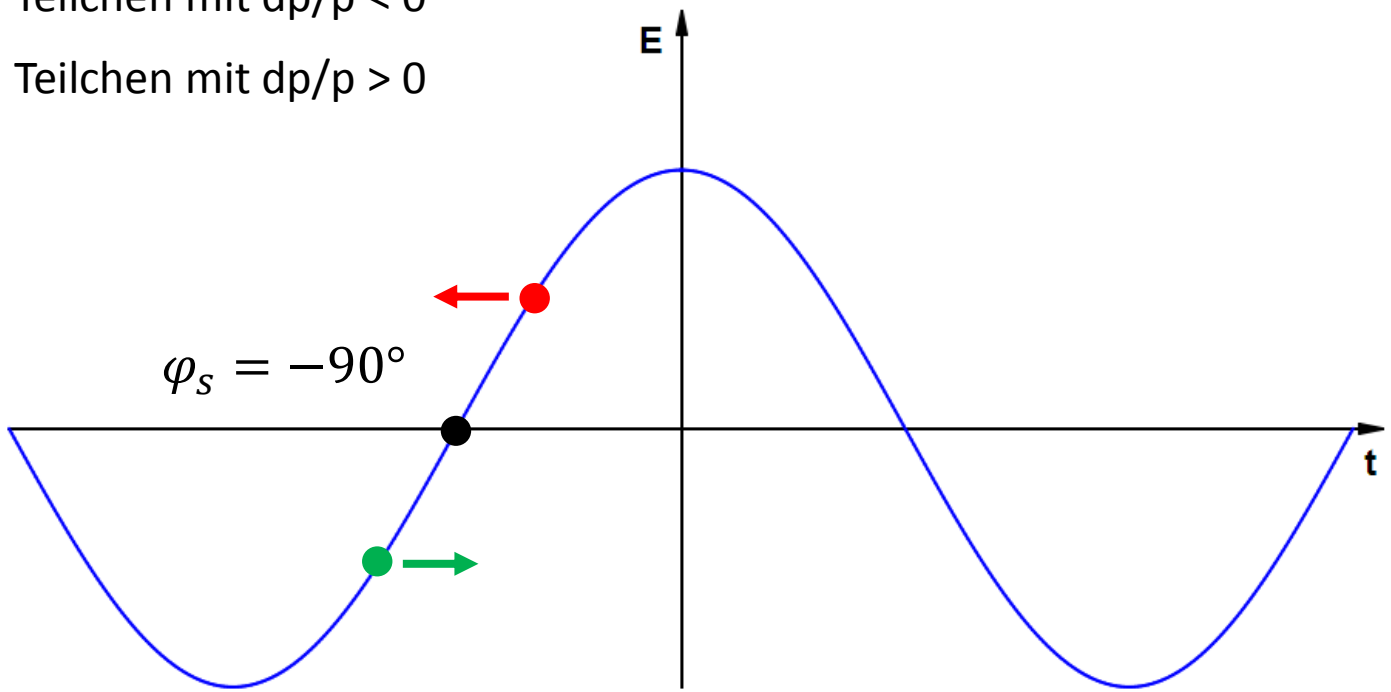
Teilchenladung

Generatorspannung

- 180° ist das Feld abbremsend: ein RF-Linac beschleunigt also immer nur Pulse (Bunches)
- Maximale Beschleunigung bei φ = 0°, aber instabil!
- Beschleunigung und stabile Pulse bei -90° < φ < 0°

Phasenstabilität

- Referenzteilchen
- Teilchen mit dp/p < 0
- Teilchen mit dp/p > 0



$$E_n = n \cdot q \cdot U_0 \cdot \cos\varphi_s$$

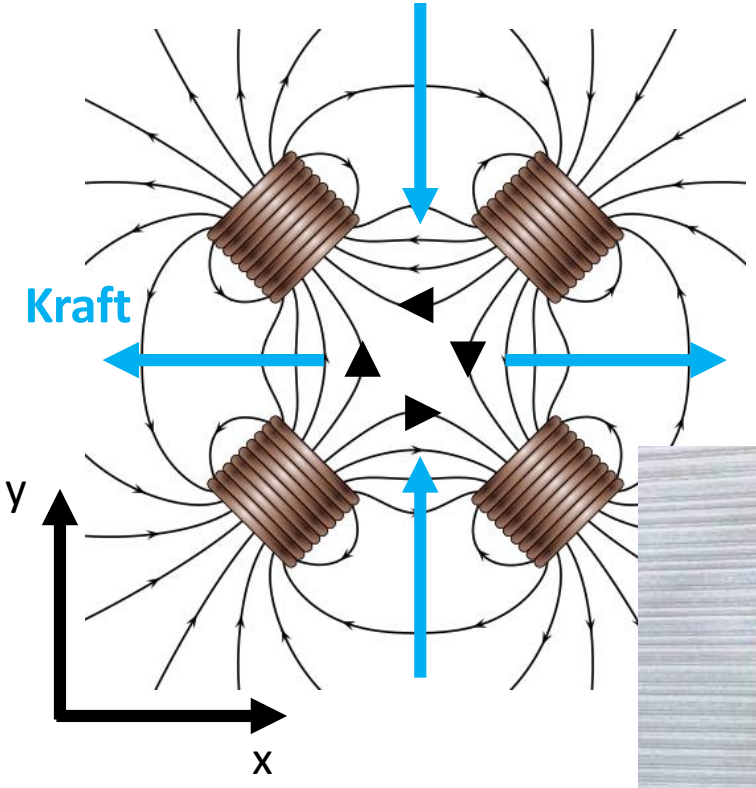
Sollphase

Teilchenladung

Generatorspannung

- 180° ist das Feld abbremsend: ein RF-Linac beschleunigt also immer nur Pulse (Bunches)
- Maximale Beschleunigung bei φ = 0°, aber instabil!
- Beschleunigung und stabile Pulse bei -90° < φ < 0°
- Maximale Phasenfokussierung bei φ = -90°: ein Buncher

Quadrupole und die starke Fokussierung



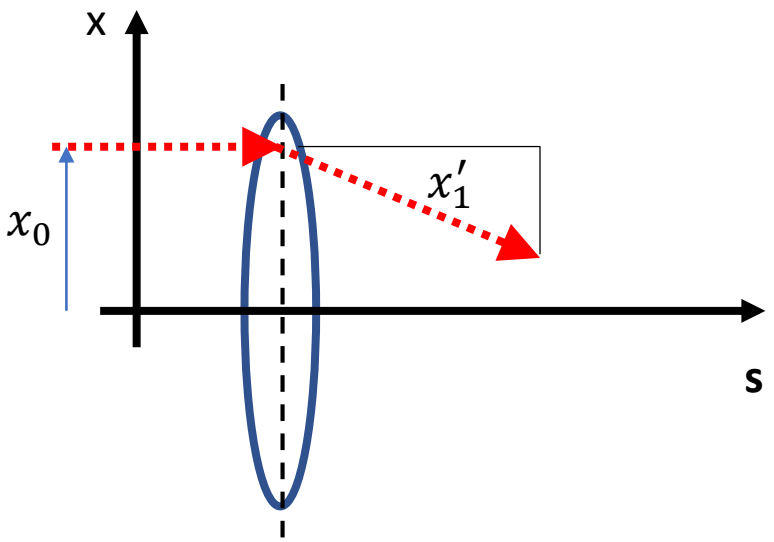
- Feld nimmt linear mit der Position zu

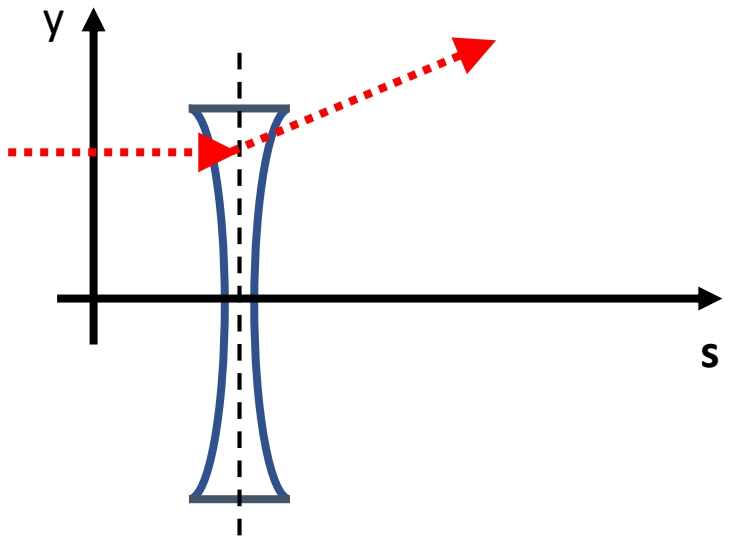
$$B_x(x,y) = g \cdot x$$

$$B_y(x,y) = g \cdot y$$

- Fokussiert den Strahl in einer Ebene, defokussierend in der anderen

Quadrupole und die starke Fokussierung





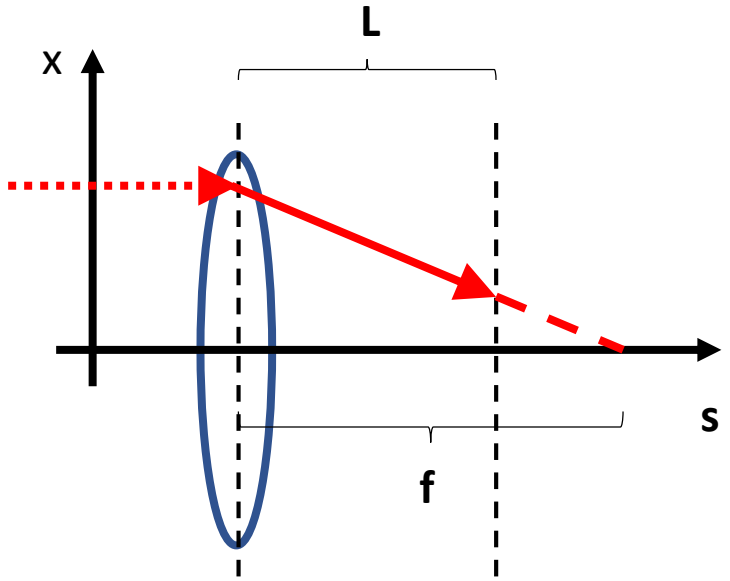
- Quadrupole mit Brennweite f
- Annahme: Quadrupole als dünne Linsen (gilt wenn L << f)
- Typische Werte: x ~ mm, x' ~ mrad (für Hadronenmaschinen)

$$M_{\text{fokussierend}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix}$$

$$M_{\text{defokussierend}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_1' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_0' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ x_0' - \frac{x_0}{f} \end{pmatrix}$$

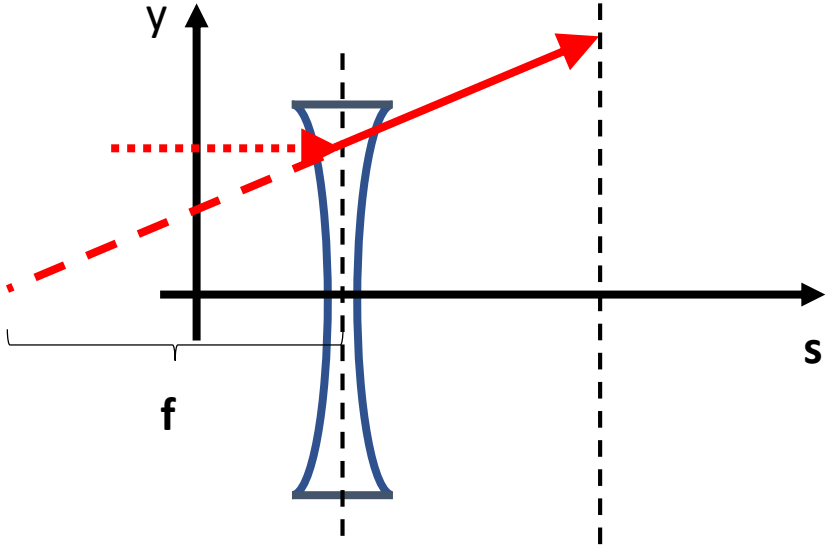
Quadrupole und die starke Fokussierung



$$M_{\mathrm{x}} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix}$$

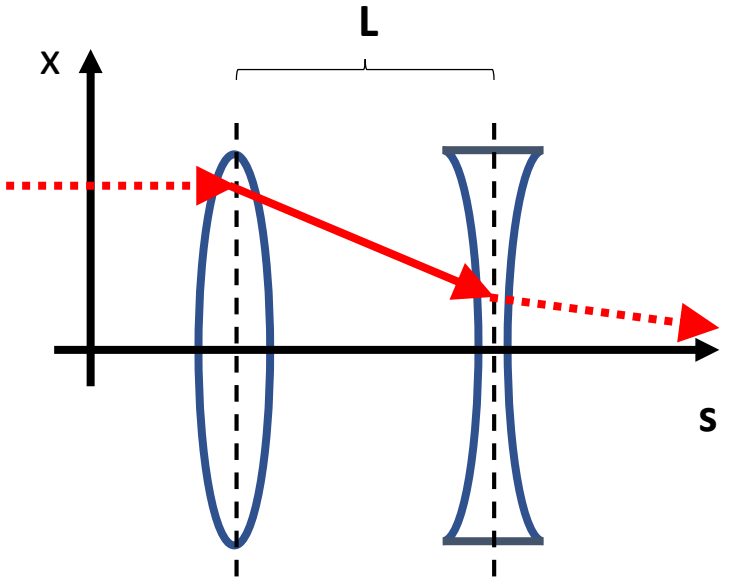
$$\begin{pmatrix} x_2 \\ x_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_1' \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} x_1 + L x_1' \\ x_1' \end{pmatrix}$$



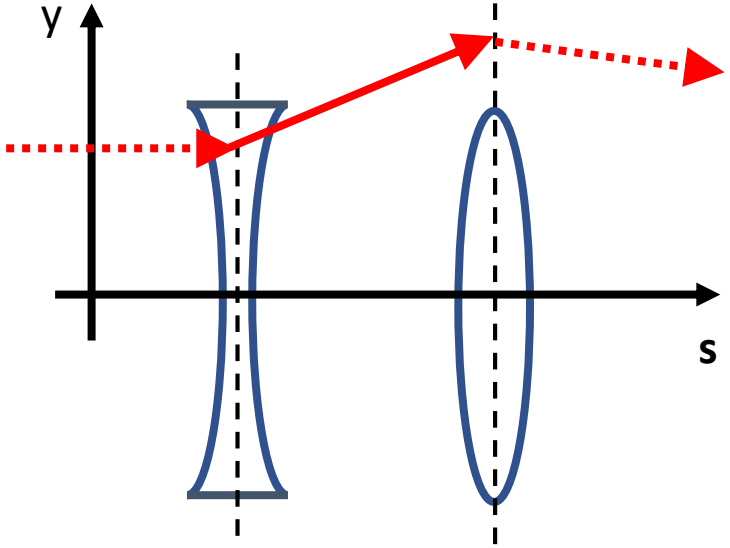
$$M_{\mathrm{y}} = \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix}$$

Quadrupole und die starke Fokussierung



$$M_{\mathrm{x}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{L}{f} & L \\ -\frac{L}{f^2} & 1 + \frac{L}{f} \end{pmatrix}$$

$$\xrightarrow{x_0' = 0} \quad x_1' = -\frac{L}{f^2} x_0$$

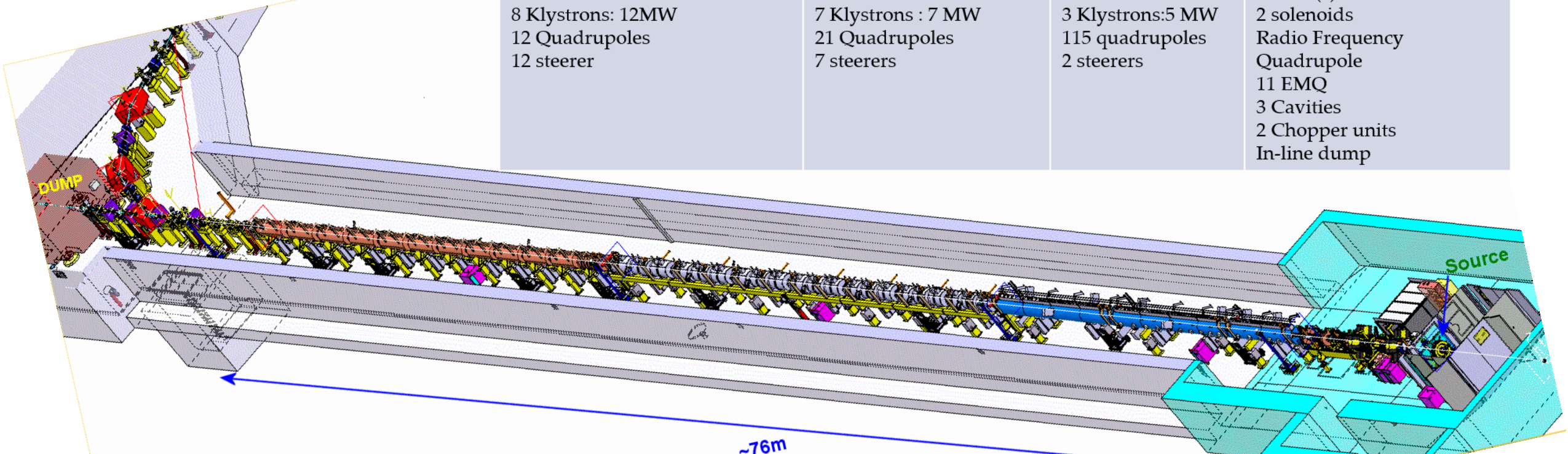


$$M_{\mathrm{y}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + \frac{L}{f} & L \\ -\frac{L}{f^2} & 1 - \frac{L}{f} \end{pmatrix}$$

$$\xrightarrow{y_0' = 0} \quad y_1' = -\frac{L}{f^2} y_0$$

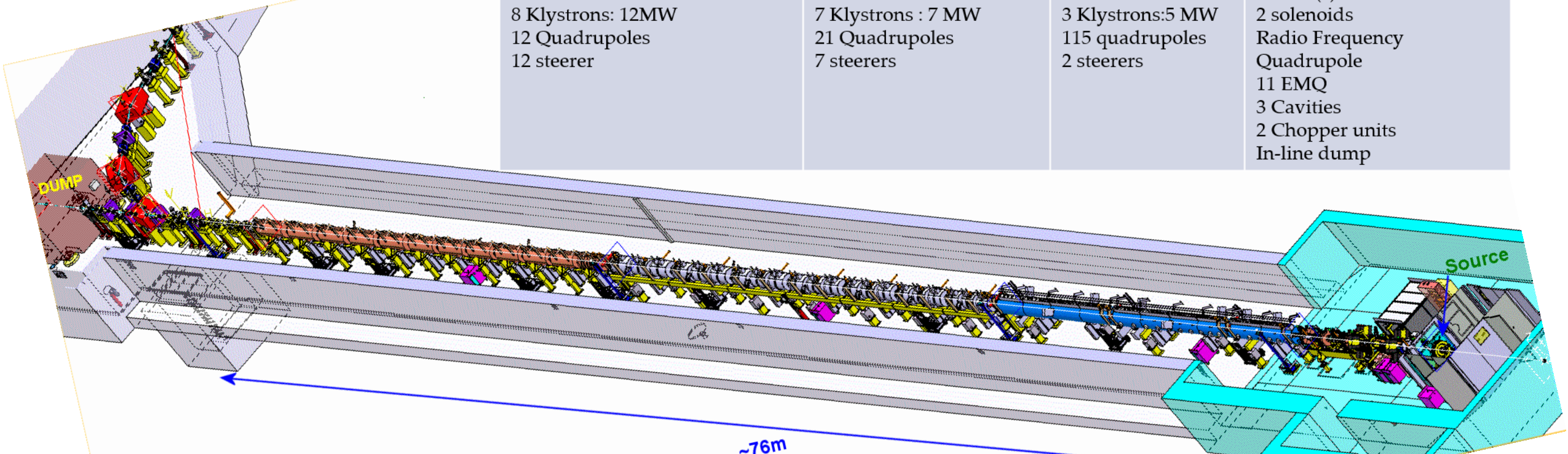
Linac4 als Beispiel eines modernen Linacs

LINAC4 machine layout- 352MHz			
Π-mode	CC-DTL	Drift Tube L	Pre-injector
160 MeV (beta=0.52)	100 MeV (beta=0.42)	50 MeV (beta=0.3)	3MeV (beta=0.08)
23 m 12 Modules 8 Klystrons: 12MW 12 Quadrupoles 12 steerer	25 m 7 Modules 7 Klystrons : 7 MW 21 Quadrupoles 7 steerers	19 m 3 Tanks 3 Klystrons:5 MW 115 quadrupoles 2 steerers	9 m Source(s) 2 solenoids Radio Frequency Quadrupole 11 EMQ 3 Cavities 2 Chopper units In-line dump



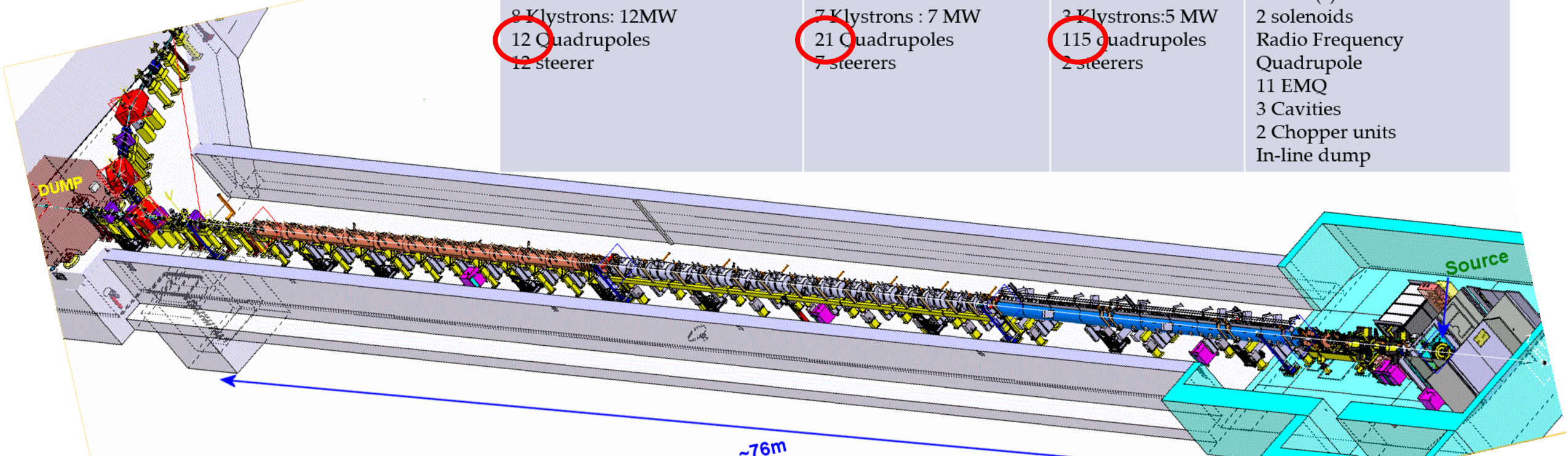
Linac4 als Beispiel eines modernen Linacs

LINAC4 machine layout- 352MHz			
Π-mode	CC-DTL	Drift Tube L	Pre-injector
160 MeV (beta=0.52)	100 MeV (beta=0.42)	50 MeV (beta=0.3)	3MeV (beta=0.08)
23 m 12 Modules 8 Klystrons: 12MW 12 Quadrupoles 12 steerer	25 m 7 Modules 7 Klystrons : 7 MW 21 Quadrupoles 7 steerers	19 m 3 Tanks 3 Klystrons:5 MW 115 quadrupoles 2 steerers	9 m Source(s) 2 solenoids Radio Frequency Quadrupole 11 EMQ 3 Cavities 2 Chopper units In-line dump

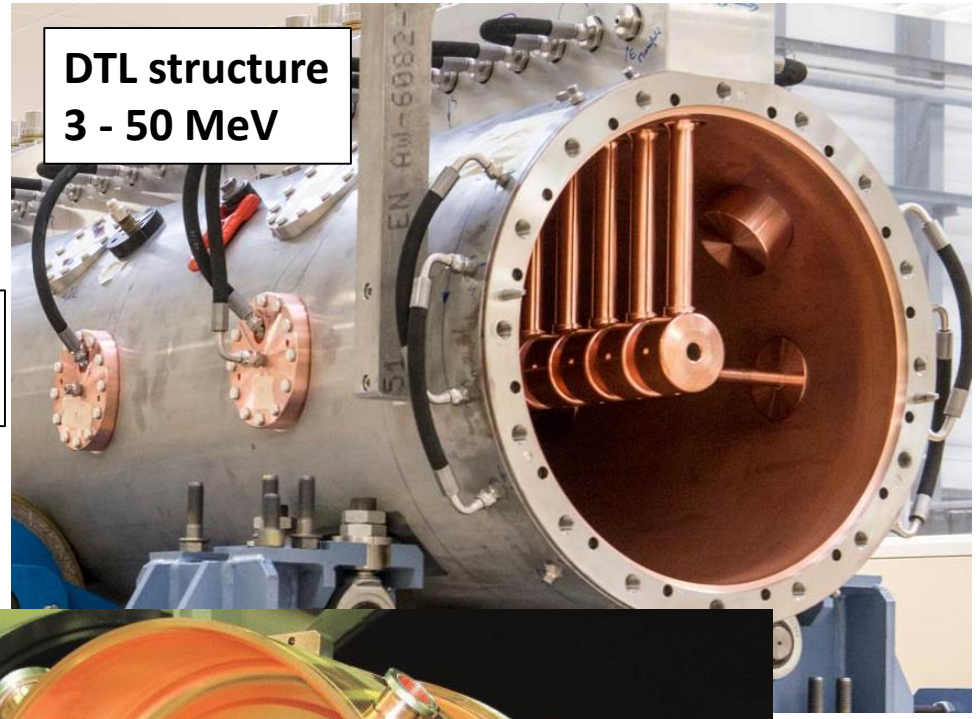


Linac4 als Beispiel eines modernen Linacs

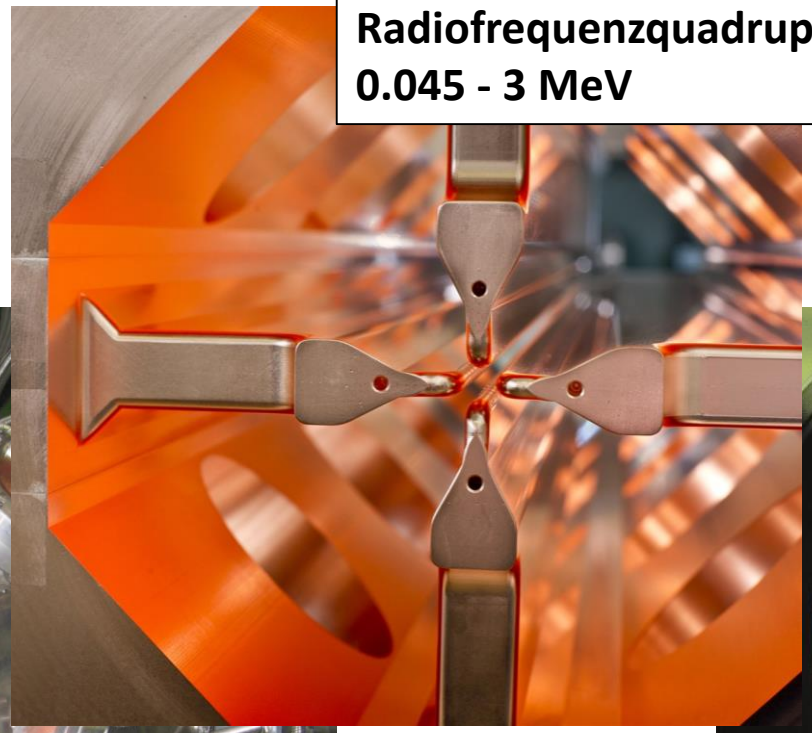
LINAC4 machine layout- 352MHz			
Π-mode	CC-DTL	Drift Tube L	Pre-injector
160 MeV (beta=0.52)	100 MeV (beta=0.42)	50 MeV (beta=0.3)	3MeV (beta=0.08)
23 m 12 Modules 8 Klystrons: 12MW 12 Quadrupoles 12 steerer	25 m 7 Modules 7 Klystrons : 7 MW 21 Quadrupoles 7 steerers	19 m 3 Tanks 3 Klystrons:5 MW 115 quadrupoles 2 steerers	9 m Source(s) 2 solenoids Radio Frequency Quadrupole 11 EMQ 3 Cavities 2 Chopper units In-line dump



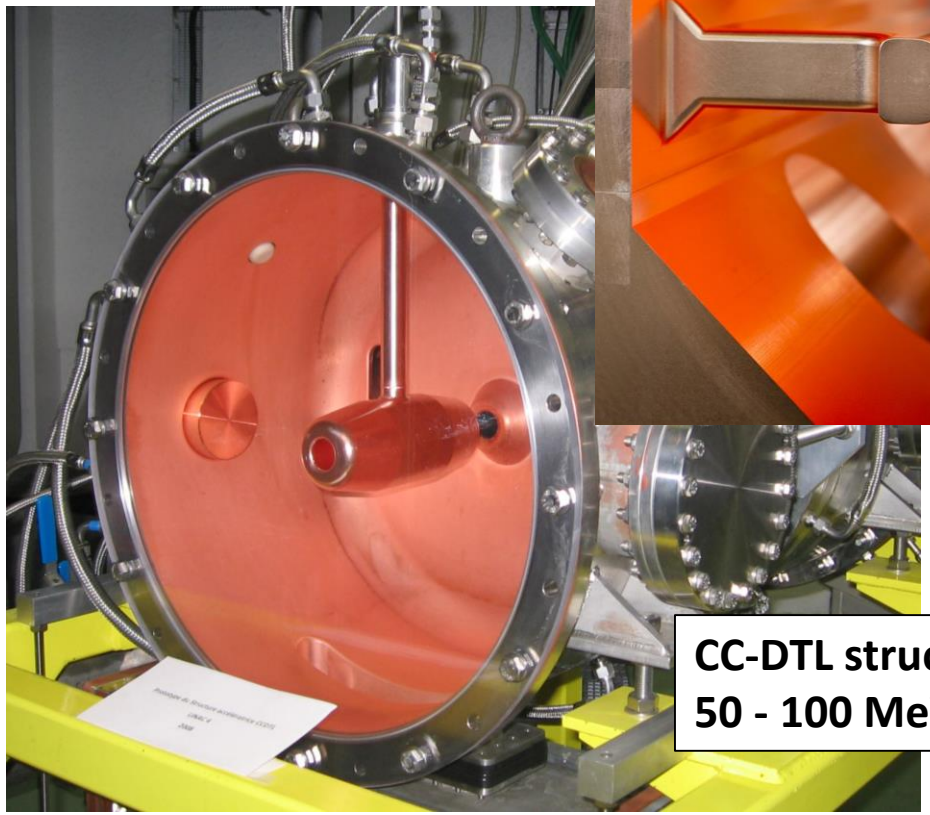
Kavitätenzoo...



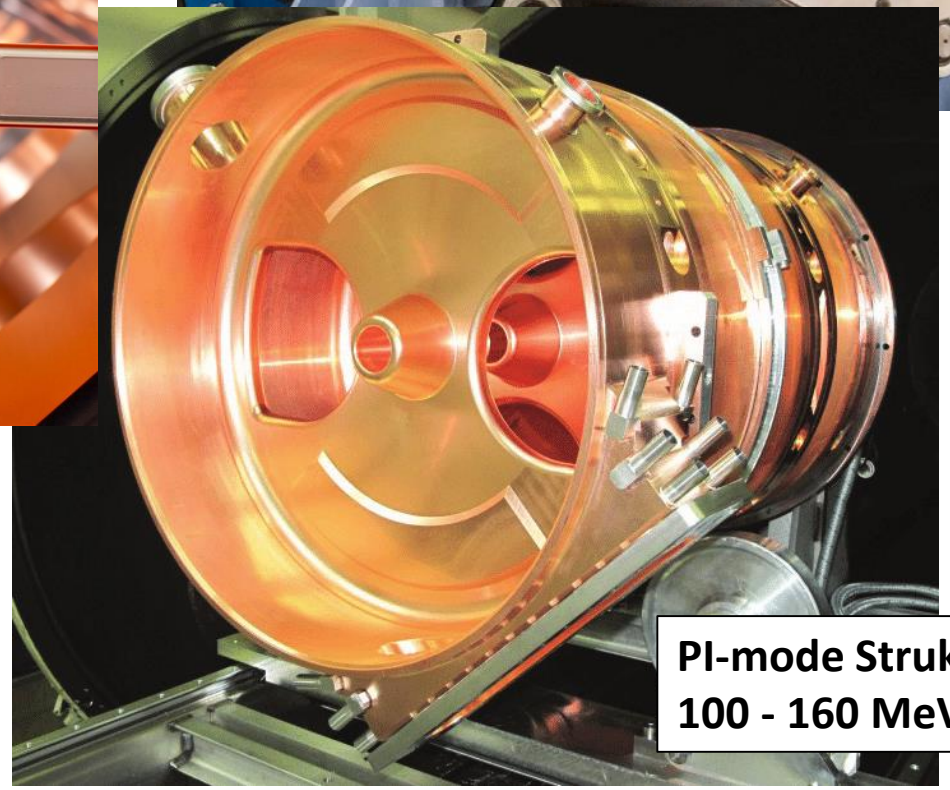
DTL structure
3 - 50 MeV



Radiofrequenzquadrupol
0.045 - 3 MeV

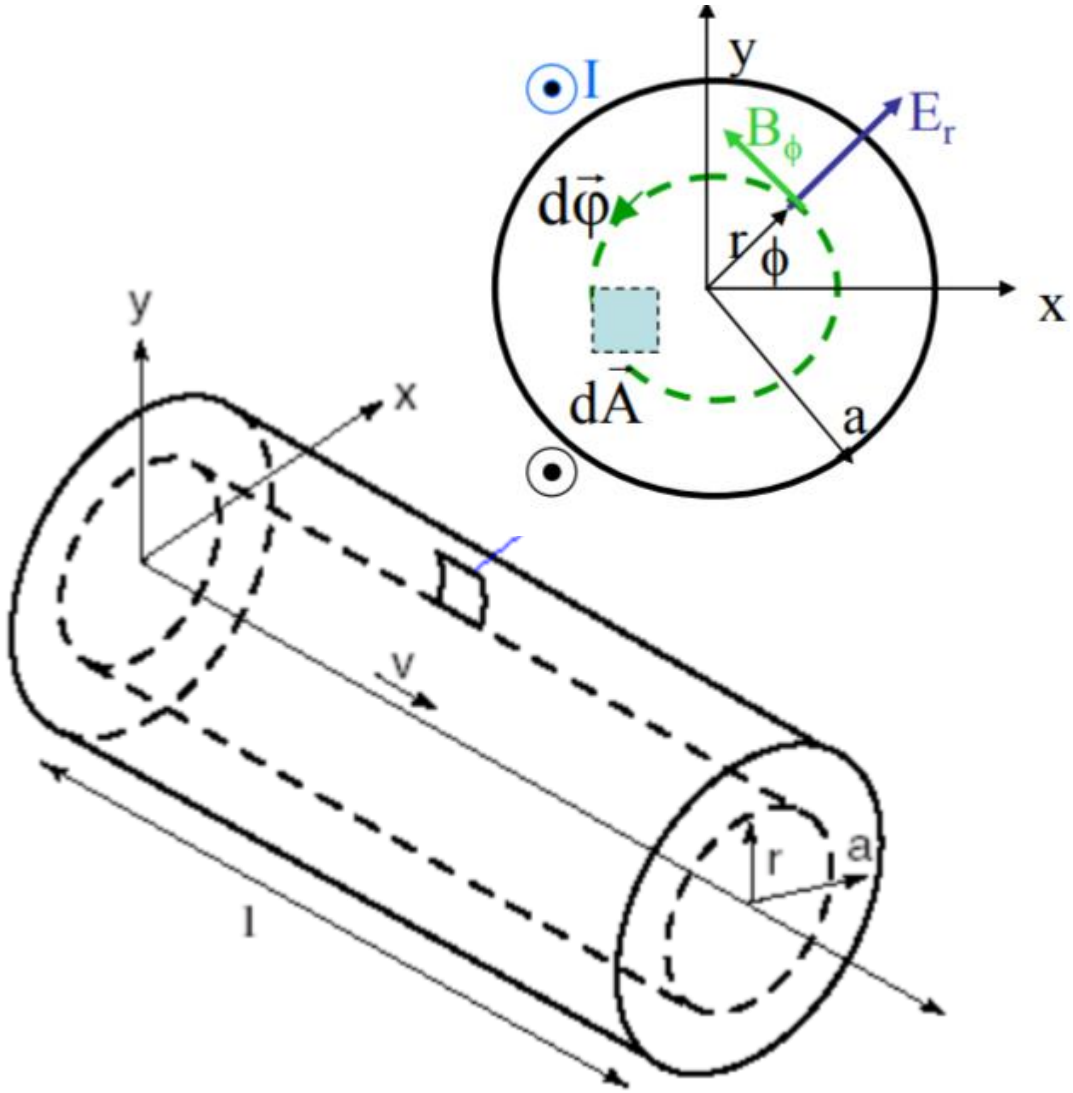


CC-DTL structure
50 - 100 MeV



PI-mode Struktur
100 - 160 MeV

Raumladung



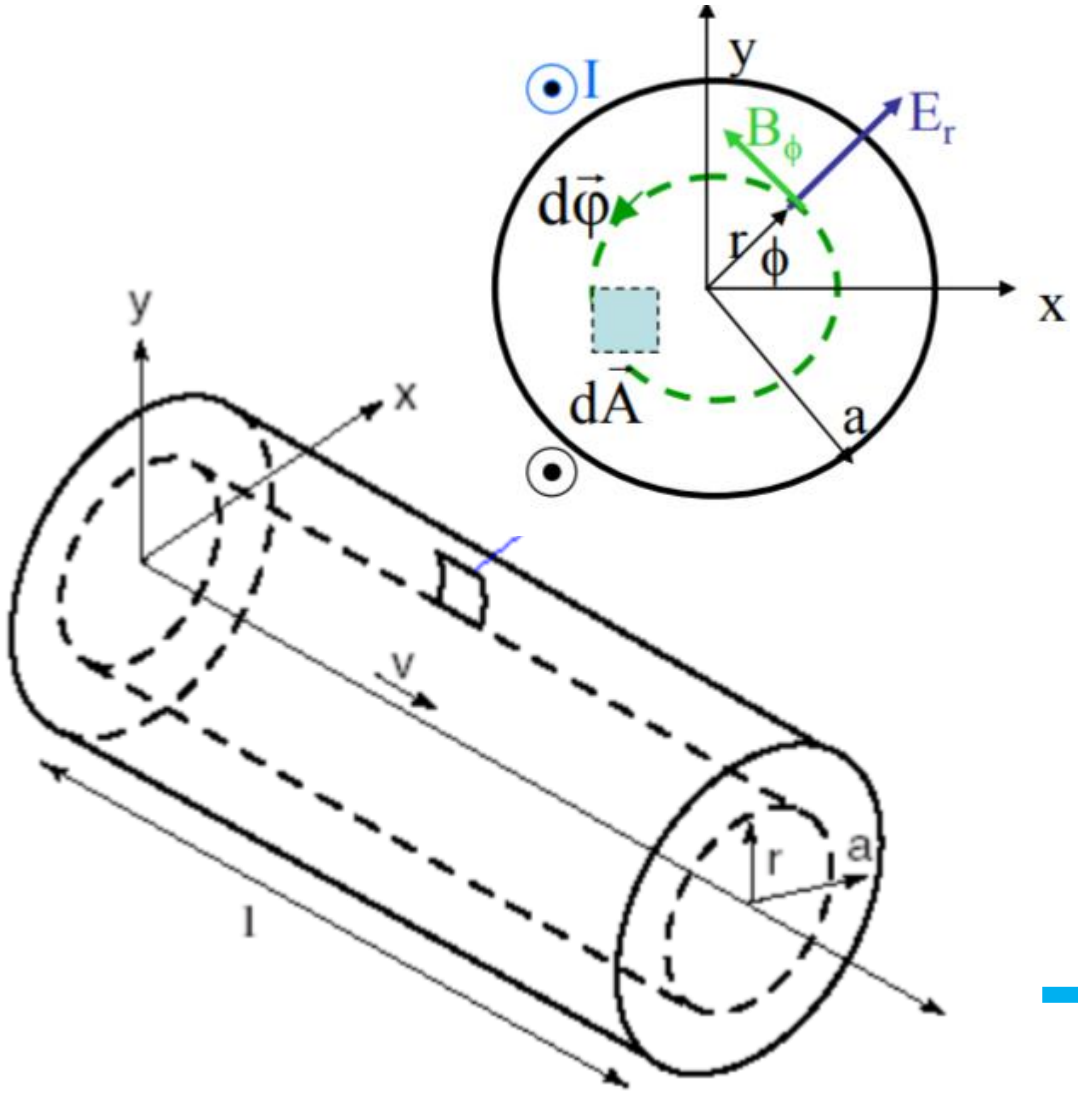
- Ionenstrahl erzeugt elektrische und magnetische Felder
- Radiales elektrisches Feld:

$$E_\mathrm{r} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\frac{I}{v}\frac{r}{a^2} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\frac{I}{\beta \mathrm{c}}\frac{r}{a^2}$$

- Azimutales magnetisches Feld:

$$B_\varphi = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\frac{I}{c^2}\frac{r}{a^2}$$

Raumladung



- Ionenstrahl erzeugt elektrische und magnetische Felder
- Radiales elektrisches Feld:

$$E_\mathrm{r} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\frac{I}{v}\frac{r}{a^2} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\frac{I}{\beta \mathrm{c}}\frac{r}{a^2}$$

- Azimutales magnetisches Feld:

$$B_\varphi = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\frac{I}{c^2}\frac{r}{a^2}$$

- Kraft auf ein Teilchen mit v = ß·c

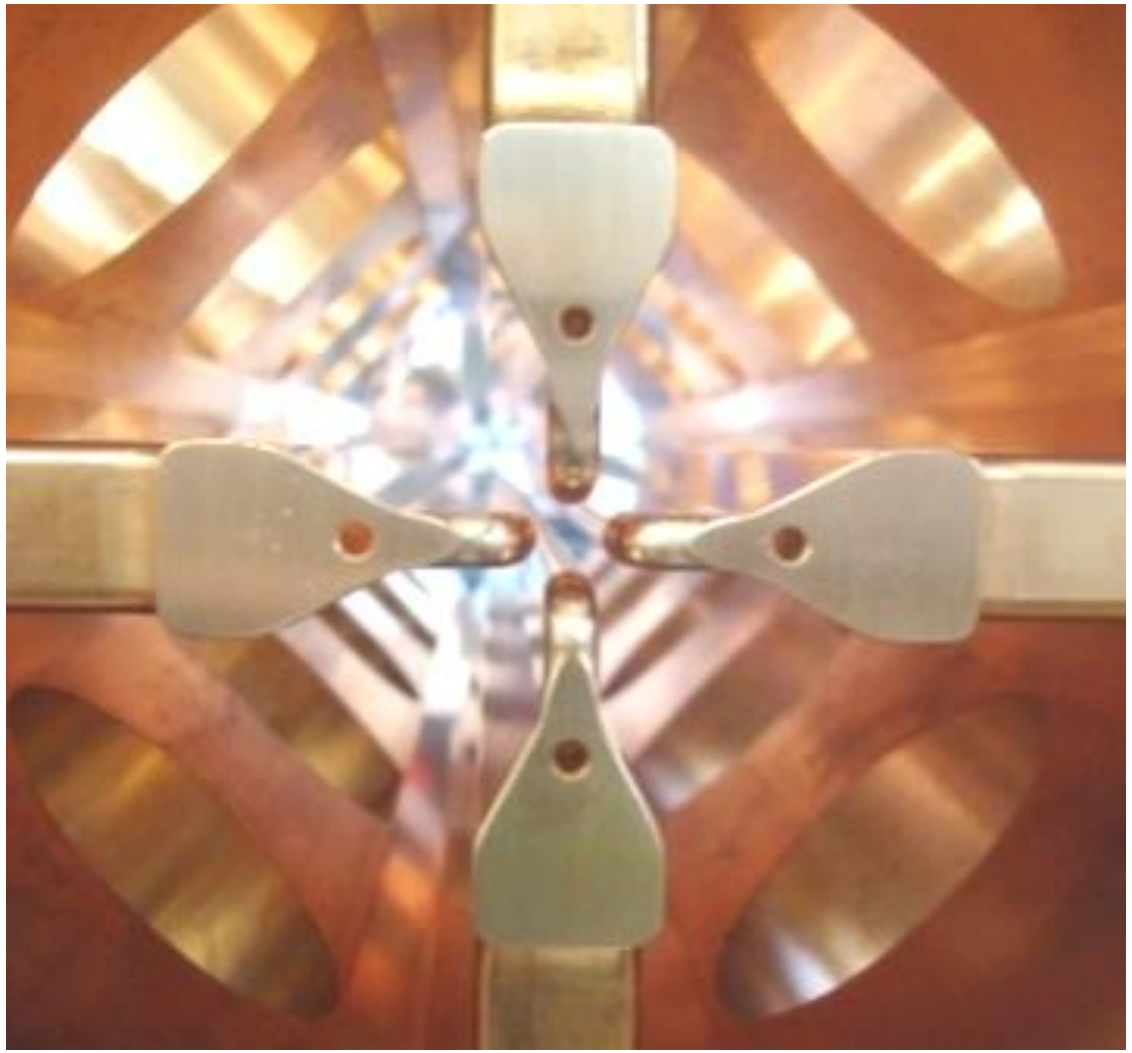
$$F_\mathrm{r} = q\left(E_\mathrm{r} - \beta \mathrm{c} B_\varphi\right)$$

$$= \frac{q}{2\pi\varepsilon_0}\frac{I}{\beta \mathrm{c}}(1-\beta^2)\frac{r}{a^2}$$

Kein Problem bei hoher Energie (v = c)
Starker Effekt bei v << c

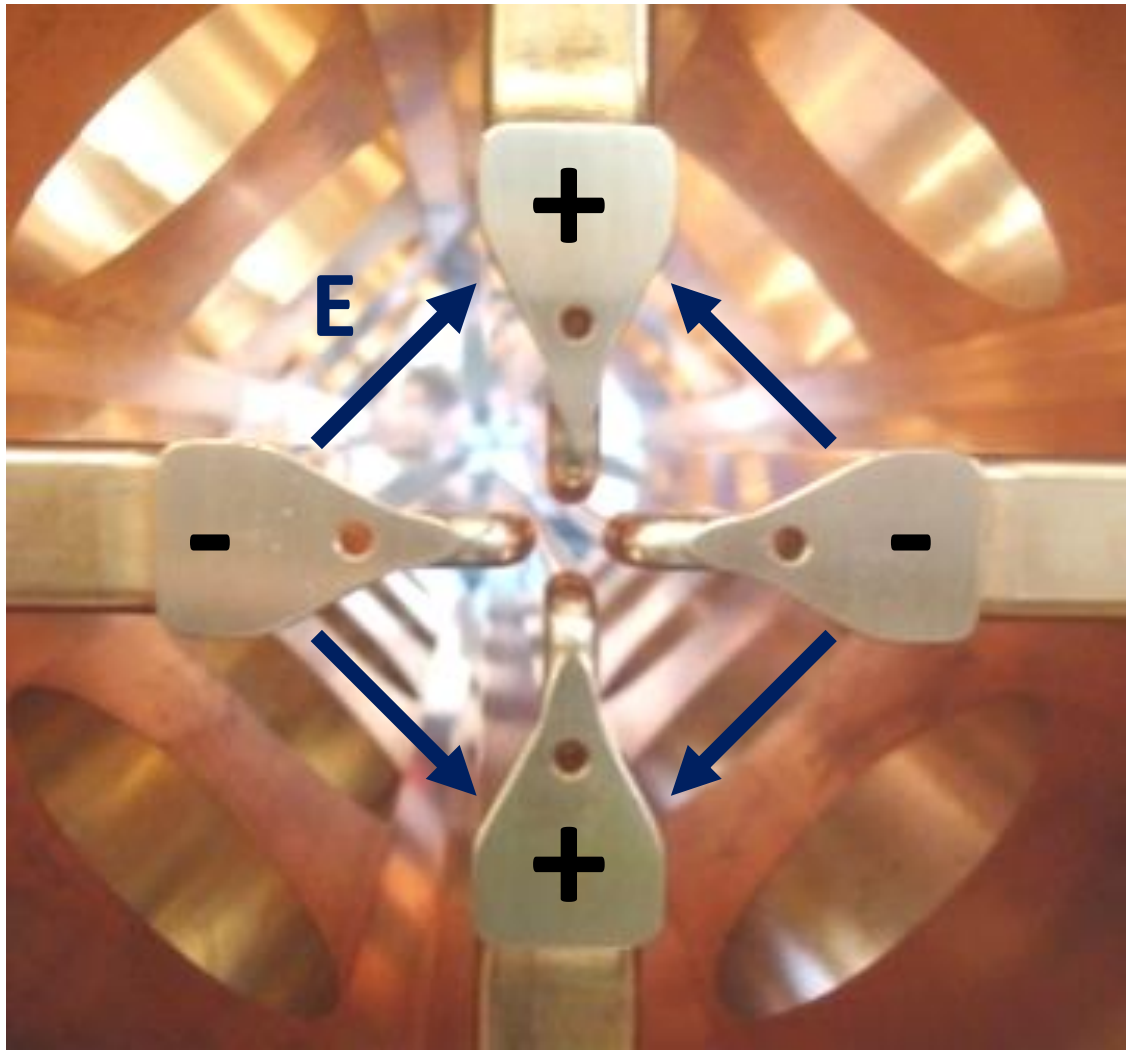
Radiofrequenzquadrupol

- Kavität mit einem (hauptsächlich) transversalem Feld
- Vorgeschlagen 1970, ersetzt seit den 80ern elektrostatische Vorbeschleuniger
- Erfüllt drei Aufgaben:
  - Sanftes Bunchen des Strahls
  - Starke transversale Fokussierung
  - Beschleunigung
- Nicht sehr effizient, s. z.B. Linac4
  - RFQ: ≈ 1 MeV/m
  - DTL1: ≈ 2.4 MeV/m



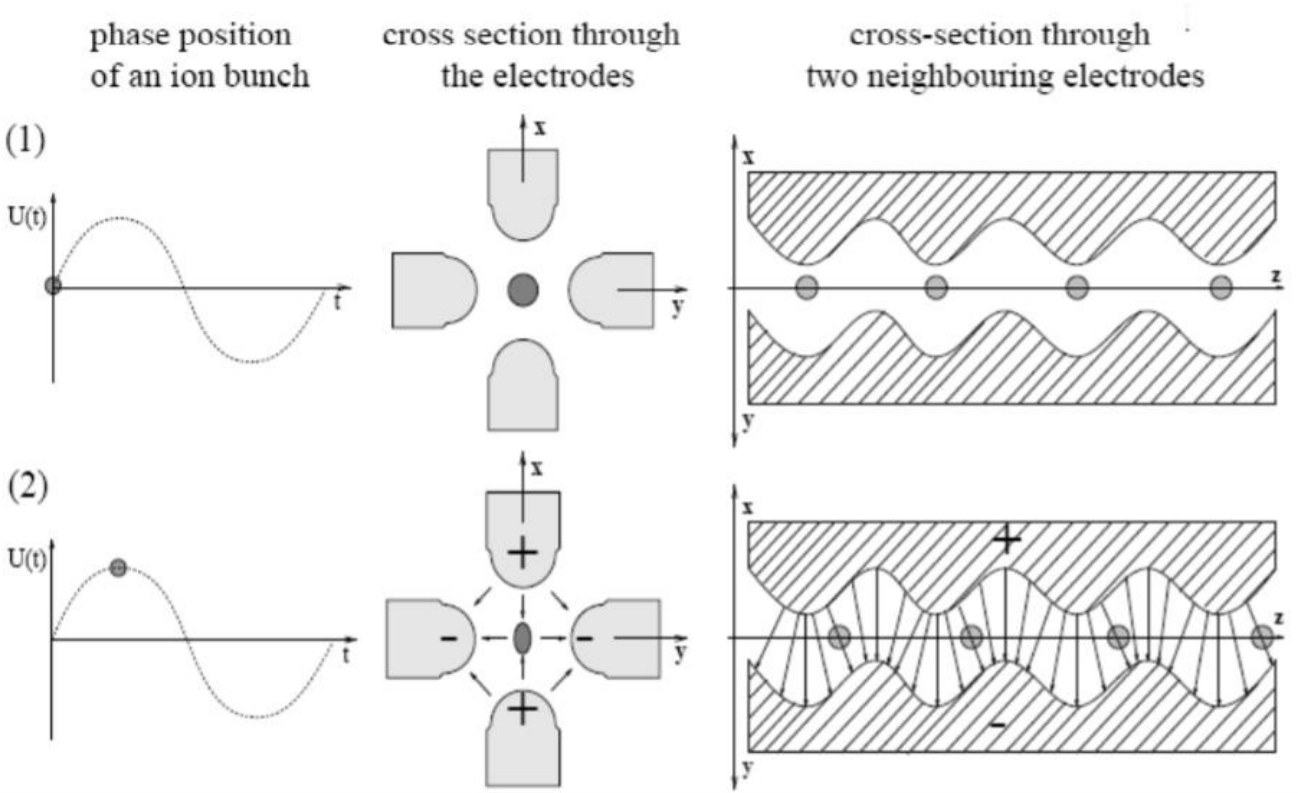
Radiofrequenzquadrupol

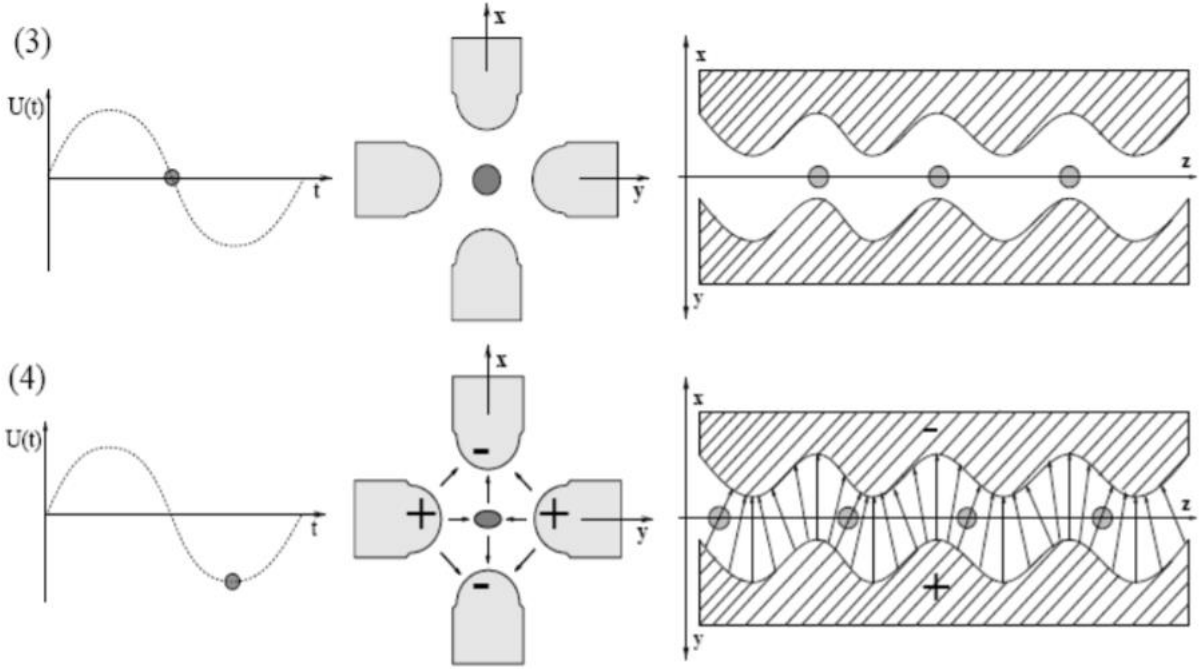
- Kavität mit einem (hauptsächlich) transversalem Feld
- Vorgeschlagen 1970, ersetzt seit den 80ern elektrostatische Vorbeschleuniger
- Erfüllt drei Aufgaben:
  - Sanftes Bunchen des Strahls
  - Starke transversale Fokussierung
  - Beschleunigung
- Nicht sehr effizient, s. z.B. Linac4
  - RFQ: ≈ 1 MeV/m
  - DTL1: ≈ 2.4 MeV/m



Radiofrequenzquadrupol

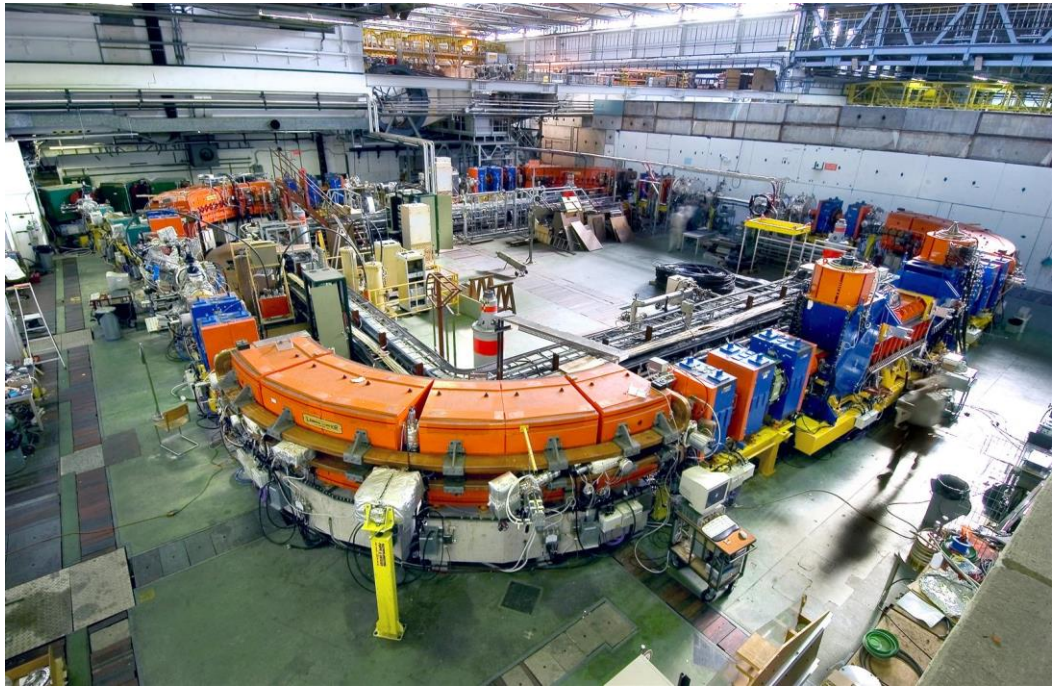
- Transversale Fokussierung:
  selbst Prinzip -- starke Fokussierung
- Aufprägen einer Modulation erzeugt ein longitudinales Feld





Moderne Hochenergiebeschleuniger: Synchrotrons

Synchrotrons



Low Energy Ion Ring @ CERN

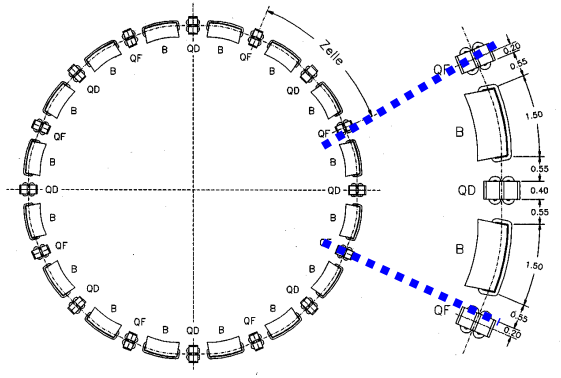
- Änderung von B **synchron** mit den Teilchen:

E ↗ γ ↗ **B** ↗

$$f_{\mathrm{RF}} =$$

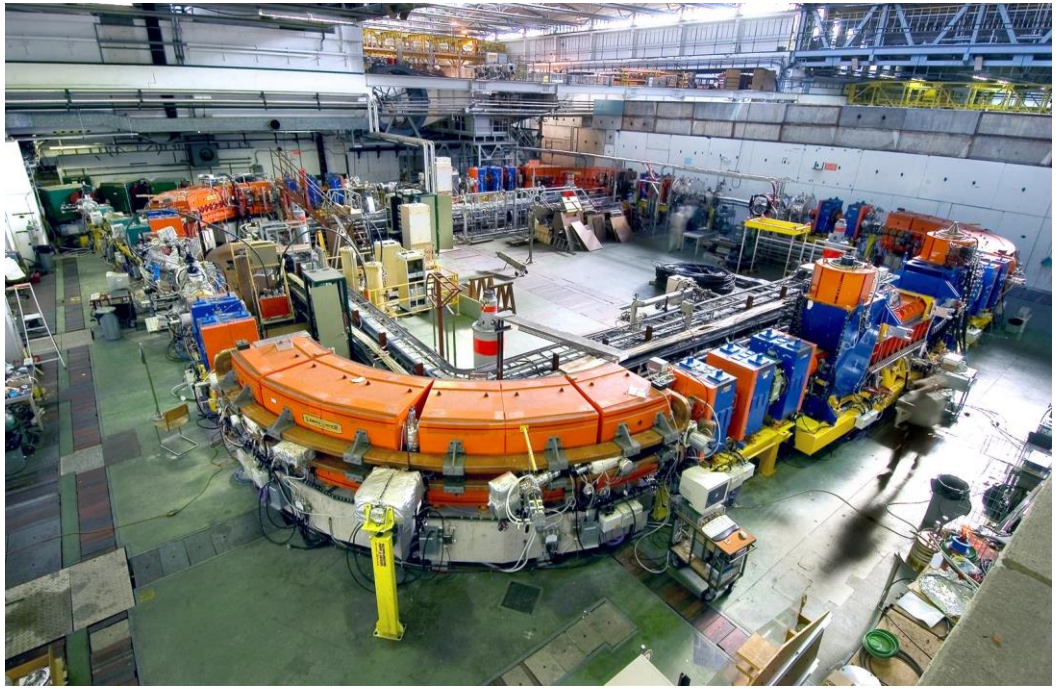
$$R = \frac{\gamma m v}{qB}$$

- „Fixed Function Magnets“
  - Dipole zur Ablenkung
  - Quadrupole zur Fokussierung
  - …



- Synchrotrons brauchen einen Vorbeschleuniger

Synchrotrons



Low Energy Ion Ring @ CERN

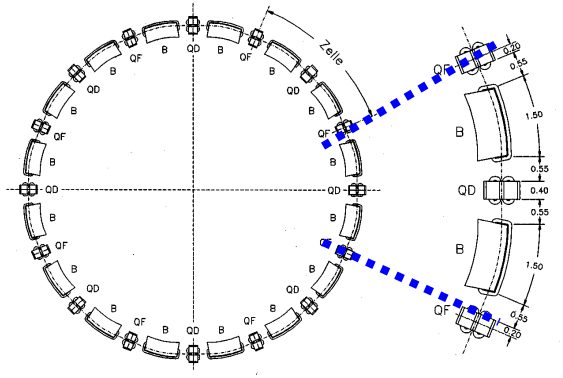
- Änderung von B **synchron** mit den Teilchen:

E ↗ γ ↗ **B** ↗

$$f_{\mathrm{RF}} = \frac{v}{L} \nearrow$$

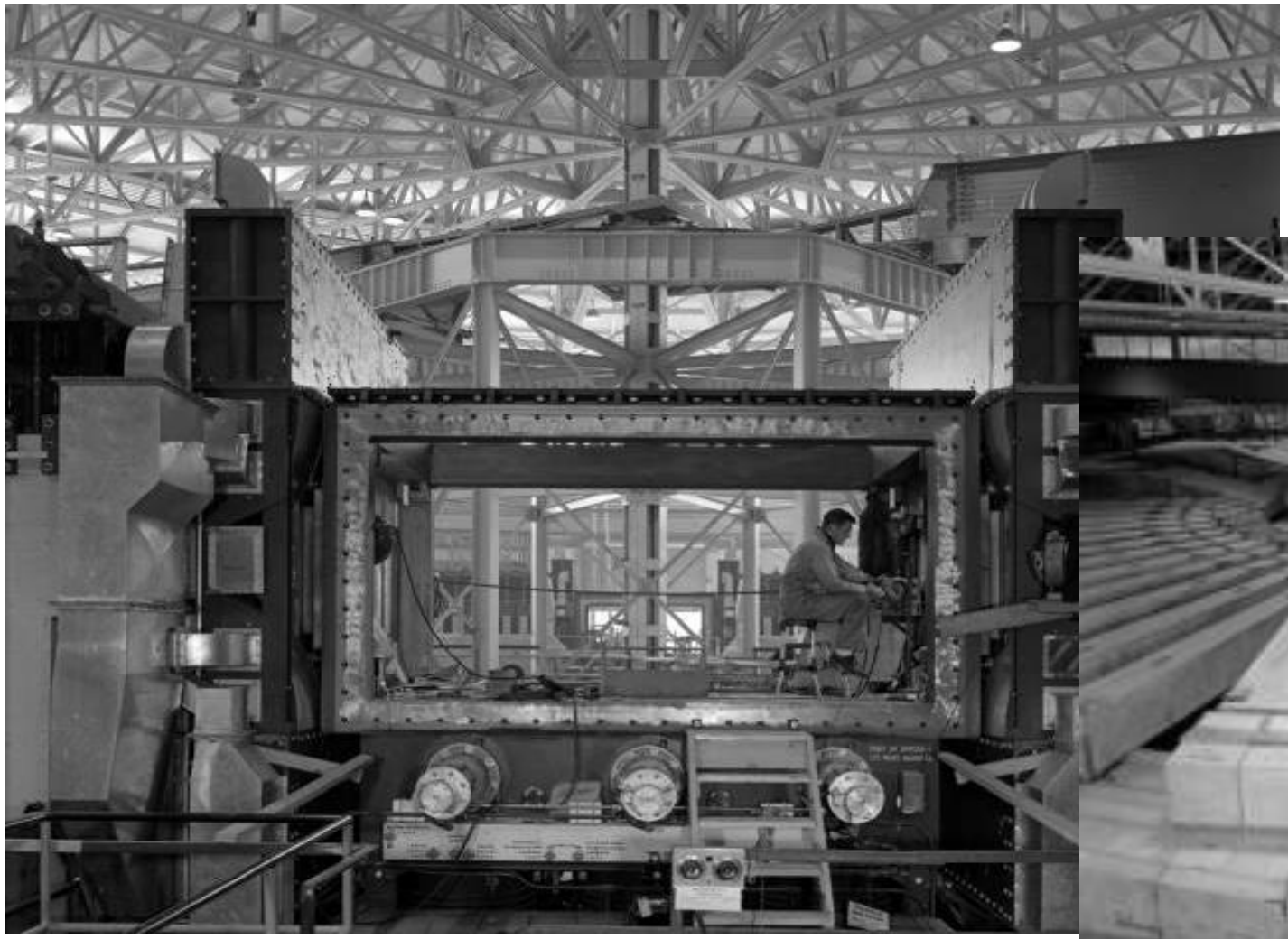
$$R = \frac{\gamma m v}{qB} \rightarrow$$

- „Fixed Function Magnets“
  - Dipole zur Ablenkung
  - Quadrupole zur Fokussierung
  - …



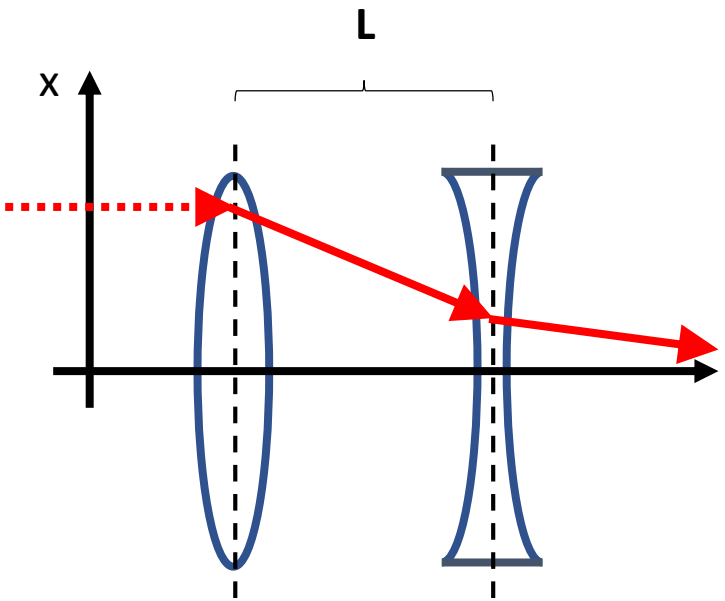
- Synchrotrons brauchen einen Vorbeschleuniger

Synchrotrons



Die letzte schwach fokussierende Machine: das Bevatron

Betatronbewegung



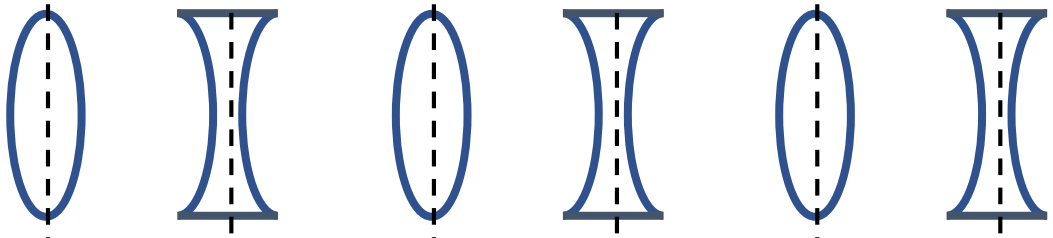
$$M_{\mathrm{x}} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{L}{f} - \left(\frac{L}{f}\right)^2 & 2L + \frac{L^2}{f} \\ -\frac{L}{f^2} & 1 + \frac{L}{f} \end{pmatrix}$$

- Können wir damit ein System bauen, dass
  - stabil
  - periodisch

ist?

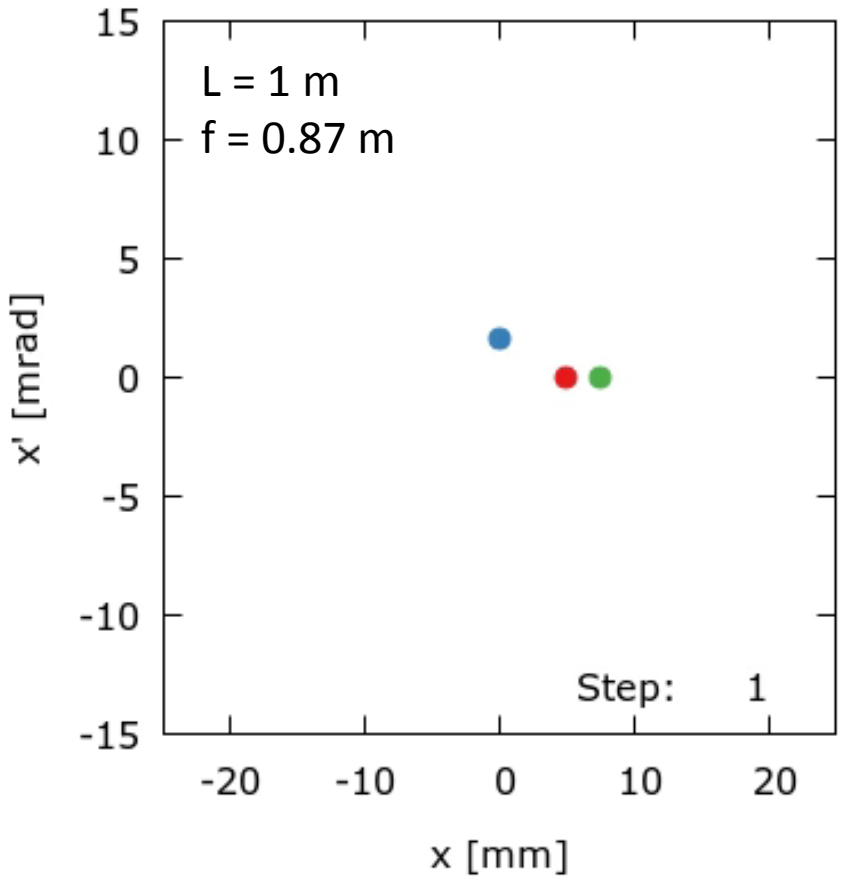
Probieren wir es mit Teilchen-Tracking:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_1' \end{pmatrix} = M_{\mathrm{x}} \begin{pmatrix} x_0 \\ x_0' \end{pmatrix} \quad \dots \quad \begin{pmatrix} x_2 \\ x_2' \end{pmatrix} = M_{\mathrm{x}} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_1' \end{pmatrix} \quad \dots \quad \begin{pmatrix} x_3 \\ x_3' \end{pmatrix} = M_{\mathrm{x}} \begin{pmatrix} x_2 \\ x_2' \end{pmatrix} \quad \dots$$



...

Betatronbewegung



Betatronbewegung

- Stellt sich raus… jede (stabile) Kombination aus linearen strahloptischen Elementen kann so geschrieben werden:

$$M = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cos\sigma + \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ -\dfrac{1+\alpha^2}{\beta} & -\alpha \end{pmatrix} \sin\sigma$$

- … mit

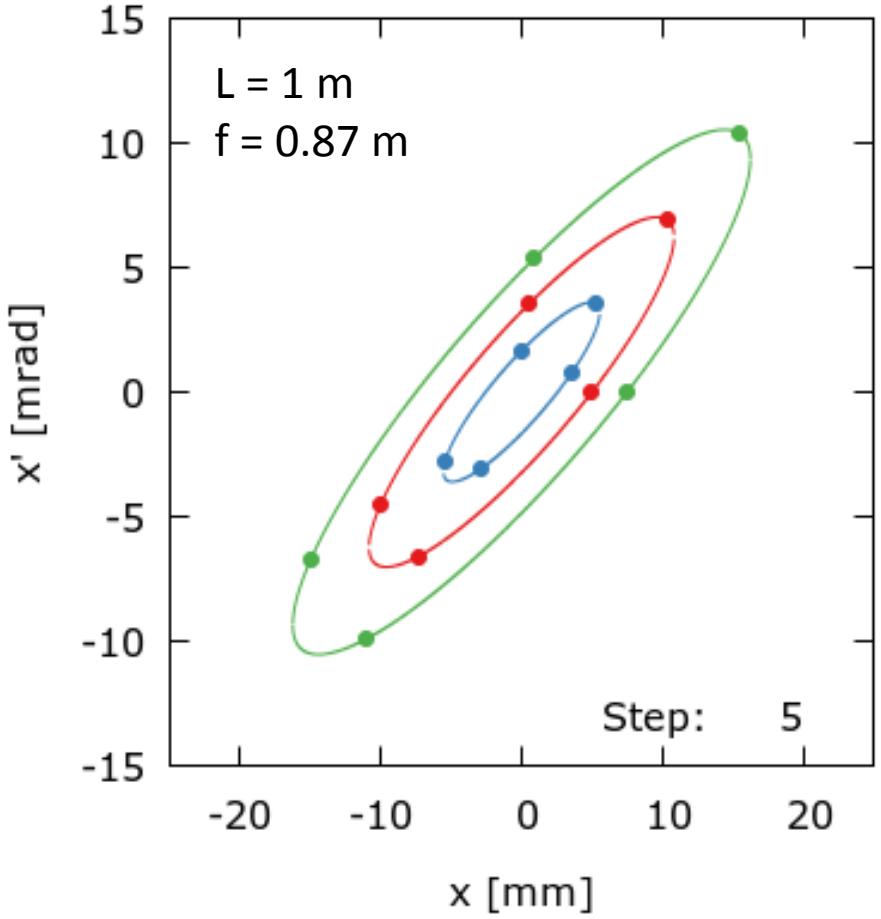
Phasenvorschub: $\cos\sigma = 1 - \frac{L}{f} - \left(\frac{L}{f}\right)^2$

Twiss-Parameter:

$$\beta = \frac{2f + L}{\sqrt{1 + \frac{1}{4}\left(\frac{L}{f}\right)^2}} \qquad \alpha = -\frac{\frac{1}{2}\frac{L}{f} + 1}{\sqrt{1 + \frac{1}{4}\left(\frac{L}{f}\right)^2}}$$

$$\longrightarrow \quad M = \begin{pmatrix} 1 - \frac{L}{f} - \left(\frac{L}{f}\right)^2 & 2L + \frac{L^2}{f} \\ -\frac{L}{f^2} & 1 + \frac{L}{f} \end{pmatrix}$$

Betatronbewegung



- Phasenvorschub

$$\sigma = \cos^{-1}\left(1 - \frac{L}{f} - \left(\frac{L}{f}\right)^2\right) = 70.2°$$

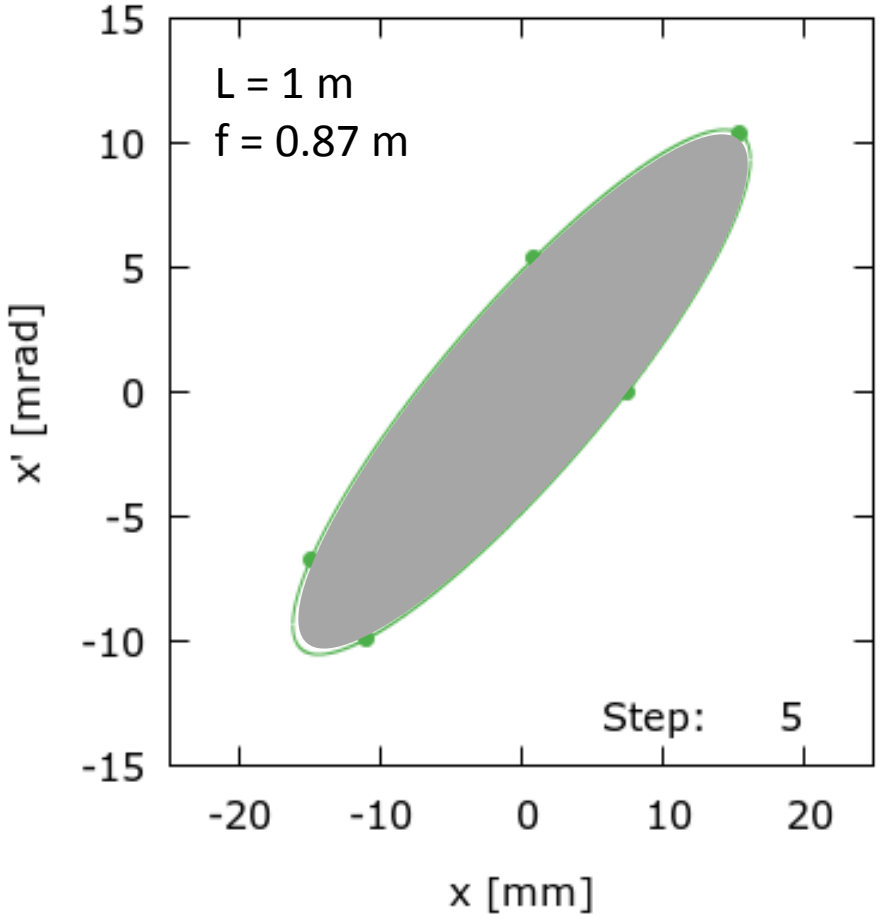
Anzahl der Zellen pro Ellipse: 360° / 70.2° = 5.1282...

Wichtige Größe für Synchrotrons: der Tune

$$Q = \frac{\sigma}{360°} = \frac{70.2°}{360°} = 0.195$$

- Twiss-Parameter α, β
  - Charakteristische Funktionen der Optik
  - Teilchen bleiben auf der selben Ellipse

Betatronbewegung



- Phasenvorschub

$$\sigma = \cos^{-1}\left(1 - \frac{L}{f} - \left(\frac{L}{f}\right)^2\right) = 70.2°$$

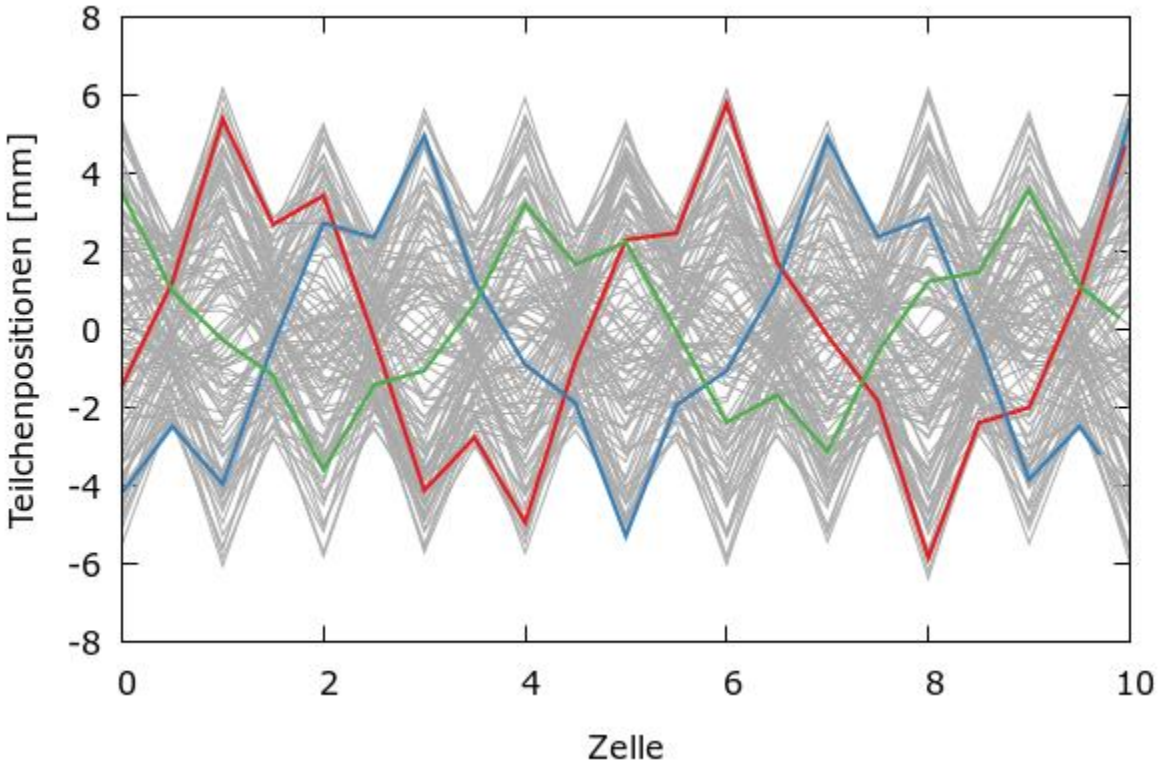
Anzahl der Zellen pro Ellipse: 360° / 70.2° = 5.1282...

Wichtige Größe für Synchrotrons: der Tune

$$Q = \frac{\sigma}{360°} = \frac{70.2°}{360°} = 0.195$$

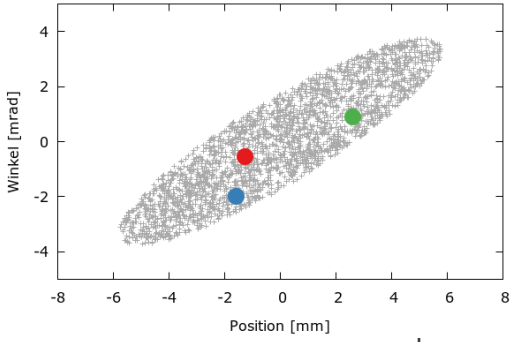
- Twiss-Parameter α, β
  - Charakteristische Funktionen der Optik
  - Teilchen bleiben auf der selben Ellipse

Betatronbewegung

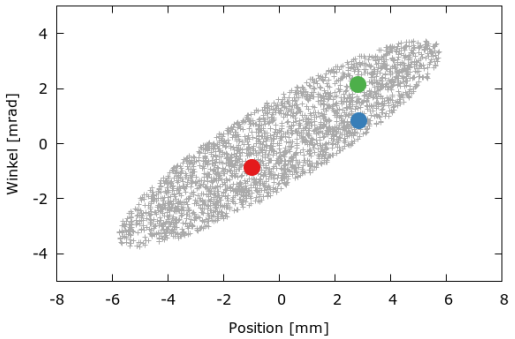


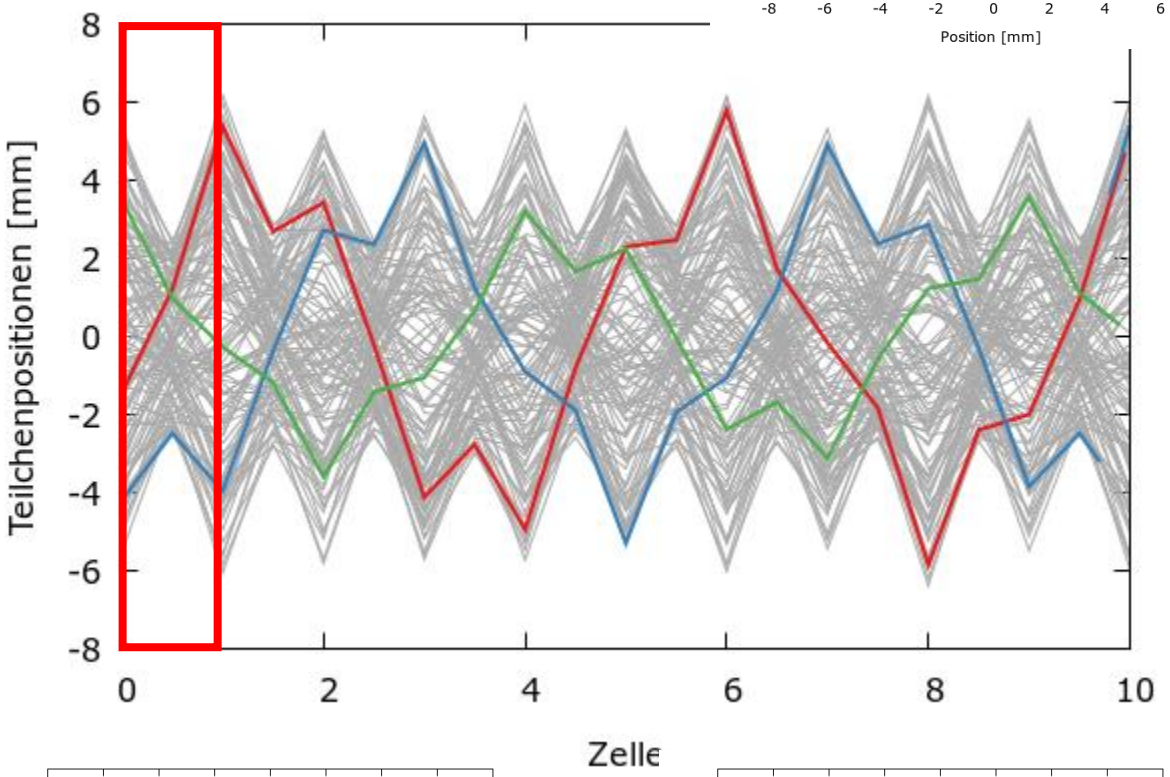
Betatronbewegung

Nach Drift #2

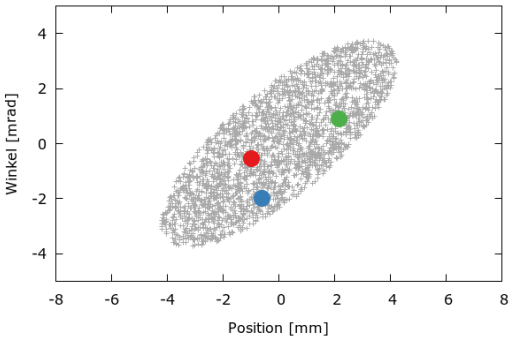


Vor fok. Linse:

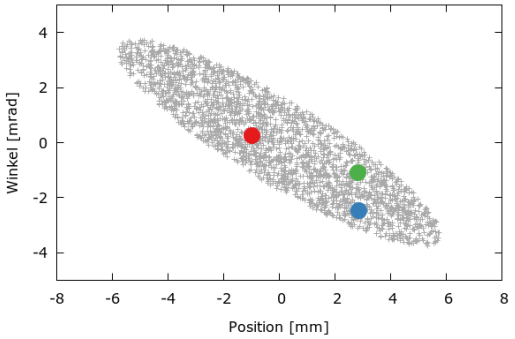




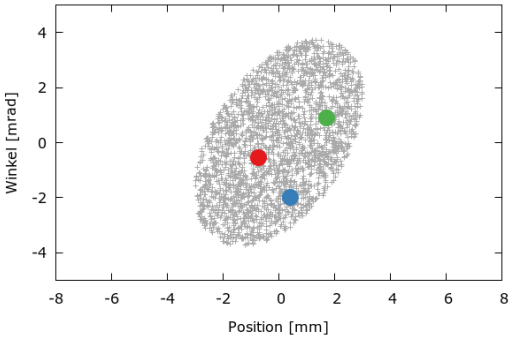
Halbe Drift #2



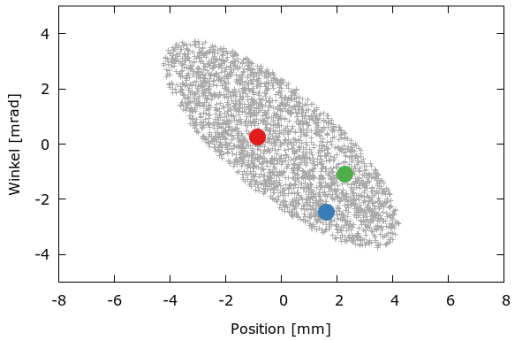
Nach fok. Linse:

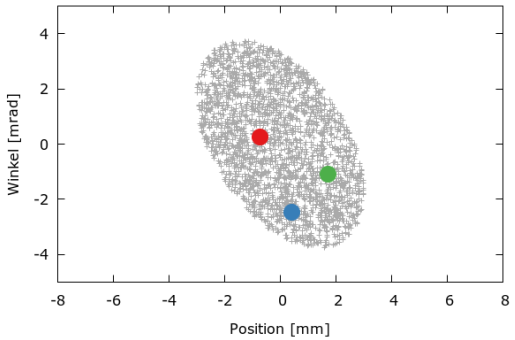


Nach defok. Linse:



Halbe Drift #1

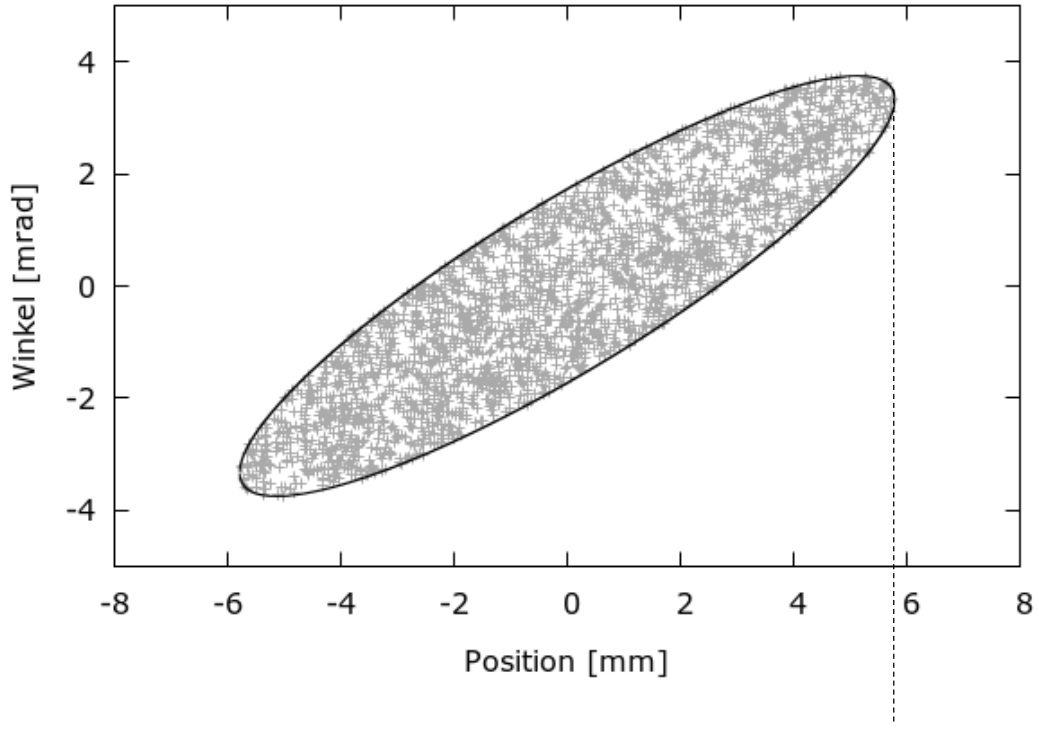




Nach Drift #1

Betatronbewegung

$$\frac{1+\alpha^2}{\beta}x'^2 + 2\alpha x x' + \beta x^2 = \varepsilon$$

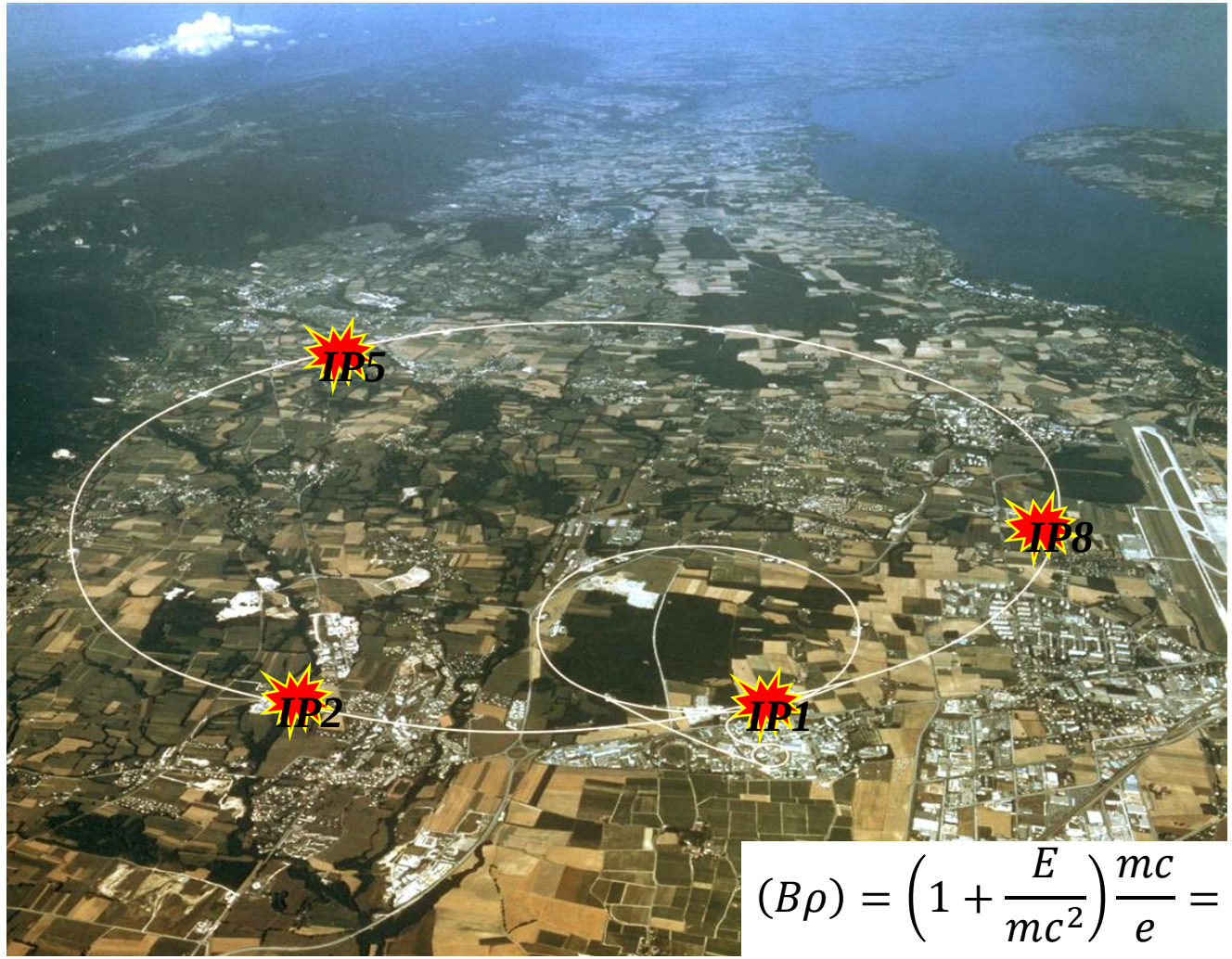


- Jede Zelle transformiert Ellipse aller Teilchen in die selbe Ellipse
  - Aber nicht die Einzelteilchen
- Fläche bleibt erhalten: Emittanz
  - Maß für die Strahlqualität
  - Erhalten wenn die Optik linear ist...
    ... und nimmt zu wenn nicht.
- Größe des Strahles an jedem Punkt im Ring

$$X(s) = \sqrt{\beta(s)\epsilon}$$

$$X(s) = \sqrt{\beta(s)\epsilon} = \sqrt{3.4\mathrm{m} \cdot 10^{-5}\mathrm{m}} = 5.8\ \mathrm{mm}$$

Der Large Hadron Collider



- Gebaut im Tunnel des Large Electron-Positron-Colliders
- 26.7 km Umfang (davon etwa 17.5 km Dipol)
- Entworfen für 7 TeV Strahlenergie, betrieben mit 6.5 TeV (2015-2019):

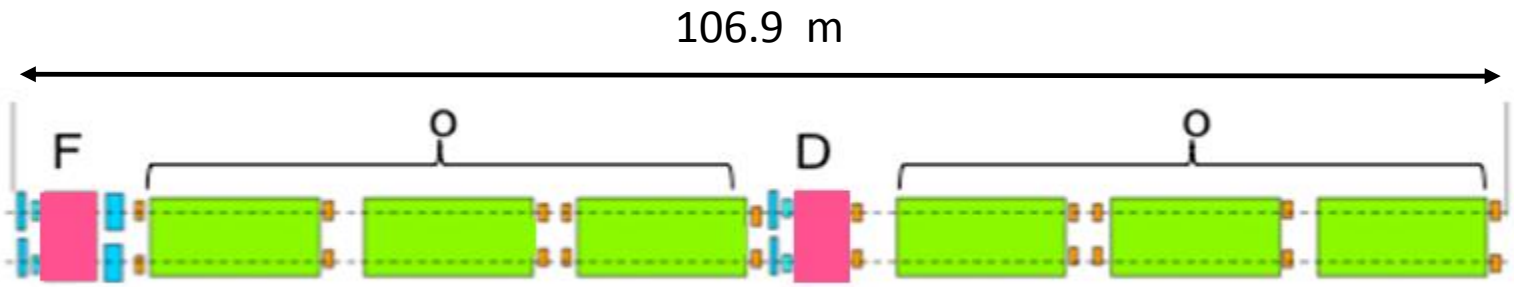
$$v = c\sqrt{1 - \frac{1}{(1 + \frac{7\ \mathrm{TeV}}{938.1\ \mathrm{MeV}})^2}} = 0.999999991c$$

$$T_{\mathrm{Umlauf}} = \frac{L}{c} = \frac{26.7\ \mathrm{km}}{c} = 89\ \mu\mathrm{s} = \frac{1}{11.23\ \mathrm{kHz}}$$

$$(B\rho) = \left(1 + \frac{E}{mc^2}\right)\frac{mc}{e} = 23.3\ \mathrm{T\ km}$$

$$B = \frac{R}{(B\rho)} = \frac{1}{2\pi}\frac{17.5\ \mathrm{km}}{23.3\ \mathrm{T\ km}} = 8.4\ \mathrm{T}$$

LHC: Lattice



Magnets for the LHC, total budget, every mag

Name	Quantity	Purpose
MB	1232	Main dipoles
MQ	400	Main lattice quadrupoles
MSCB	376	Combined chromaticity/ closed orbit correctors
MCS	2464	Dipole spool sextupole for persistent currents at injection
MCDO	1232	Dipole spool octupole/decapole for persistent currents
MO	336	Landau octupole for instability control
MQT	256	Trim quad for lattice correction
MCB	266	Orbit correction dipoles
MQM	100	Dispersion suppressor quadrupoles
MQY	20	Enlarged aperture quadrupoles

In total 6628 cold magnets ...

- Tunes: 62.31 & 60.32
  - Nomineller Phasenvorschub 90° pro Zelle
- 14.2 m Dipol
  3 m Quadrupol
  … und eine Menge Korrekturspulen:
  - Strahlorbit
  - Sextupole: Korrektur der chromatischer Effekte
  - Oktupole: gegen Instabilitäten

LHC: Supraleitung

- Normalleitende Magnete haben ein Eisenjoch, das hilft das Feld zu verstärken (Faktor >>100)
- Nur... ab 2 T saturiert Eisen
- Müssen das Feld mit Strom allein erzeugen:

Magnetfeld eines Kabels in Abstand r: $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$

Widerstand eines Kabels der Länge L und Fläche: $R = \rho \frac{L}{A}$

Leistung: $P = RI^2$

$$P = \rho \frac{L}{A}\left(\frac{2\pi r}{\mu_0}\right) B^2$$

Für Kupfer (1.7 10^{-8} Ωm)

L = 14.2 m B = 8.4 T

r = 22.5 mm

$$= \rho \frac{L}{A}\left(\frac{2\pi r}{\mu_0}\right) B^2 = \frac{0.2\ \mathrm{MW\ m^2}}{A}$$

→ Grobe Schätzung der Spulenfläche: 100 cm²

↓

20 MW pro Magnet

LHC: Supraleitung

- Normalleitende Magnete haben ein Eisenjoch, das hilft das Feld zu verstärken (Faktor >>100)
- Nur... ab 2 T saturiert Eisen
- Müssen das Feld mit Strom allein erzeugen:

Magnetfeld eines Kabels in Abstand r: $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$

Widerstand eines Kabels der Länge L und Fläche: $R = \rho \frac{L}{A}$

Leistung: $P = RI^2$

$$P = \rho \frac{L}{A}\left(\frac{2\pi r}{\mu_0}\right) B^2$$

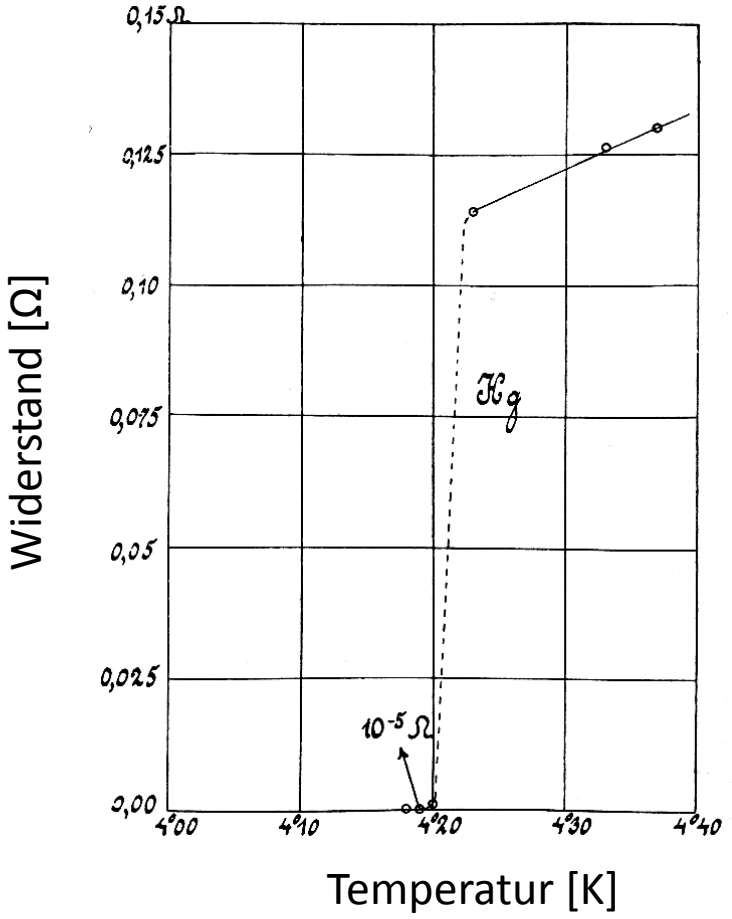
Für Kupfer (1.7 10^{-8} Ωm)

L = 14.2 m B = 8.4 T

r = 22.5 mm

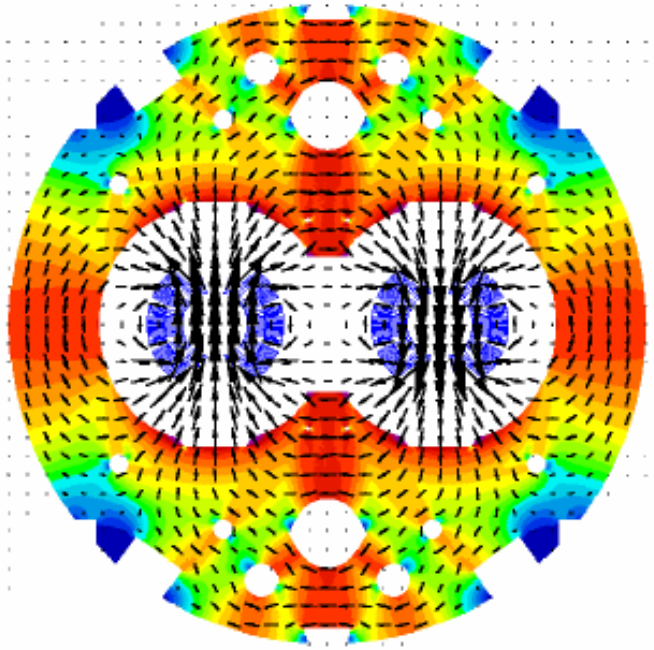
$$= \rho \frac{L}{A}\left(\frac{2\pi r}{\mu_0}\right) B^2 = \frac{0.2\ \mathrm{MW\ m^2}}{A}$$

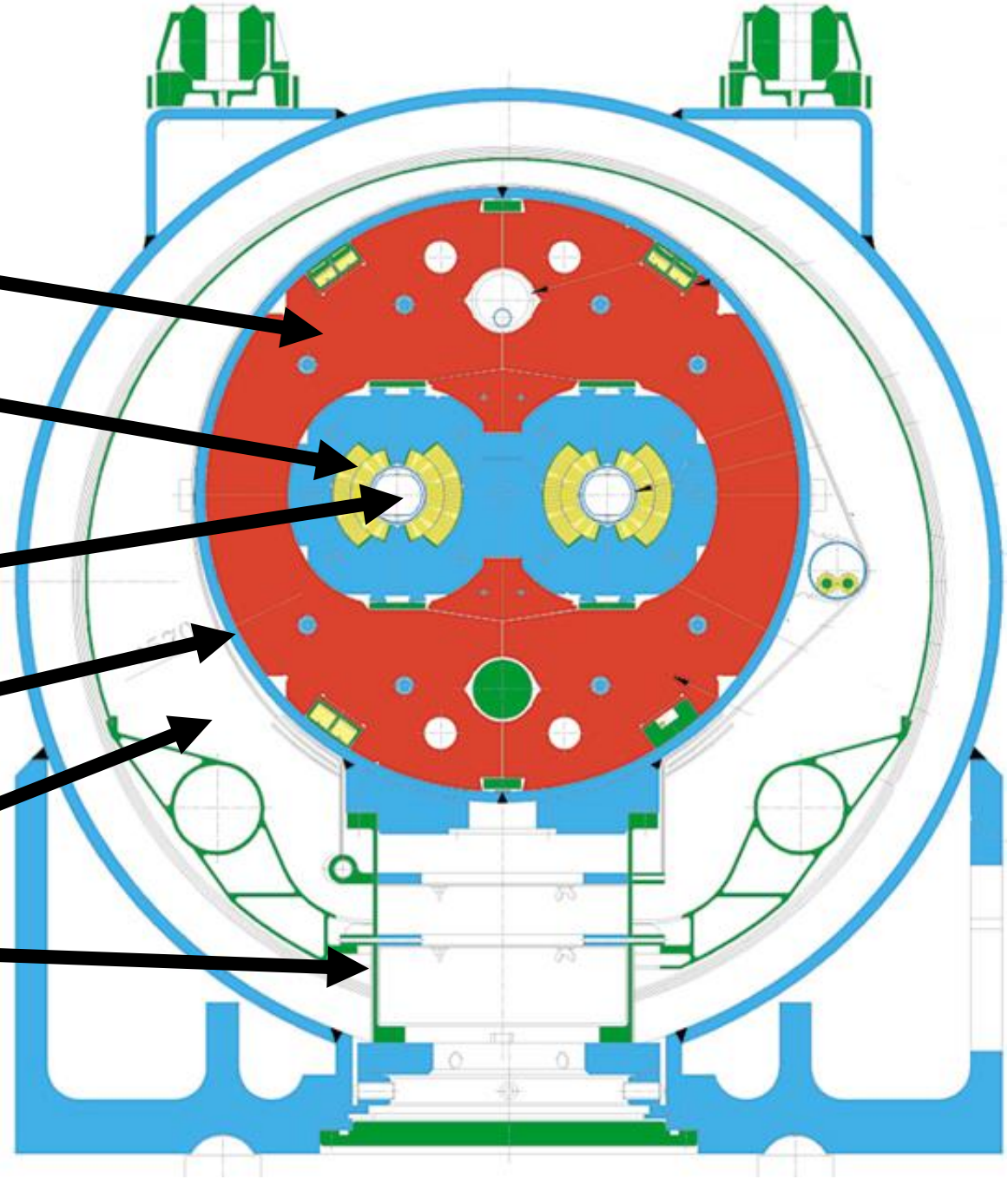
1911:
Supraleitung in Quecksilber entdeckt



LHC: Supraleitung

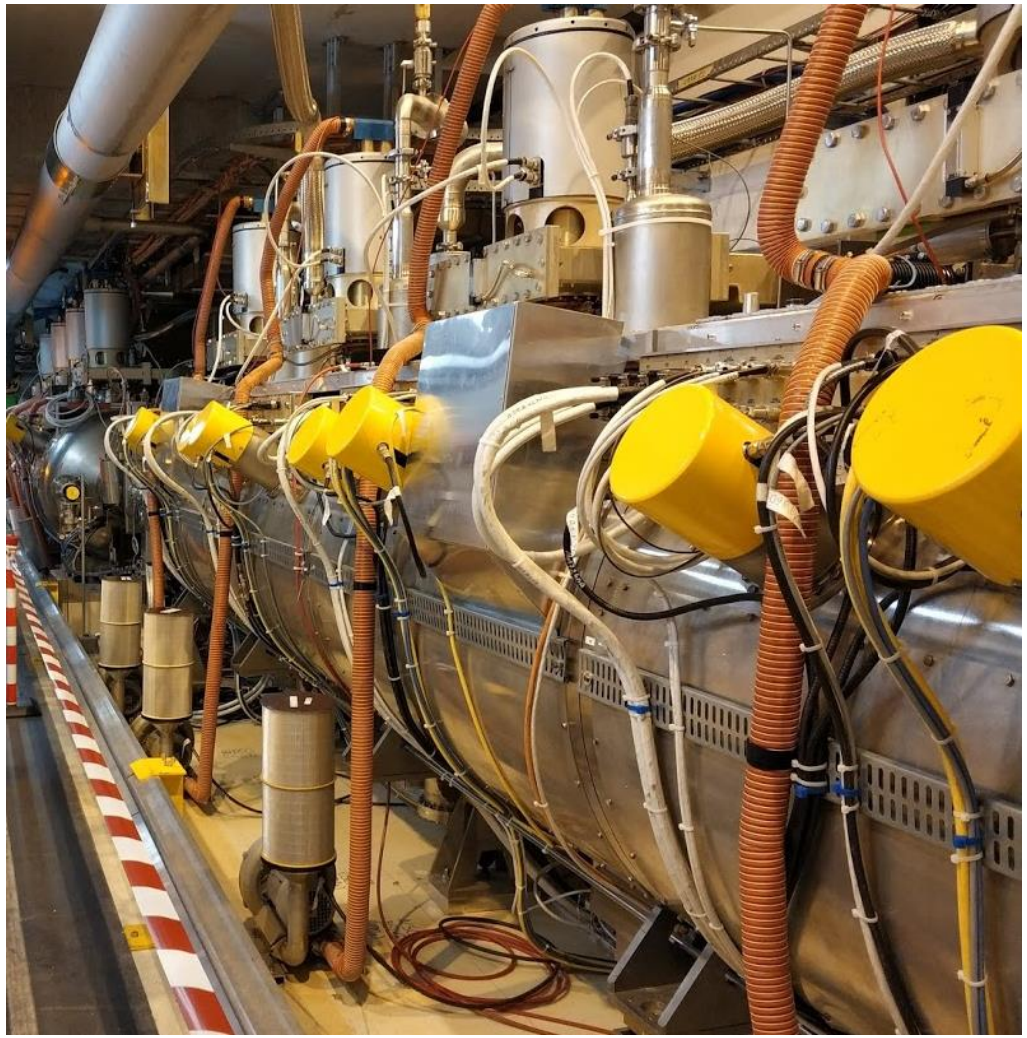
- Aus NbTi bei 2 K





L ~ 15 m
8.3 T, 11.87 kA
T = 1.9 K, ~27.5 ton

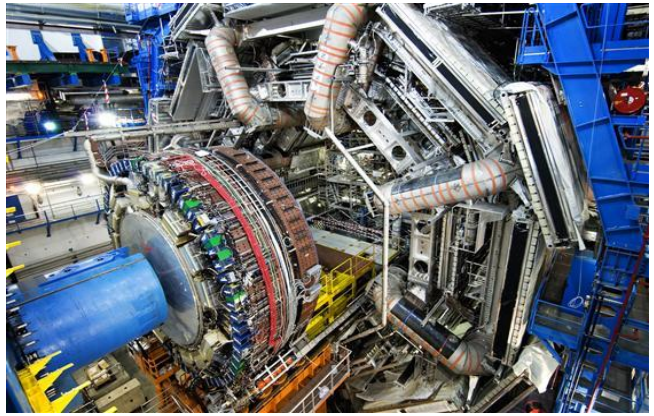
LHC: Beschleunigung



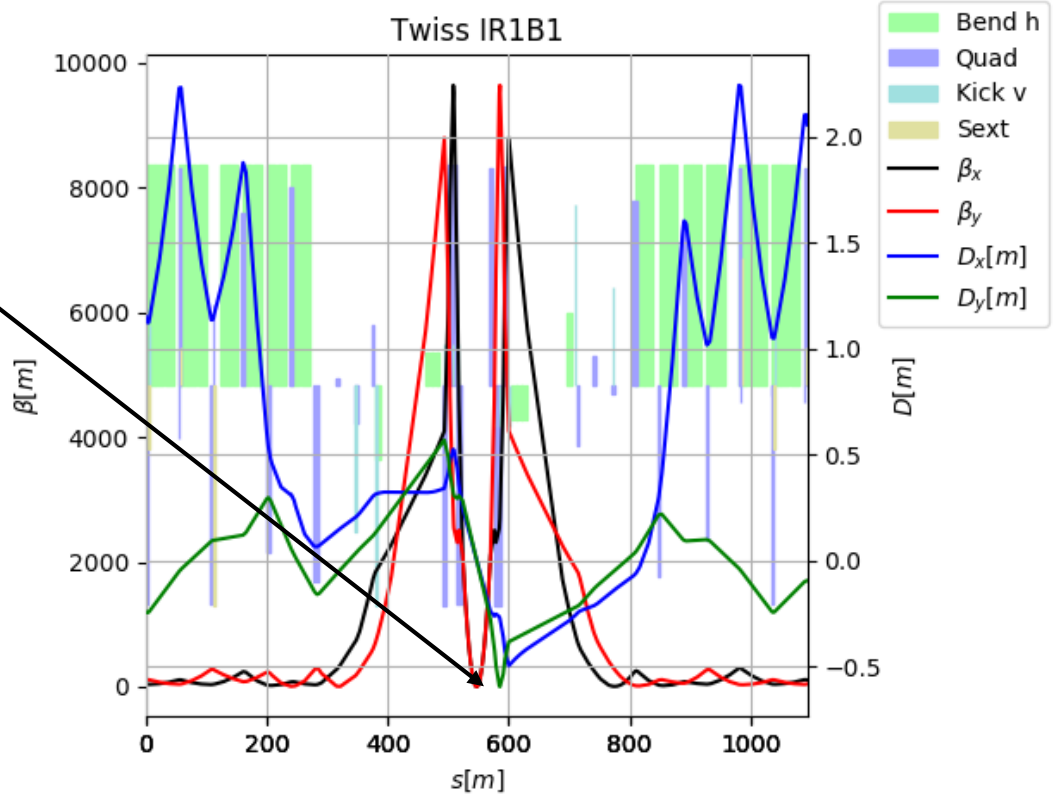
- Injektion bei 450 GeV
- 16 supraleitende Kavitäten bei 400 MHz
  - 8 pro Strahl
- 16 MV Beschleunigungs-spannung pro Strahl

Bei LEP waren es:
3600 MV/Strahl

LHC: Detektoroptik



- Interaktionspunkte unterbrechen die normale Optik
- Minimale Strahlgröße erforderlich, d.h.
  - Aufgabe der Optik: kleine Beta-Funktion
  - Aufgabe der Injektoren: kleine Emittanz



Ereignisrate: Wirkungquerschnitt * **Luminosität**:

$$\left.\begin{array}{l}\beta = 0.55\text{m} \\ \varepsilon = 5 \cdot 10^{-10}\text{m}\end{array}\right\} \sqrt{\beta_x \varepsilon_x} = 16.7\ \mu\text{m}$$

Menschliches Haar: 75 µm!

$n = 2808$ Bunche

$f = 11.2$ kHz

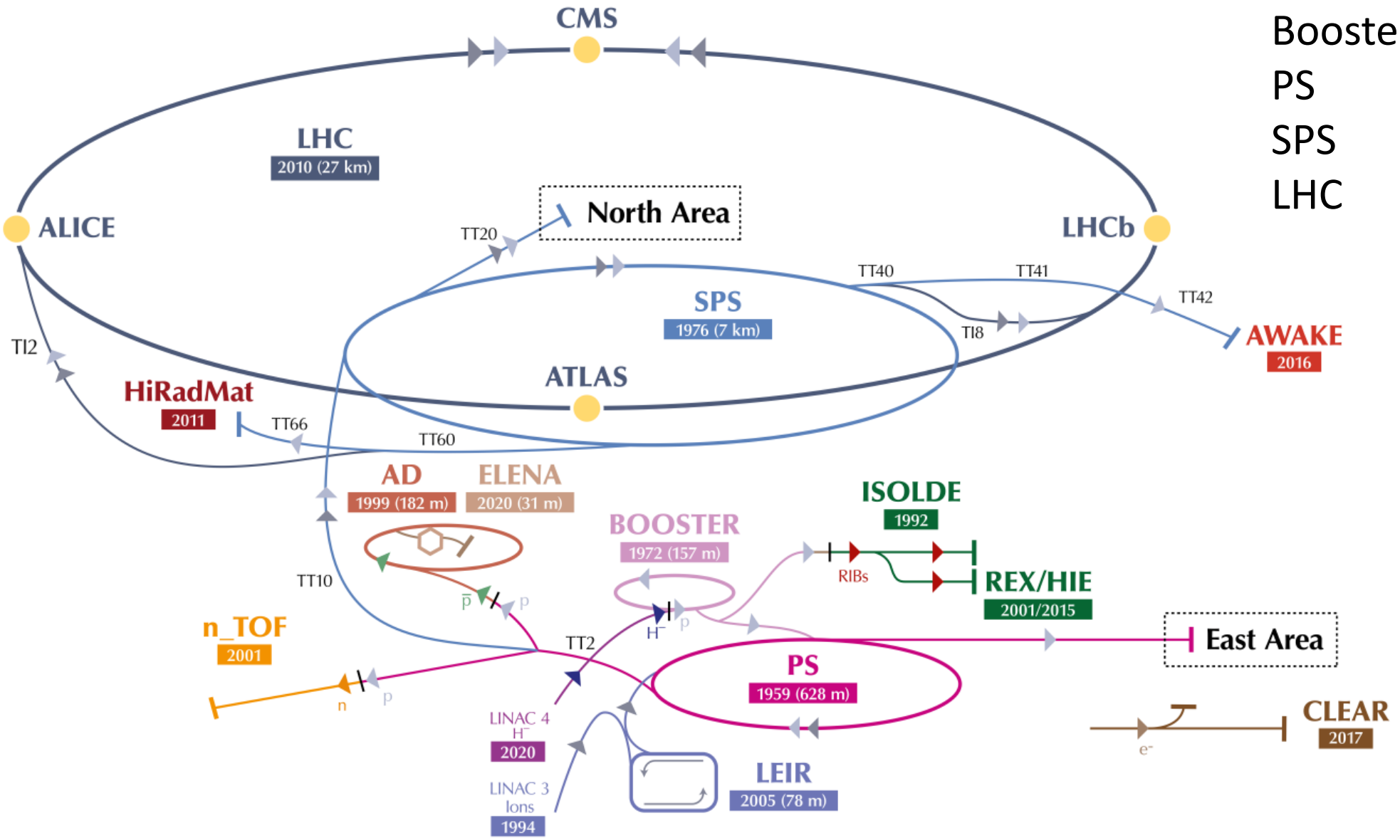
$N_1 = N_2 = 1.15 \cdot 10^{10}$ Protonen/Bunch

$$L = \frac{n N_1 N_2 f}{4\pi\sqrt{\beta_x \varepsilon_x}\sqrt{\beta_y \varepsilon_y}} = 1 \cdot 10^{34}\,\frac{1}{\text{cm}^2\text{s}}$$

Wirkungsquerschnitt für die Higgs-Produktion @ 13 TeV: ~ 50 pb = 50 10^{-36} cm^2

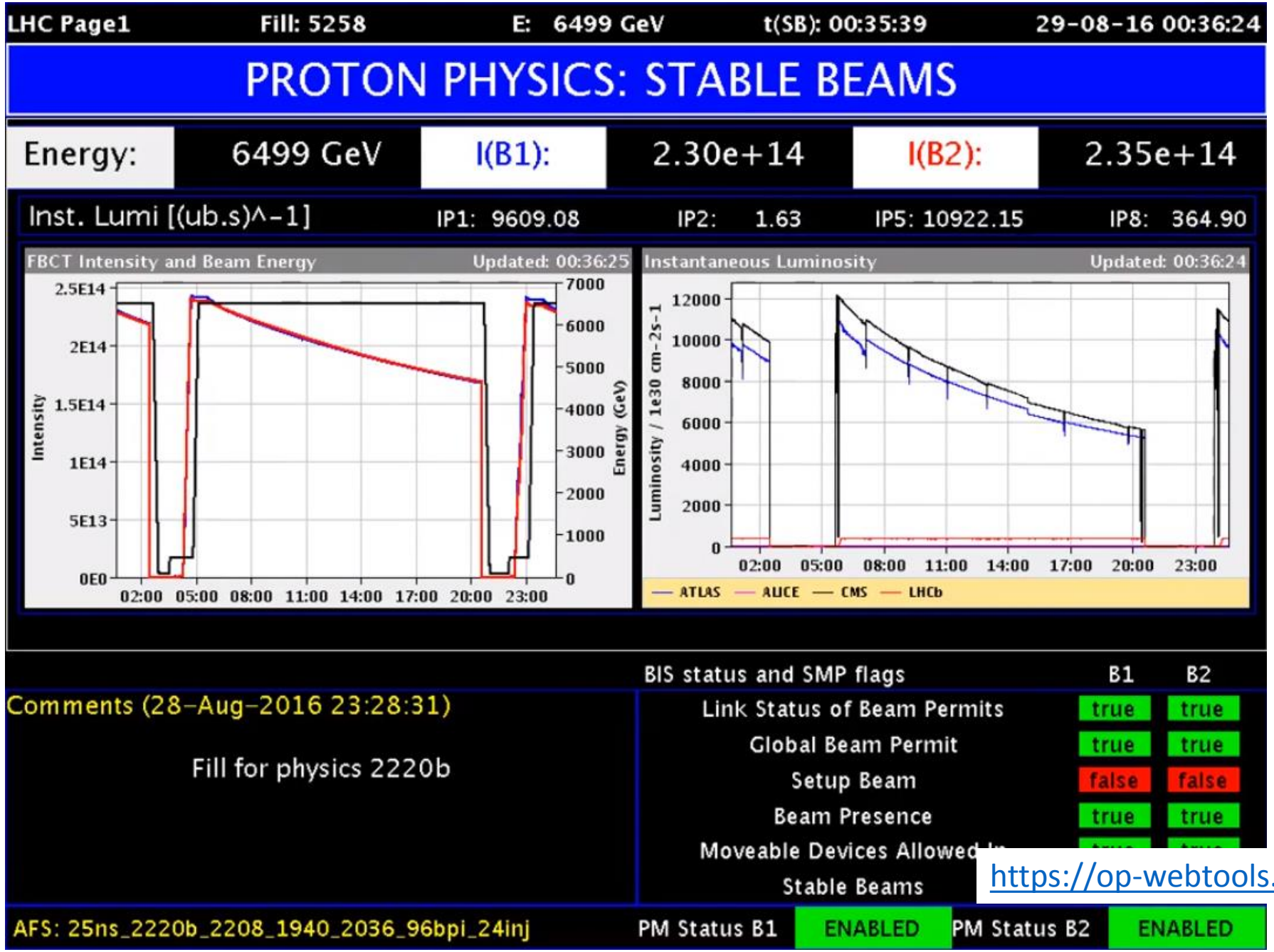
→ Ein Higgs-Teilchen alle 20 s

The CERN accelerator complex
Complexe des accélérateurs du CERN



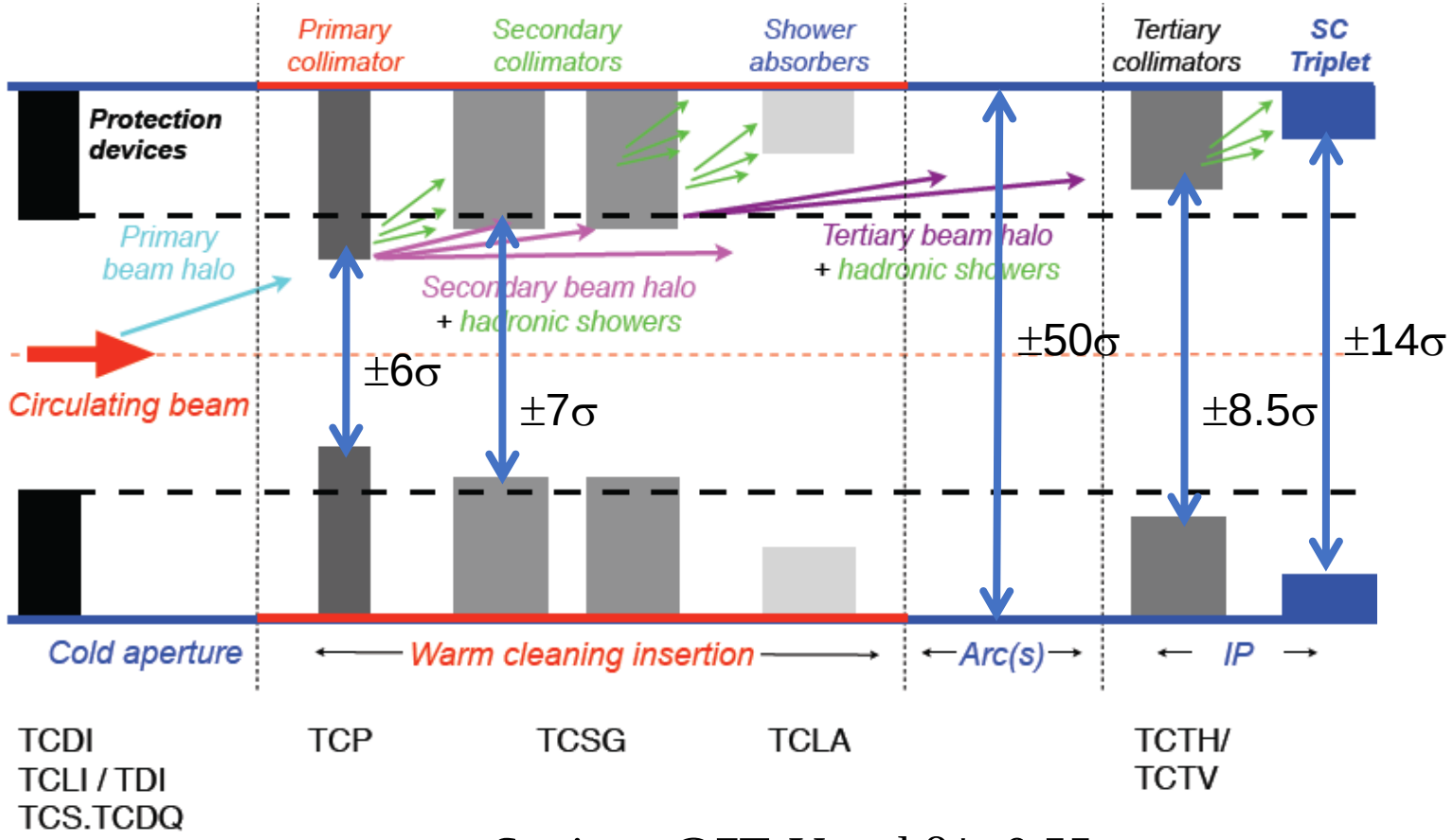
Energien:

Linac4	0.16 GeV
Booster	1.4 GeV
PS	26 GeV
SPS	450 GeV
LHC	6500 GeV



https://op-webtools.web.cern.ch/vistar/vistars.php

LHC: Kollimatoren

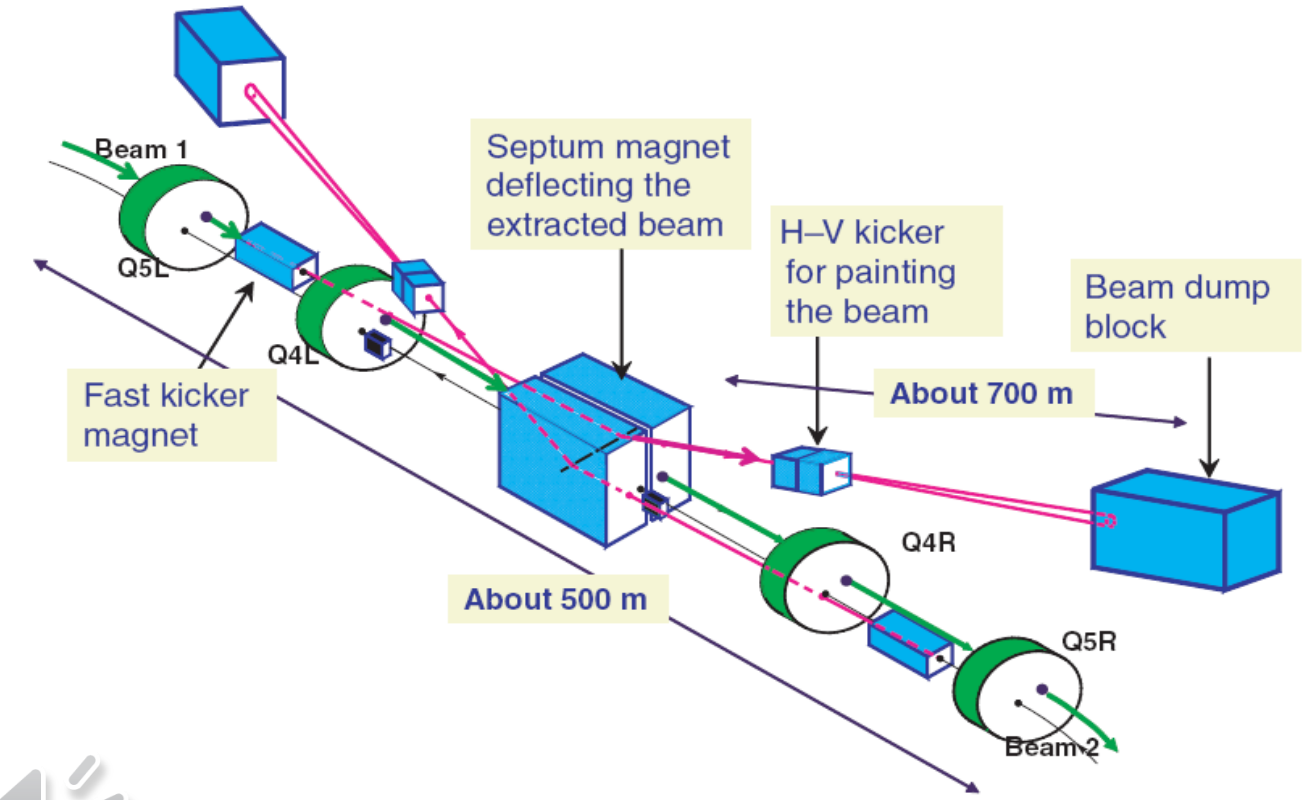


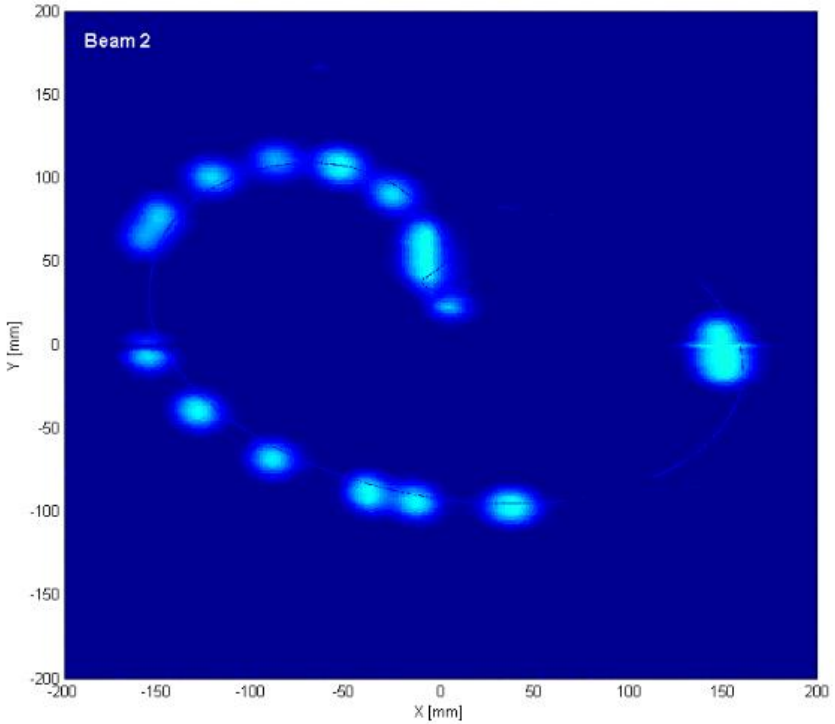
Settings @7TeV and β*=0.55 m
Beam size (σ) = 300 µm (@arc)
Beam size (σ) = 17 µm (@IR1, IR5)

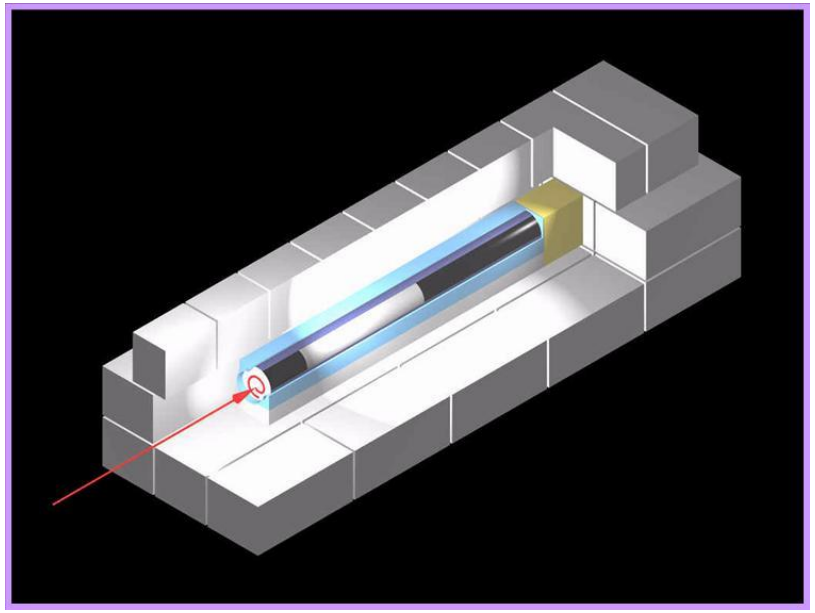
S. Redaelli, OP WG on Checkout, 08-11-2007

4

LHC: Dump

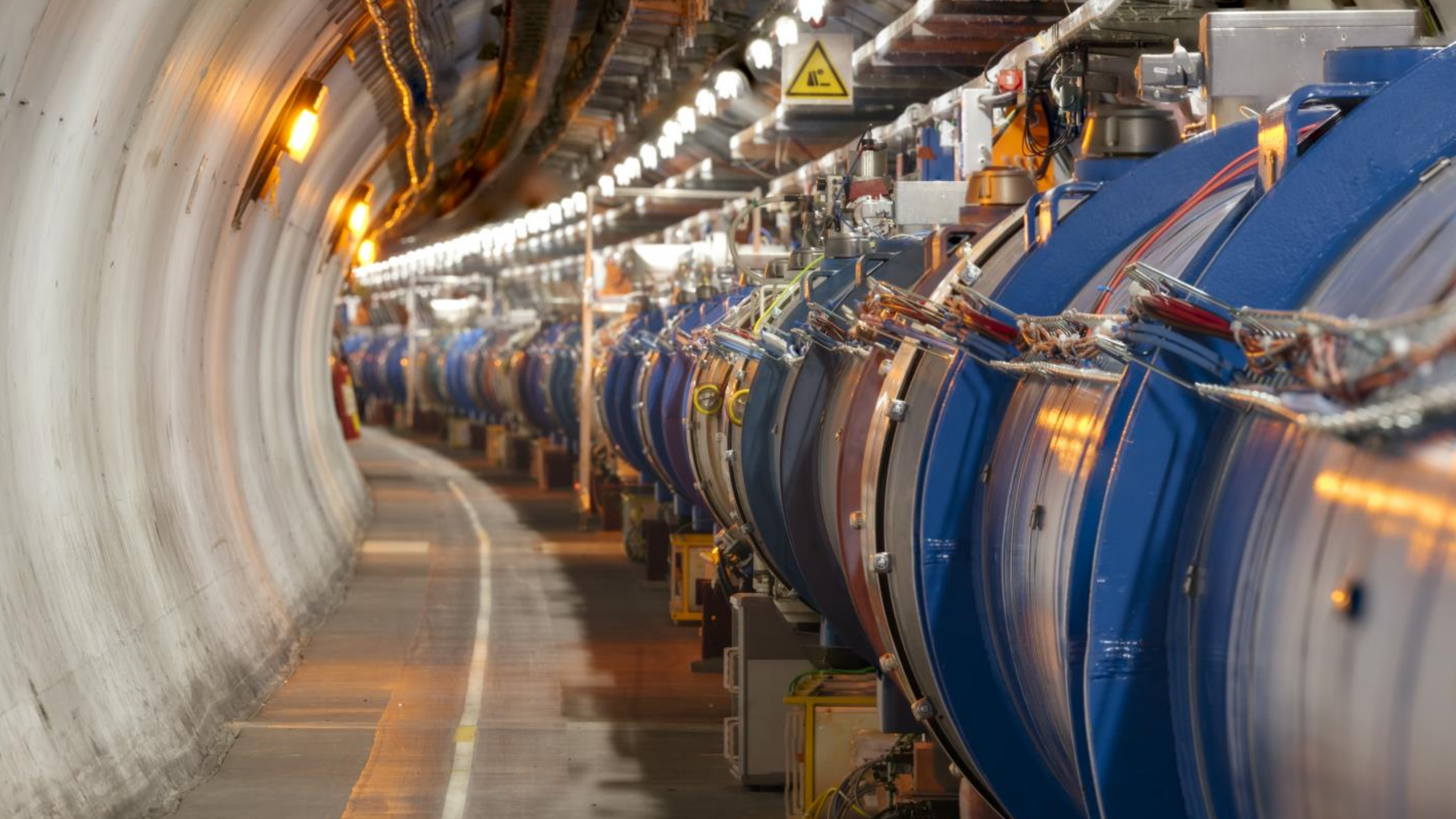






7 m langer Kohlenstoffzylinder
750 t Stahl/Betonabschirmung

Anwendungen von Teilchenbeschleunigern



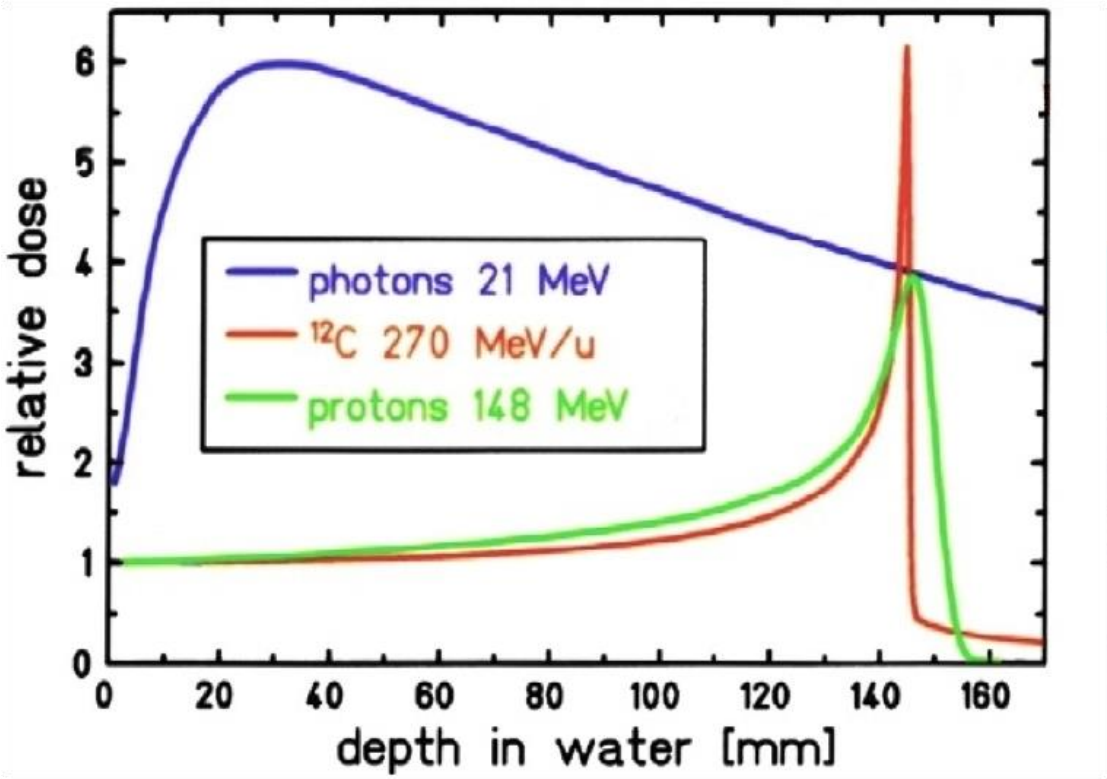
CATEGORY	NUMBER
Ion implanters	7000
Industry	1500
Radiotherapy	7500
Medical isotopes	200
Hadron therapy	20
non-nuclear research	1000
SR sources	70
Nuclear & Particle physics res.	120
TOTAL	**17390**

courtesy W. Mondelaers, JUAS 2004

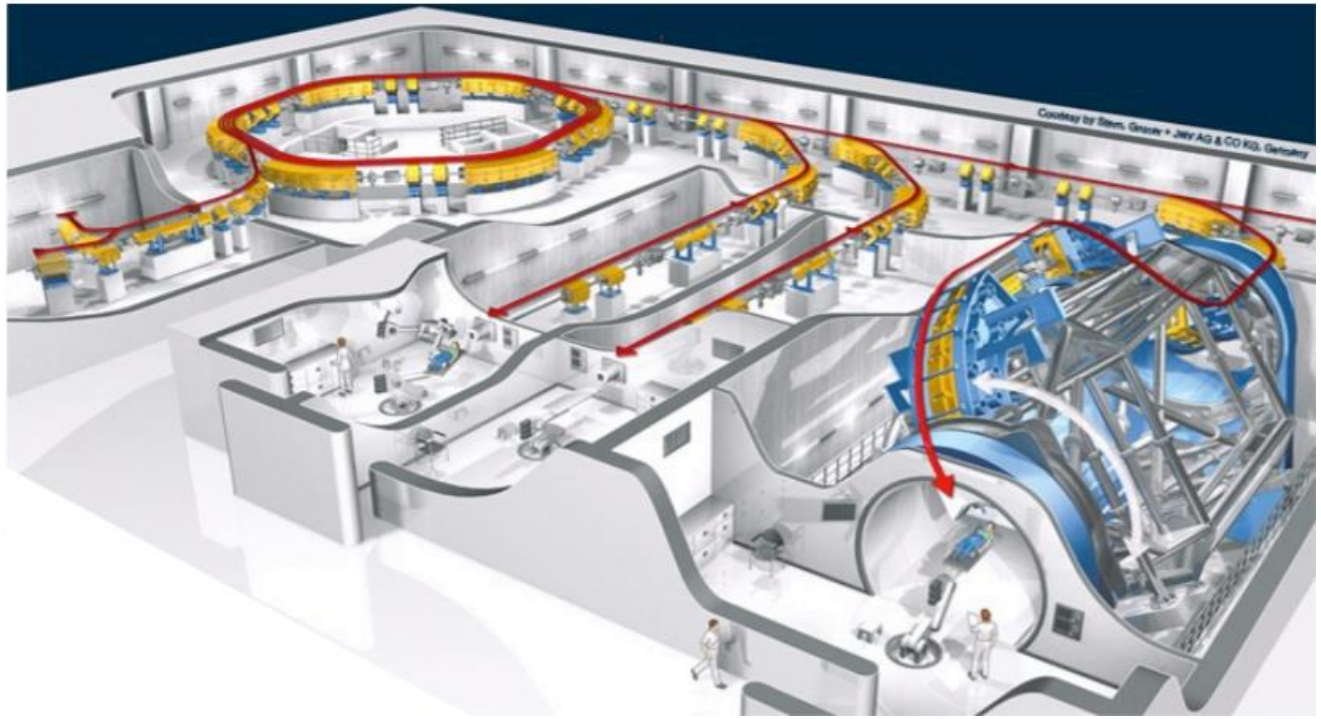
Krebstherapie mit Ionen

- Tumortherapie durch Bestrahlung mit Röntgen-Strahlung wird angewandt seit den 50ern
- Zellsterben durch unreparierbare DNA-Brüche

Dosis verschiedener Strahlen in Wasser



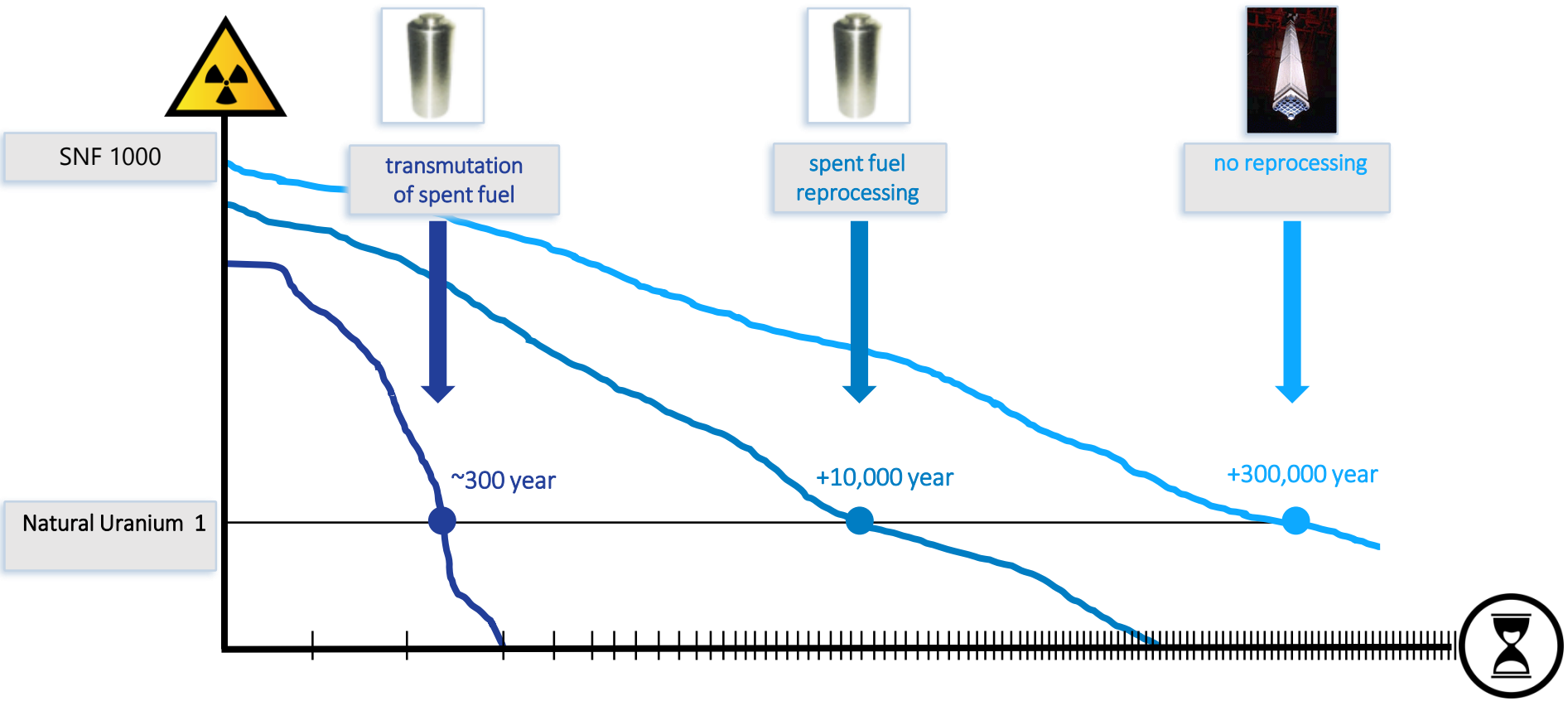
Heidelberg Ionenstrahltherapiezentrum, im Betrieb seit 2009



- 2018: ~210 000 Patienten behandelt weltweit [1]

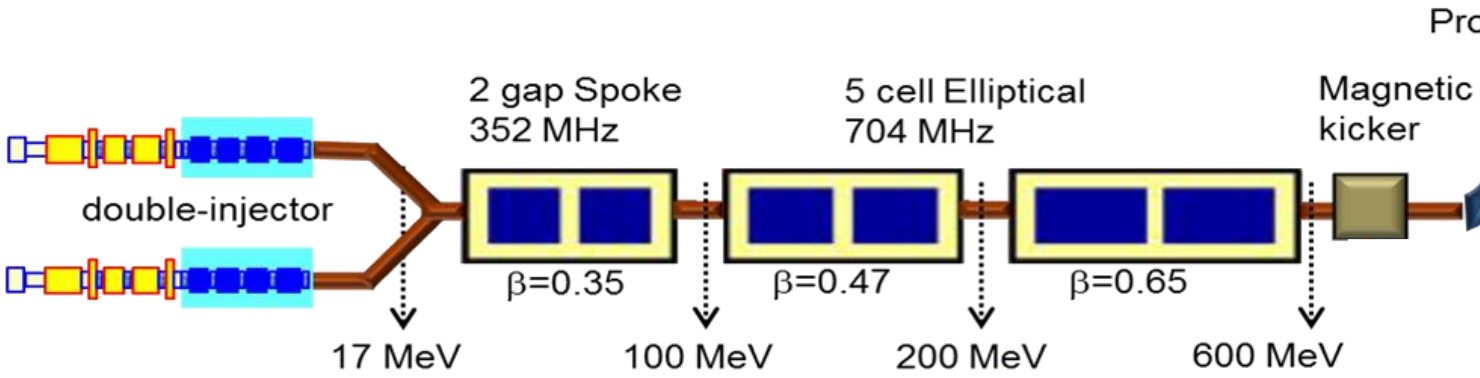
[1] https://www.ptcog.ch/images/patientstatistics/Patient_Statistics_2007-2018.png

Transmutation



Quelle: https://indico.cern.ch/event/806310/attachments/1815932/2968173/20190321_LPopescu_ISOLMYRRHA_Seminar_CERN.pdf

Transmutation



- Accelerator Driven System (ADS)
  - 600 MeV Protonen-Strahl erzeugen Neutronen durch Spallation
  - Neutronen treiben einen subkritischen Reaktor
- Demonstrator “MYRRHA” in Bau in Mol, Belgien
  - Erste Stufe 2026, vollständige Inbetriebname in 2033

Quelle: https://indico.cern.ch/event/806310/attachments/1815932/2968173/20190321_LPopescu_ISOLMYRRHA_Seminar_CERN.pdf

Fragen?

Anregungen?

Hunger?

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!