



Beschleunigerentwicklungen für Neutronenspallationsquellen und Neutrinoquellen

Michael Benedikt
AB Department, CERN



Inhalt

- **Einleitung**
 - Sekundärstrahlproduktion
 - Konzepte für Primärstrahlbeschleuniger
- **Injektionstechniken**
 - Phasenraum, Liouville Theorem
 - Single turn Injektion, multi-turn Injektion, H⁻ Injektion
- **Neutronenspallationsquellen**
 - Kontinuierliche Quellen (Basis Zyklotron)
 - Gepulste Quellen (Basis Synchrotron)
- **Neutrinoquellen**
 - Konventionelle Strahlen – CNGS Projekt
 - Neutrino Factory
 - “Beta-beam” Neutrinoquelle
- **Zusammenfassung**



Teilchenproduktion

- **Neutronen und Neutrinos – sehr verschiedene Teilchen**
 - Gemeinsamkeit: **keine Ladung**
 - **Keine Beschleunigung und Fokussierung dieser Teilchen!**
- **Produktion mittels “Sekundärstrahlprinzip”:**
 - Ruhendes Material (Target) wird mit einem Primärstrahl (Protonen) beschossen.
 - Primärstrahlleistung 100 kW (heute) bis mehrere MW (in Planung).
- **Starke Wechselwirkung mit Kernen des Target Materials.**
 - **Anregung der Kerne im Target → Spallationsneutronen.**
 - **Erzeugung von Teilchen bei deren Zerfall Neutrinos auftreten (π , K).**



Designaspekte Primärstrahlbeschleuniger

- **Hohe Primärstrahlleistung (MW):**
 - Vermeidung von Teilchenverlusten bei Beschleunigung
 - Induzierte Radioaktivität in Magneten, Vakuumkammer, etc.
 - Spontan induzierte Strahlung (γ , X-ray)
 - Remanente Radioaktivität (radioaktive Isotope)
 - Aktivierung der Luft (Filteranlagen, Umwälzzeit)
 - Materialzerstörung (Spulenisolation, Kabel, etc)
 - Reparatur und Wartung problematisch.
 - Konstruktion von Targets für hohe Leistung
 - dE/dx Primärstrahl verursacht thermische Energiedeposition im Target.
 - Problematisch wegen Kühlung, Spannungen im Target, etc.
 - **Strahlenschutz ist essentieller Aspekt für Beschleunigerdesign.**

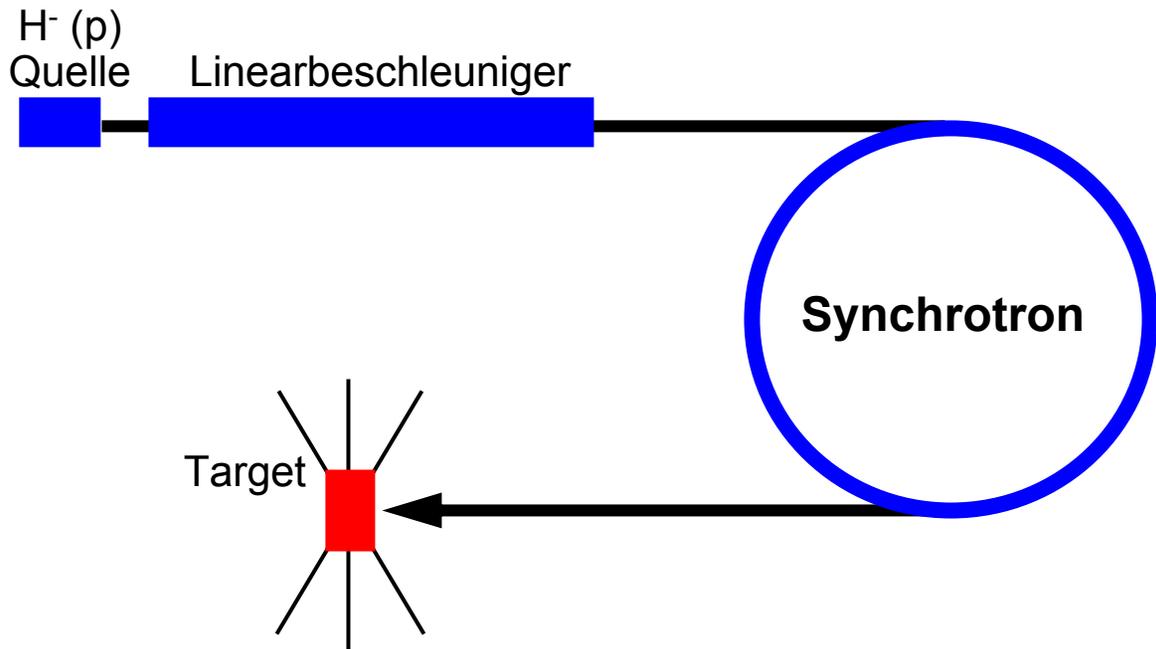


Designaspekte Primärstrahlbeschleuniger

- **Zeitstruktur des Primärstrahls:**
 - Neutronenspallationsquelle: kontinuierlich oder kurz gepulst
 - Pulslänge $\sim \mu\text{s}$ für Flugzeitmessungen, Zeit-Ortsauflösung, etc.
 - Neutrinoquellen: kurz gepulst
 - Kurze Pulslänge für Tastverhältnis (Pulslänge/Wiederholfrequenz) $\sim 10^{-4}$.
 - Erhöhung Signal/Untergrund im Detektor.
- **Zeitstruktur muss bereits im Primärstrahl vorhanden sein**
 - Ähnliche Anforderung gepulste Spallationsquellen und Neutrinoquellen

Grundkonzept für gepulsten Primärstrahl

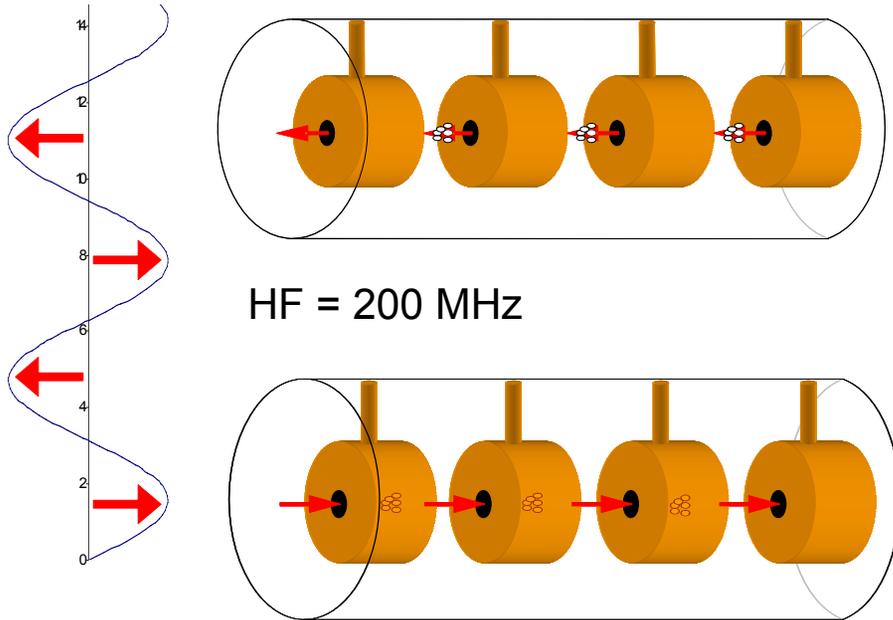
- **Quelle - Linearbeschleuniger - Kreisbeschleuniger - Target**



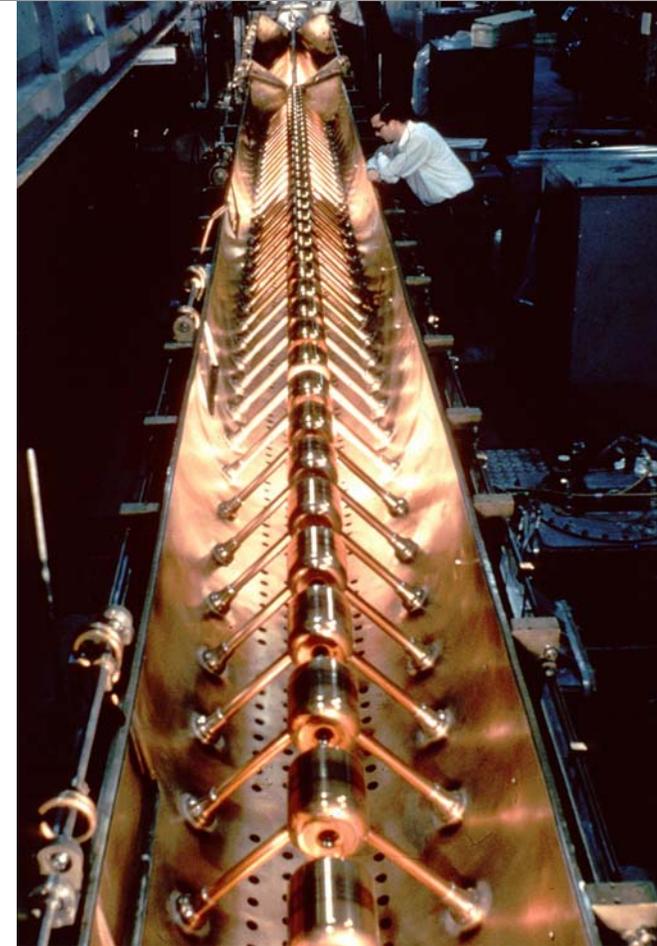
- **Transformation eines langen (\leq ms) Strahls mit niedriger Intensität in ein kurzes (μ s) "Paket" mit sehr hoher Intensität.**
 - Niedrige Intensität einfacher zu produzieren und zu beschleunigen
 - Ringbeschleuniger akkumuliert den langen Strahl, eventuell Beschleunigung
 - Extraktion zum Target

Linac (Linear Accelerator) - Prinzip

- **Linearbeschleuniger nur 1 Strahldurchgang**



- **Hochfrequenzstruktur mit Driftröhren**
- Elektrisches Feld in Längsrichtung
- Teilchen werden zwischen Driftröhren beschleunigt.
- $\frac{1}{2}$ RF Periode später würden Teilchen gebremst. → Abschirmung in Driftröhren.



- **Quasikontinuierlicher Strahl**
- **200 MHz Substruktur**

Synchrotron - Prinzip

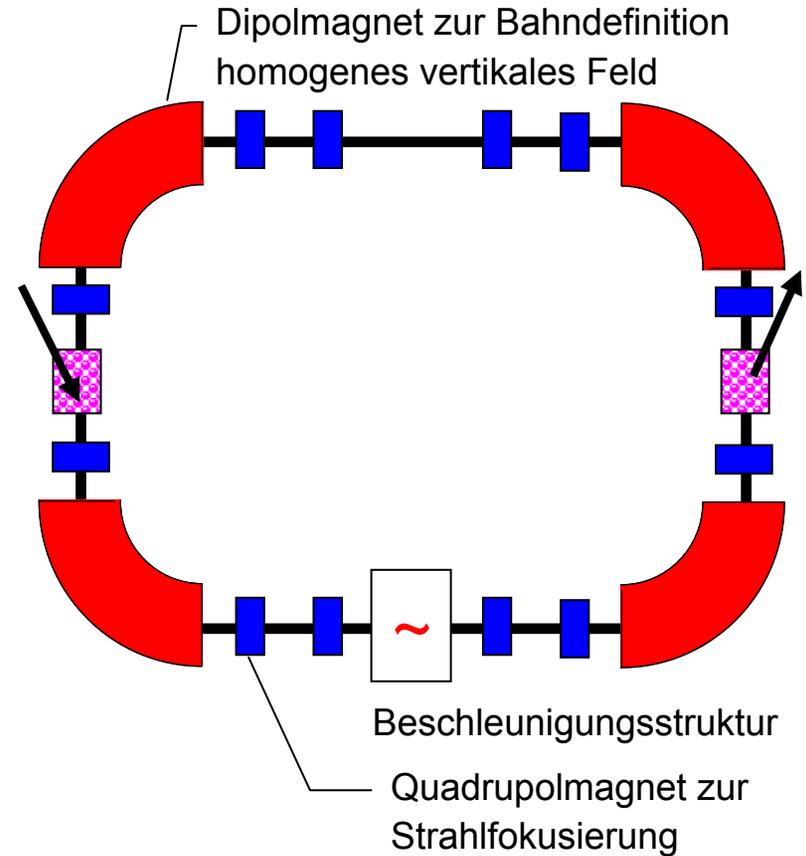
- **Kreisbeschleuniger mit fixem Bahnradius, viele Umläufe**

- **Ablenkmagnete (Dipole)** um Strahl auf der Umlaufbahn zu halten
- Homogenes, vertikales Magnetfeld.
- Horizontale Ebene: $m_0\gamma v^2/r_0 = qvB$

$$m_0\gamma v = m_0c\beta\gamma = p = q \cdot Br_0 \leftrightarrow B \propto p$$

- **Fokussiermagnete (Quadrupole)** um den Strahl stabil zu halten.
- Teilchen schwingen um die Sollbahn
→ **Essentiell für Injektion**

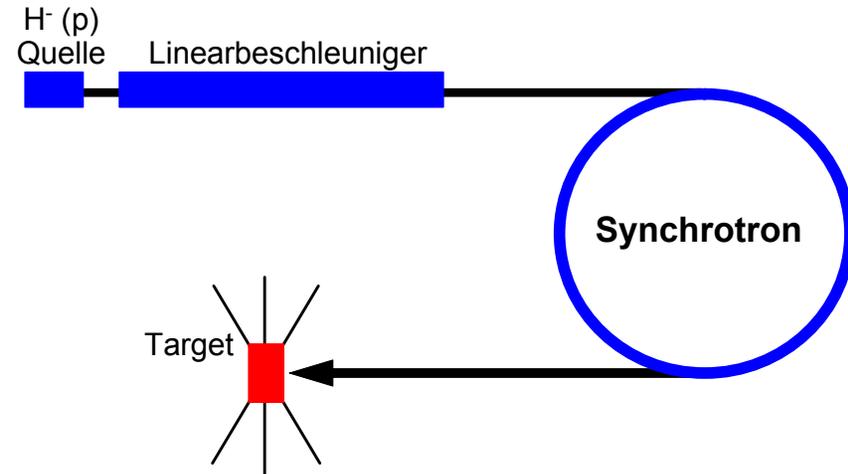
- **HF Beschleunigungsstrukturen (Kavitäten)**



- **Strahl hat Paketstruktur (n Pakete)**
 $n = \text{Hochfrequenz/Umlauffrequenz}$

Parameter Primärbeschleuniger

- **Protonen oder H⁻ Quellen**
 - 10 - 100 mA Strom mit Pulslänge \leq ms
- **Linearbeschleuniger (Linac)**
 - Energie 100 MeV – mehrere GeV
 - Pulslänge wie Quelle \leq ms
- **Synchrotron**
 - Als Akkumulator und Speicherring (eventuell auch Beschleuniger)
 - Endenergie 1 GeV – 500 GeV (mehrere Synchrotrons hintereinander)
 - Pulslänge $\sim \mu$ s
- **Gesamtanlage**
 - Wiederholungsrate 50Hz
 - Typische Strahlleistung 100 kW – 10 MW
 - Endenergie: \sim 1 GeV (Spallationsquellen)
 - Endenergie: 5-500 GeV (Neutrinoquellen)

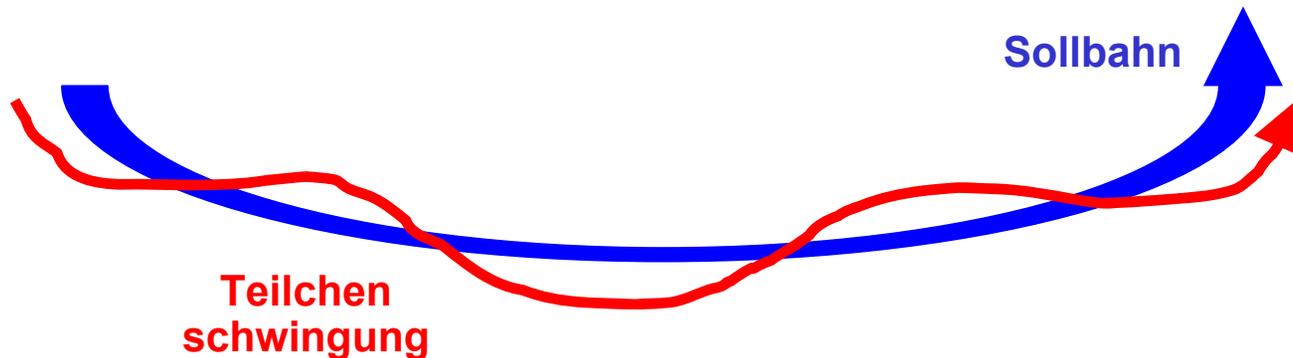




Pulskompression im Synchrotron

- **Pulskompression mittels Injektion**
 - Typischer Umfang von GeV Synchrotrons ~ 300 m
 - Typische Umlaufzeit ($v \sim c$) $1 \mu\text{s}$.
 - Injektion des langen Linacpulses während vieler Umläufe
 - “Aufwickeln des Strahles”
 - Resultierender Puls ist notwendigerweise **kürzer als Umlaufzeit $\leq 1 \mu\text{s}$**
- **Tastverhältnis $50\text{Hz} \times 1 \mu\text{s} = 5 \cdot 10^{-5}$**
- **Erfordert spezielle Injektionsverfahren**
 - “Multi-turn” Injektion
 - “H- Injektion”

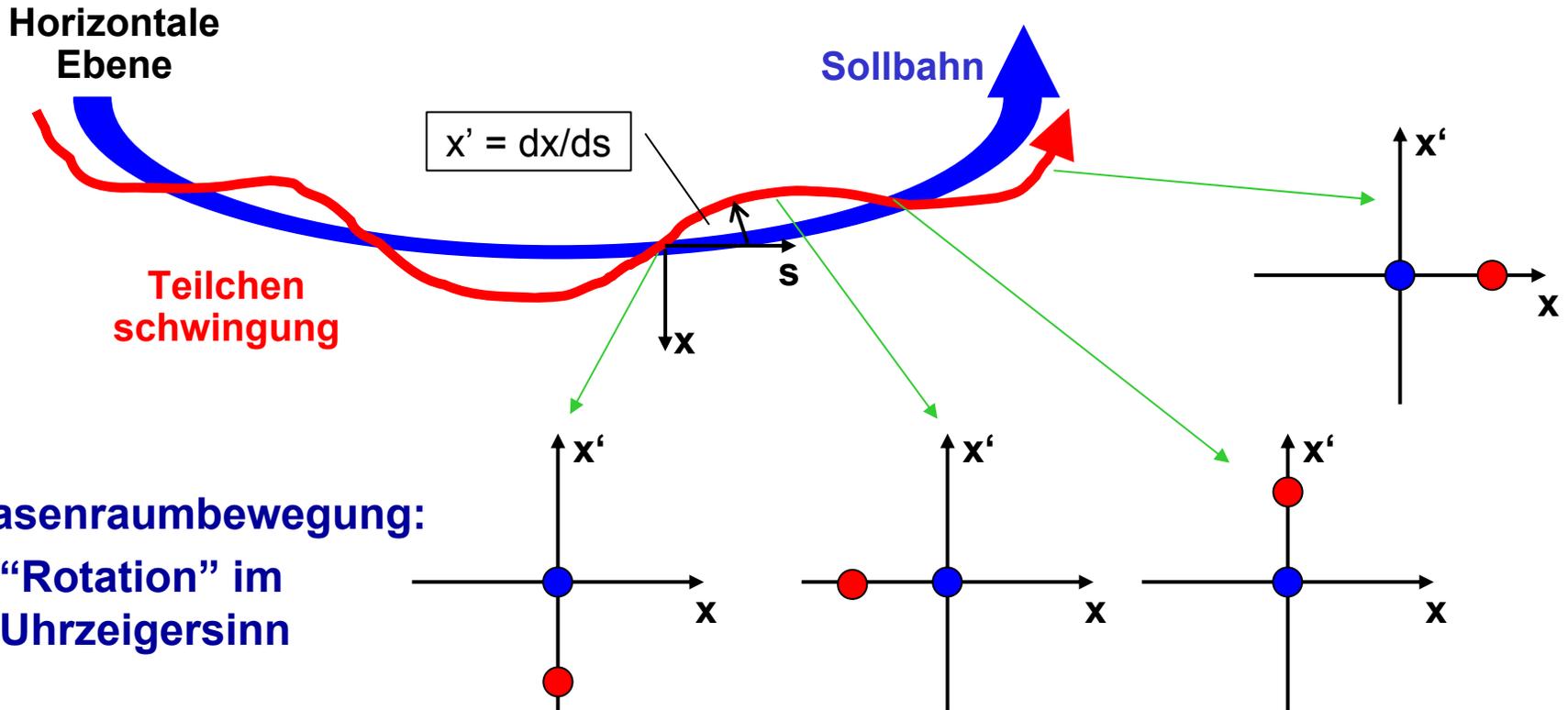
- Teilchen die nicht genau auf Sollbahn sind führen “Betatronschwingungen” um die Sollbahn aus



- Betatronschwingungen werden durch Fokussiermagnete “Quadrupole” hervorgerufen und kontrolliert.
- Horizontal und vertikale Bewegung sind entkoppelt.
 - Allgemeine Bewegung kann in horizontale und vertikale zerlegt werden
 - Quasiharmonische Bewegung $x'' = K(s) x$ mit periodischem $K(s)$
- **TUNE: Anzahl der horizontalen (vertikalen) Schwingungen pro Umlauf.**
 - Tune Q_{hor} , Q_{vert}

Transversaler Phasenraum

- **Konzept zur Beschreibung der transversalen Strahlbewegung**
 - Phasenraumkoordinaten:
 - **Transversale Position (x) bzw. (z)**
 - **Winkel zwischen horizontaler bzw. vertikaler Richtung des Strahles und Sollbahn $x' = dx/ds$ bzw. $z' = dz/ds$.**





Normalisierter Phasenraum

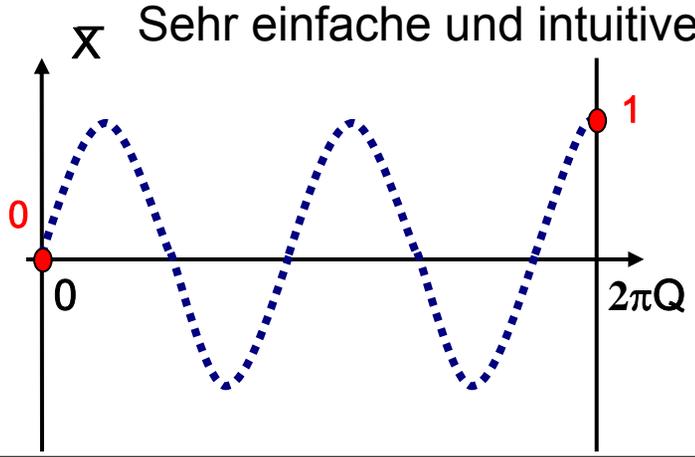
- **Darstellung der Phasenraumbewegung als harmonische Oszillation**
 - Ersetzung der Variablen “s” (Sollbahn) mit μ (Fokussierphase entlang Sollbahn)

$$\begin{pmatrix} X(\mu) \\ X'(\mu) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\mu) & \sin(\mu) \\ -\sin(\mu) & \cos(\mu) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_0 \\ X'_0 \end{pmatrix}$$

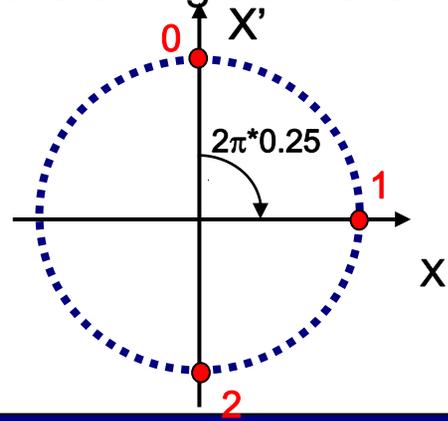
- Im Speziellen folgt für einen ganzen Umlauf mit dem Tune Q:

$$\begin{pmatrix} X \\ X' \end{pmatrix}_1 = \begin{pmatrix} \cos(2\pi Q) & \sin(2\pi Q) \\ -\sin(2\pi Q) & \cos(2\pi Q) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ X' \end{pmatrix}_0$$

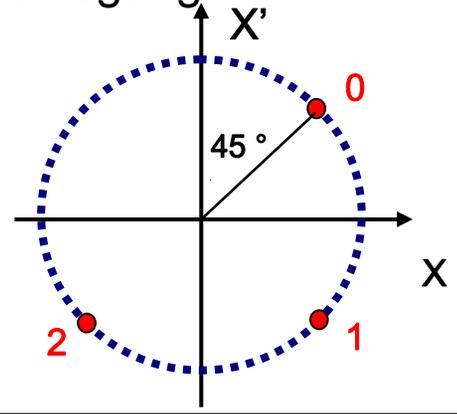
Beispiel: Tune 2.25 2 x 2 Rotationsmatrix



Drei Umläufe, fixer Ort



45 Grad Phasenzuwachs im Beschleuniger





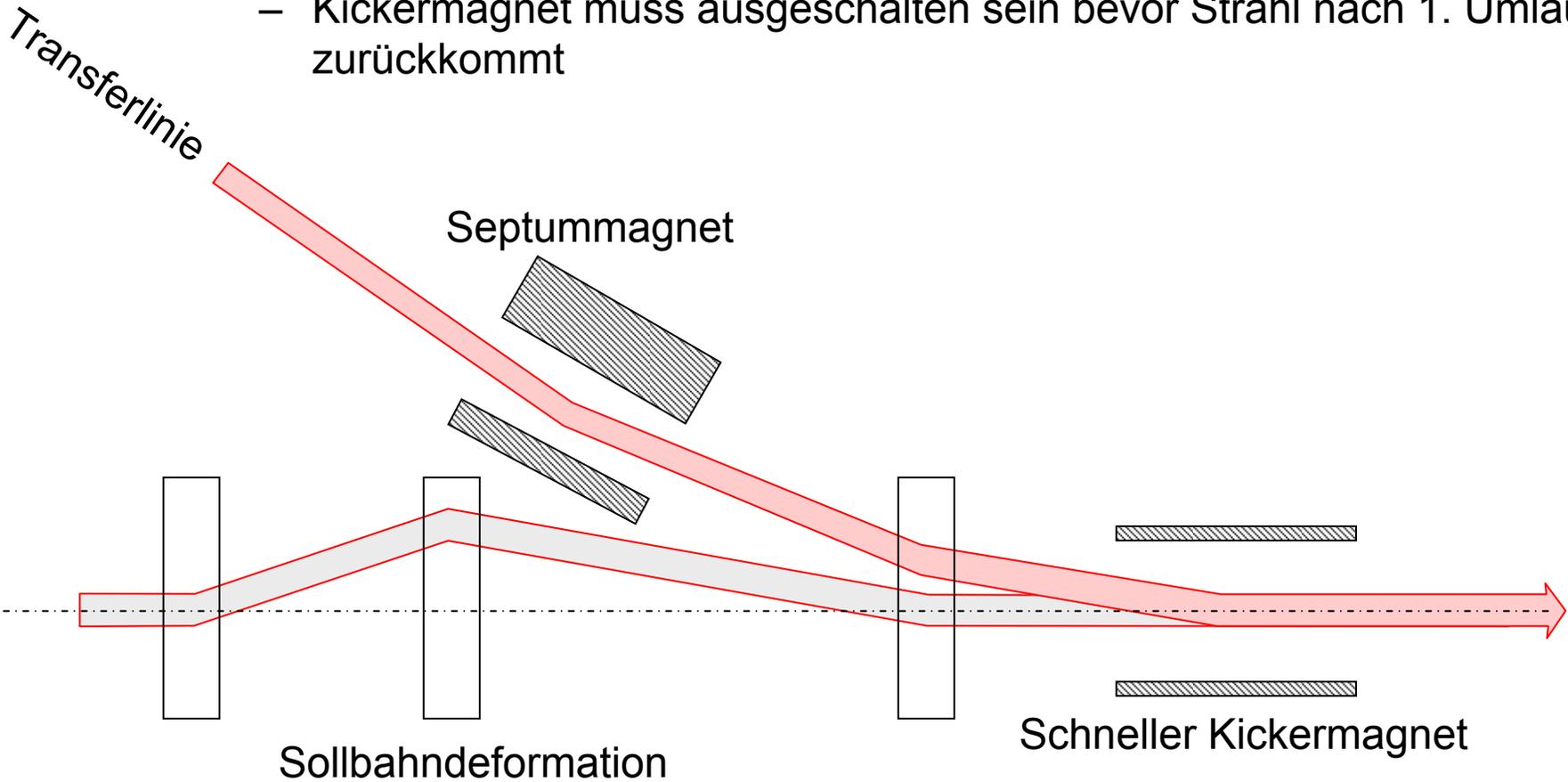
Kohärente Strahlbewegung

- **“Setzt” man den ganzen Strahl neben die Sollbahn, so führt der ganze Strahl Betatronschwingungen aus**
 - Kohärente Schwinungung nutzt man zur Injektion



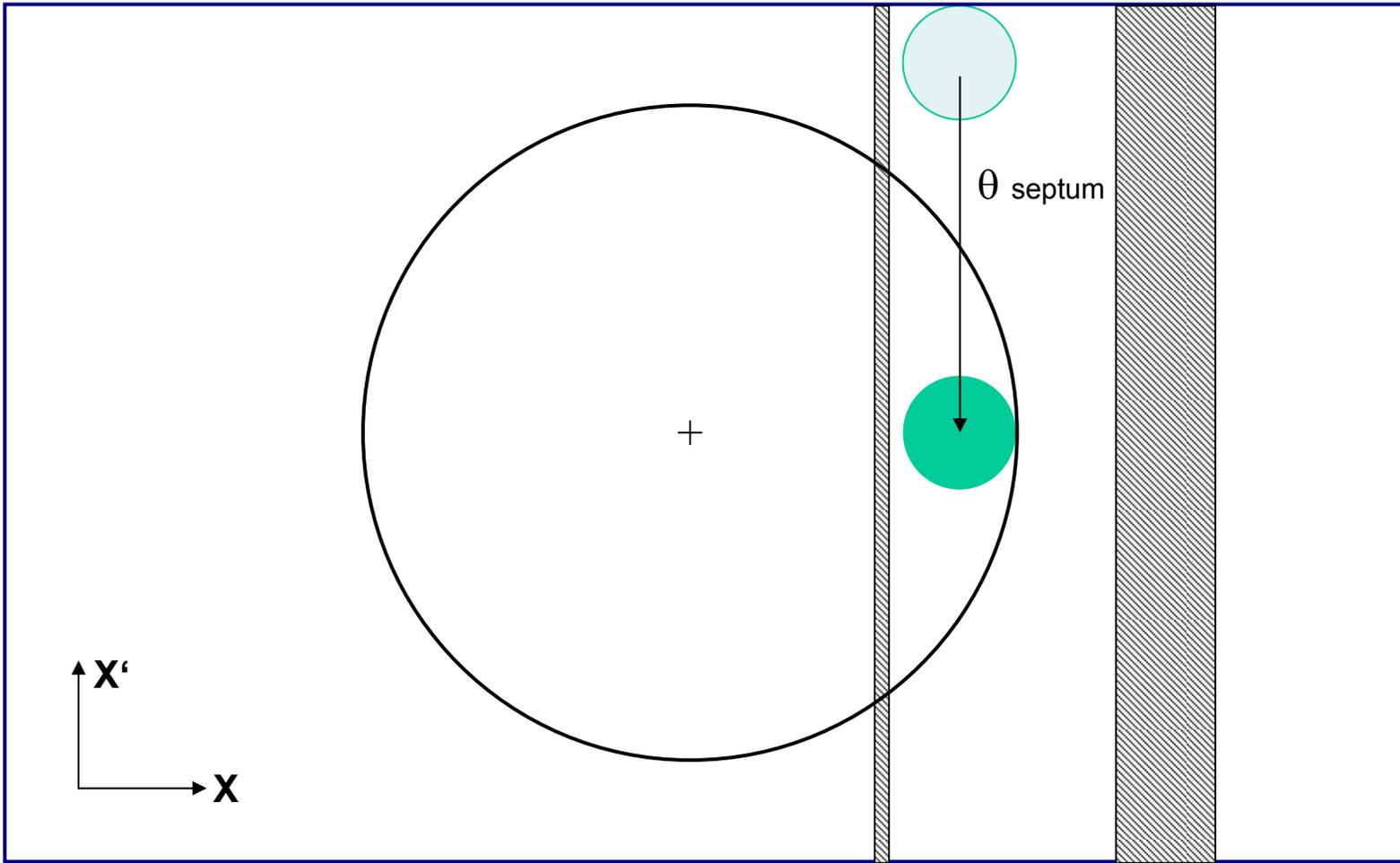
“Single turn” Injektion (horizontale Ebene)

- Sollbahn im Injektionsbereich näher zur Transferlinie abgelenkt.
- Septummagnet lenkt Strahl ~parallel zur Sollbahn.
- Magnet bei Kreuzung mit Sollbahn kompensiert fehlenden Winkel.
- Kickermagnet muss ausgeschaltet sein bevor Strahl nach 1. Umlauf zurückkommt



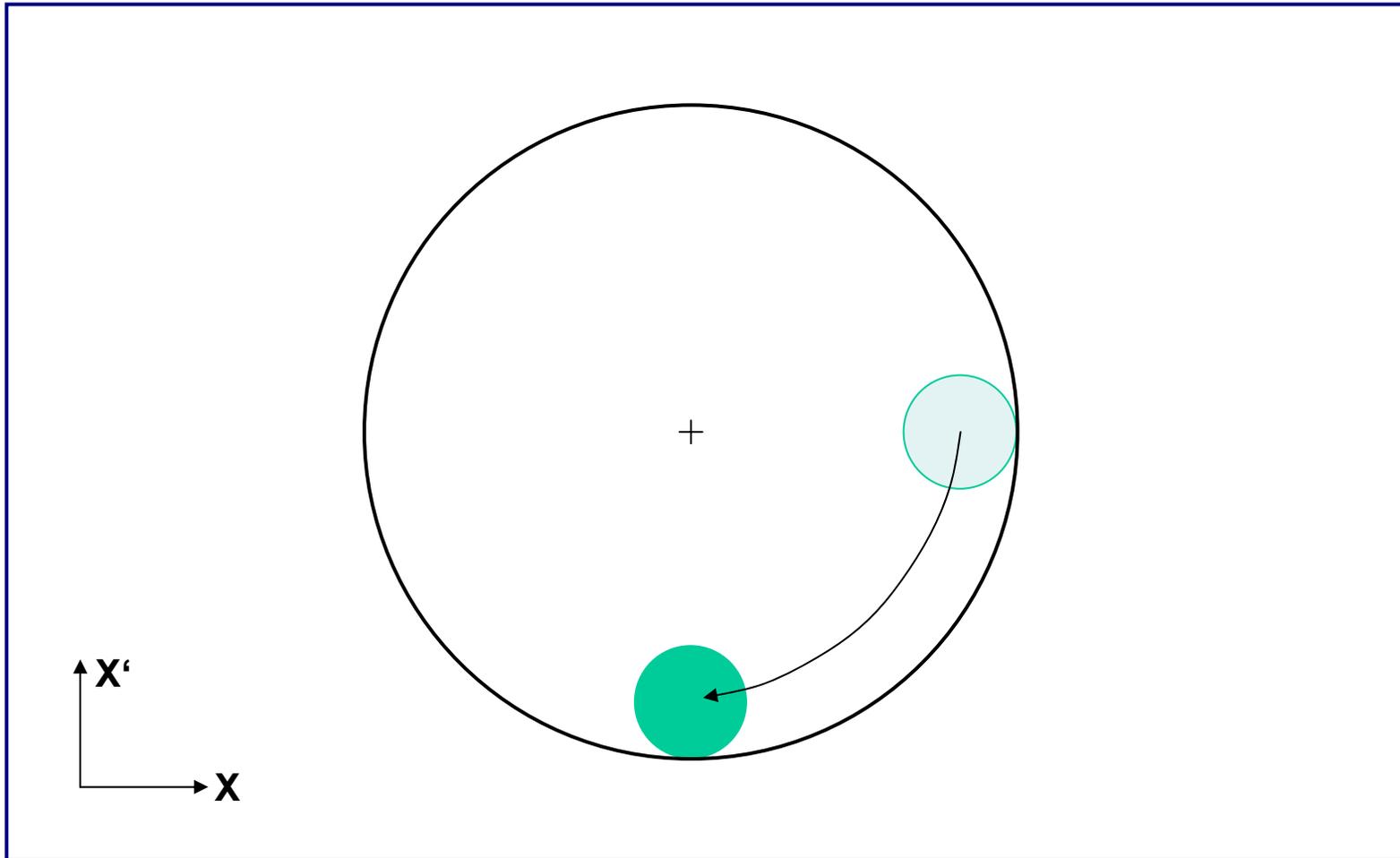
Single-turn Injektion – norm. Phasenraum

Große Winkeländerung mit Septummagnet → Strahl parallel zur Sollbahn



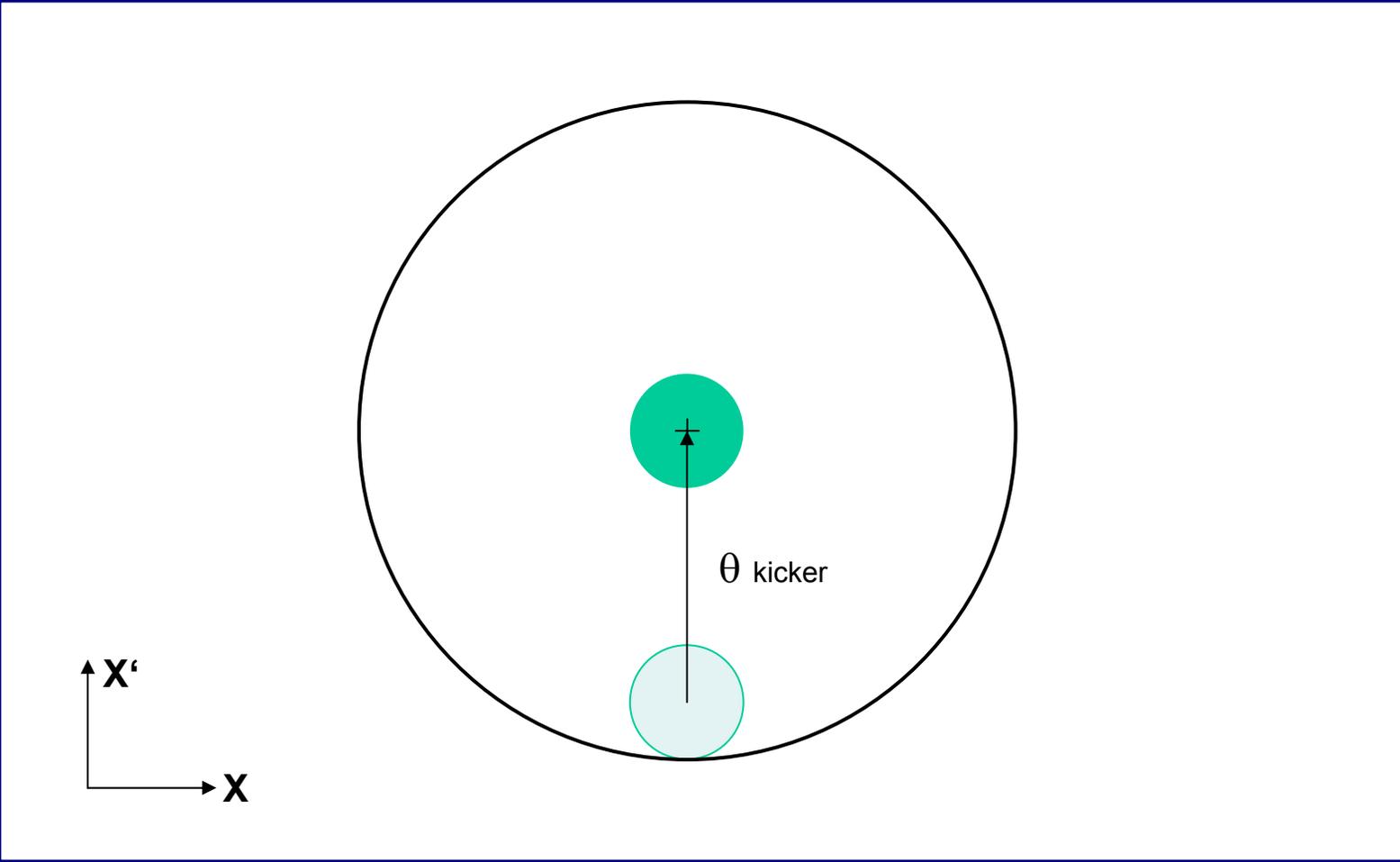
Single-turn Injektion

Etwa $\pi/2$ Phasenzuwachs bis zur Sollbahnkreuzung



Single-turn Injektion

Schneller Kickermagnet um Strahl genau auf Sollbahn zu "setzen".





Single-turn Injektion

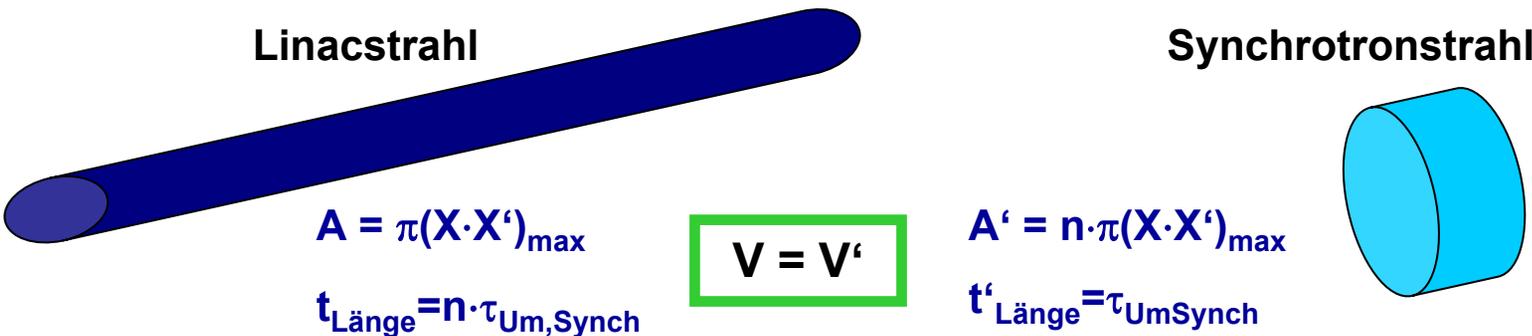
- **Sehr “sauberes” Verfahren**
 - Keine Teilchenverluste
- **Nachteil**
 - Funktioniert nur für 1 Umlauf → kein “Aufwickeln” eines langen Linacstrahles während vieler Umläufe, folgt aus Liouville.
- **Liouville Theorem**
 - In abgeschlossenem konservativen System ist Phasenraumdichte konstant
 - Phasenraum um die Sollbahn ist vollständig besetzt nach 1 Umlauf.
Phasenraumvolumen = Umfang x transversale Phasenraumfläche.
 - Schaltet man den Injektionskicker nicht aus wird weiter Strahl auf die Sollbahn gelenkt, gleichzeitig aber der schon umlaufende Strahl wieder extrahiert!
- **Ausweg: Füllen von unterschiedlichen Phasenraumbereichen bei aufeinanderfolgenden Umläufen.**

Prinzip der “multi-turn” Injektion

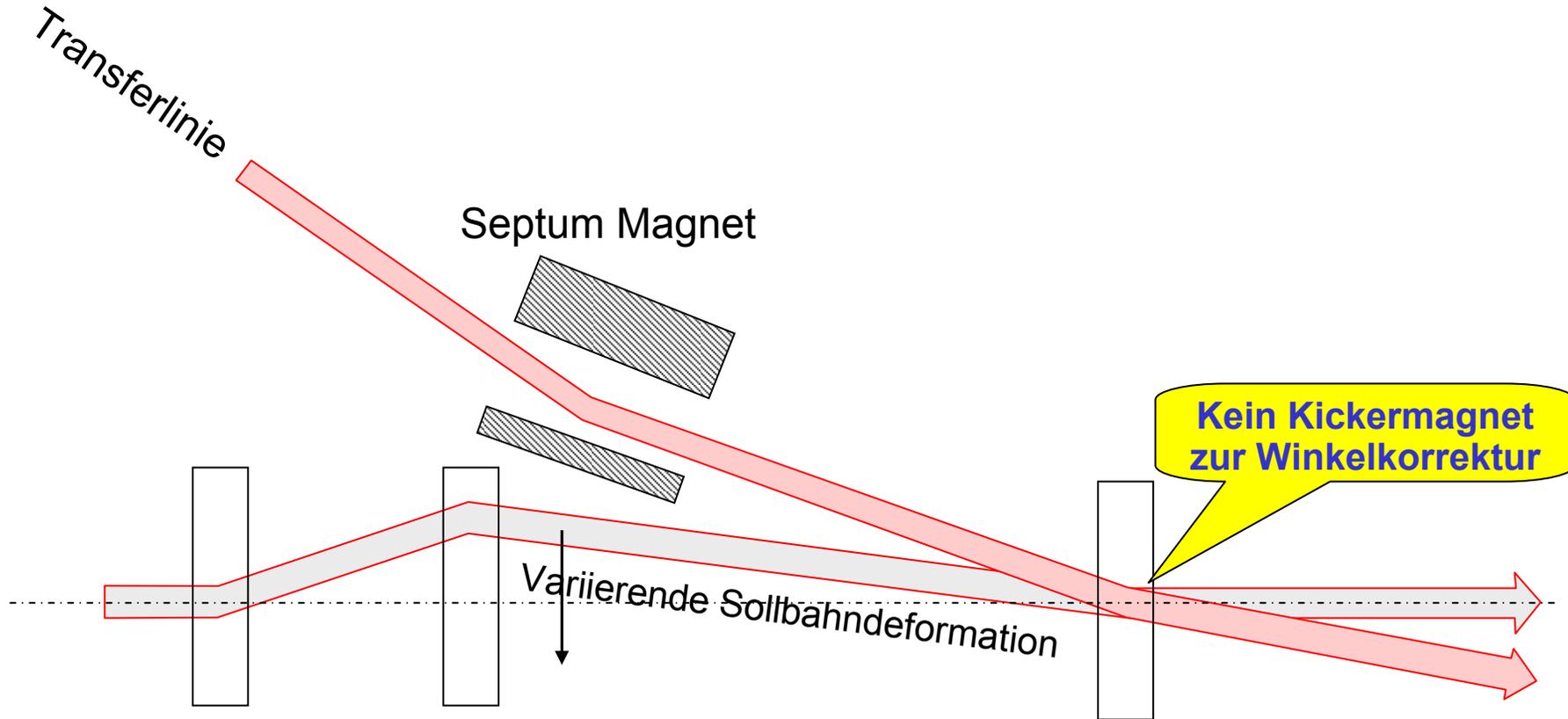
- **Injektion des Strahles knapp neben die Sollbahn**
 - Strahl macht kohärente Schwinungen um Sollbahn (mit Tune)
 - Kontinuierliche Vergrößerung des Abstands injizierter Strahl - Sollbahn
 - Ausfüllen des Phasenraumes von kleinen zu großen Schwinungsamplituden

- **Parameter**
 - **Abstand zur Sollbahn** (kontrolliert mit lokalen Korrekturmagneten)
 - **Horizontaler Tune** (Anzahl der Schwinungen um Sollbahn pro Umlauf)

- **Ziel ist Umschichtung des Phasenraumvolumens**



Multi-turn Injektion (horizontale Ebene)

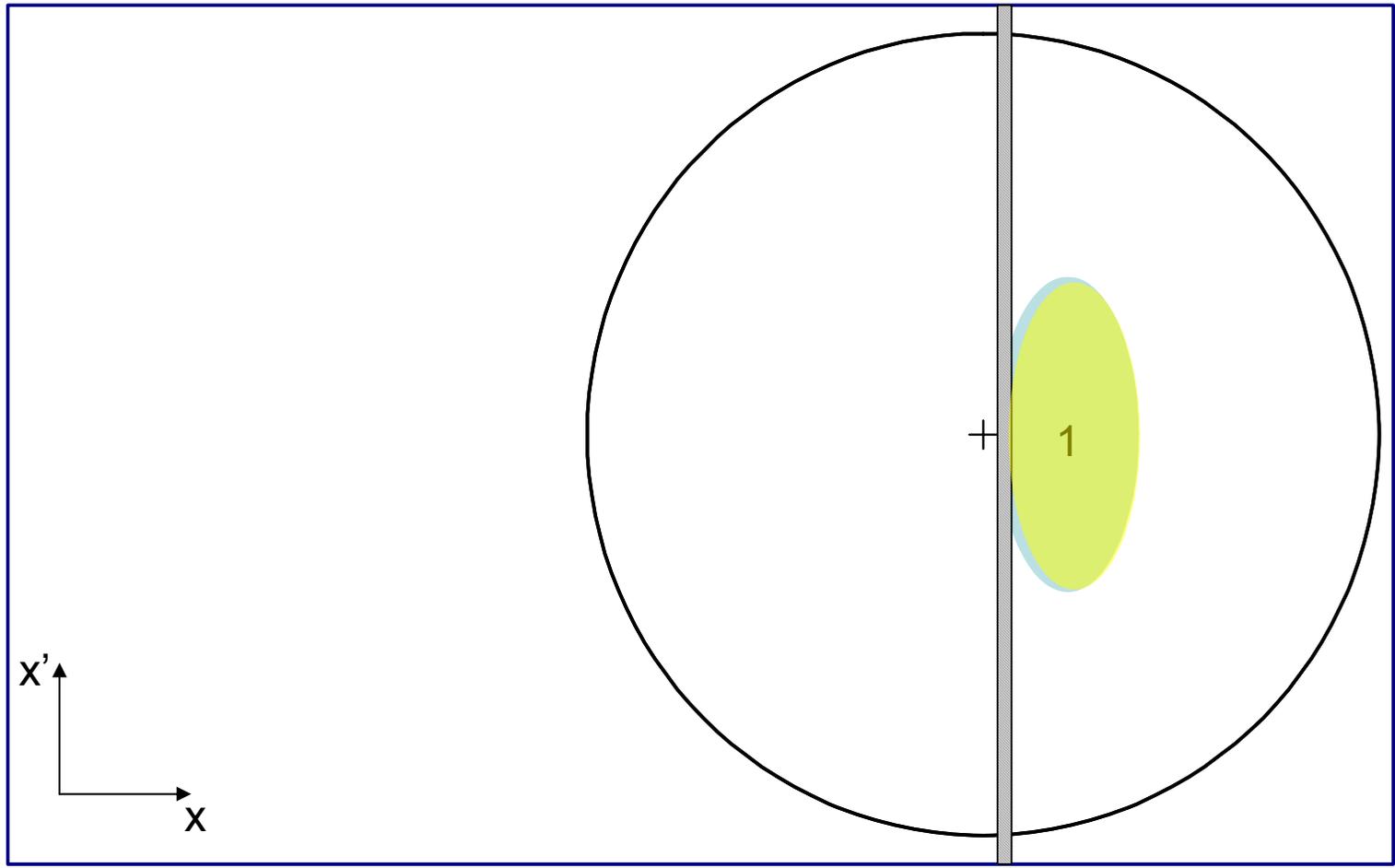


- **Beispiel:**

- Horizontaler Tune $Q_h = n.25$ (Strahl rotiert $n+\pi/2$ im Phasenraum pro Umlauf)
- Kontinuierliche Reduktion der Sollbahndeformation (Vergrößerung des Abstands injizierter Strahl – Sollbahn)

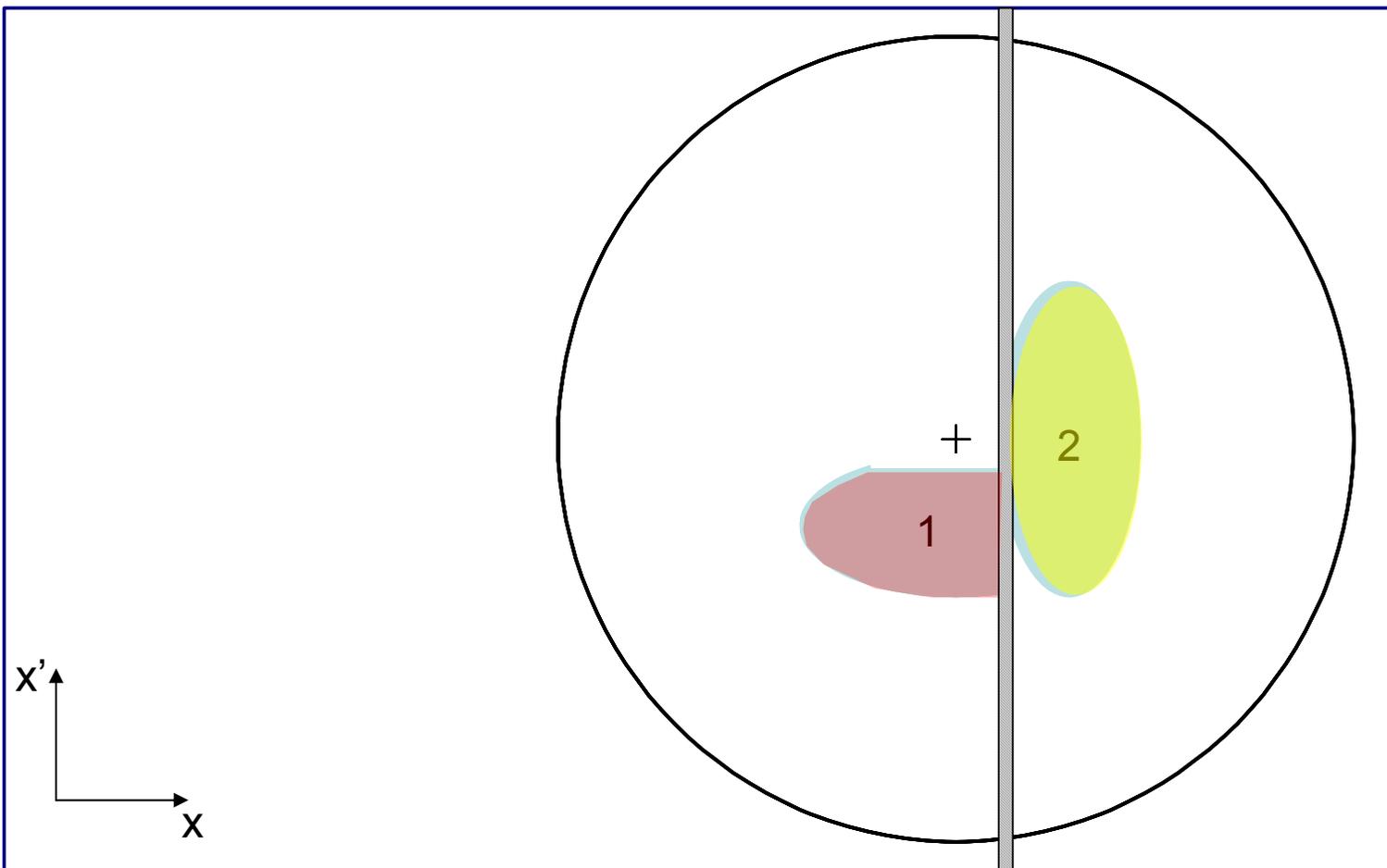
Multi-turn Injektion (norm. Phasenraum)

Turn 1



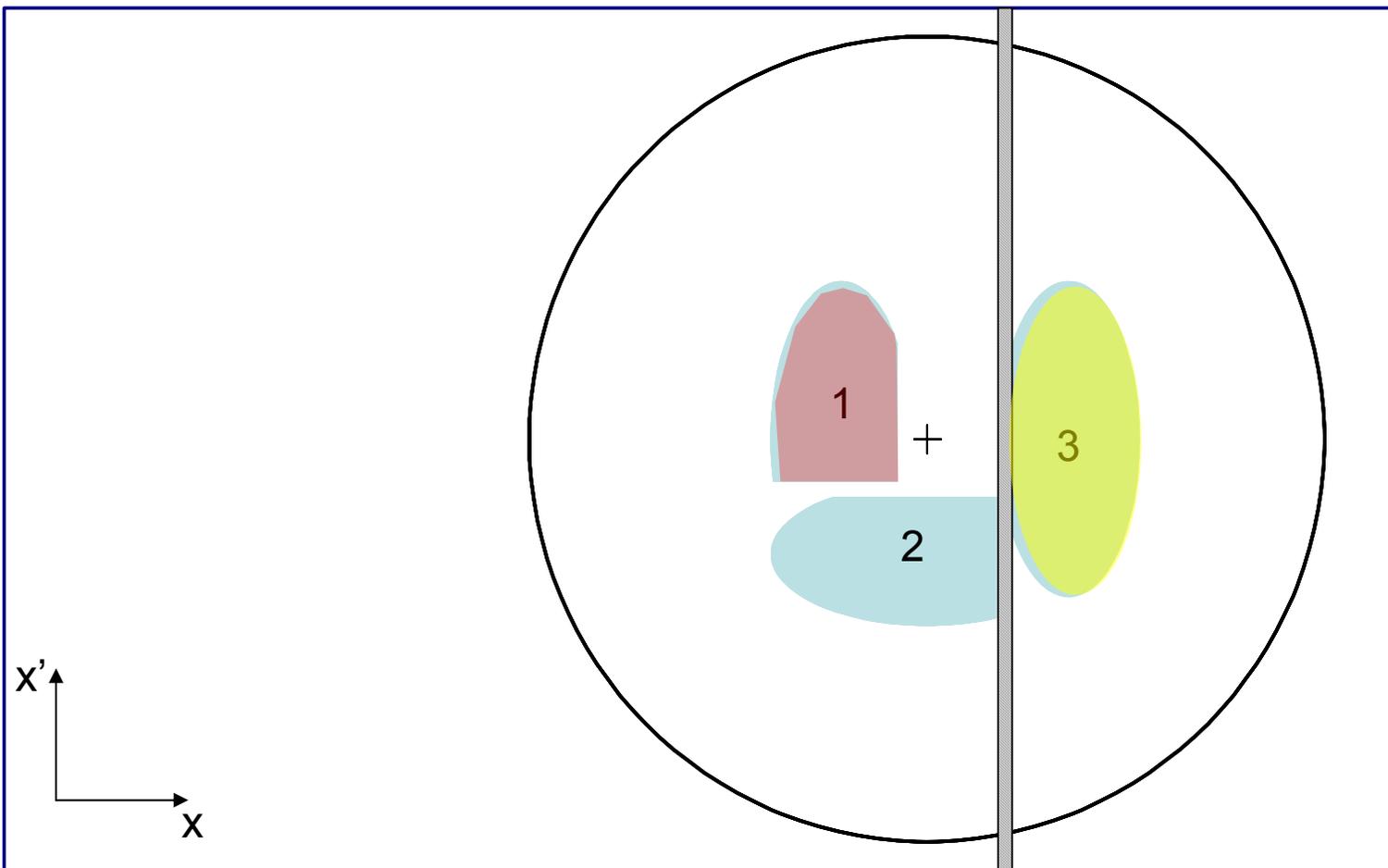
Multi-turn Injektion

Turn 2



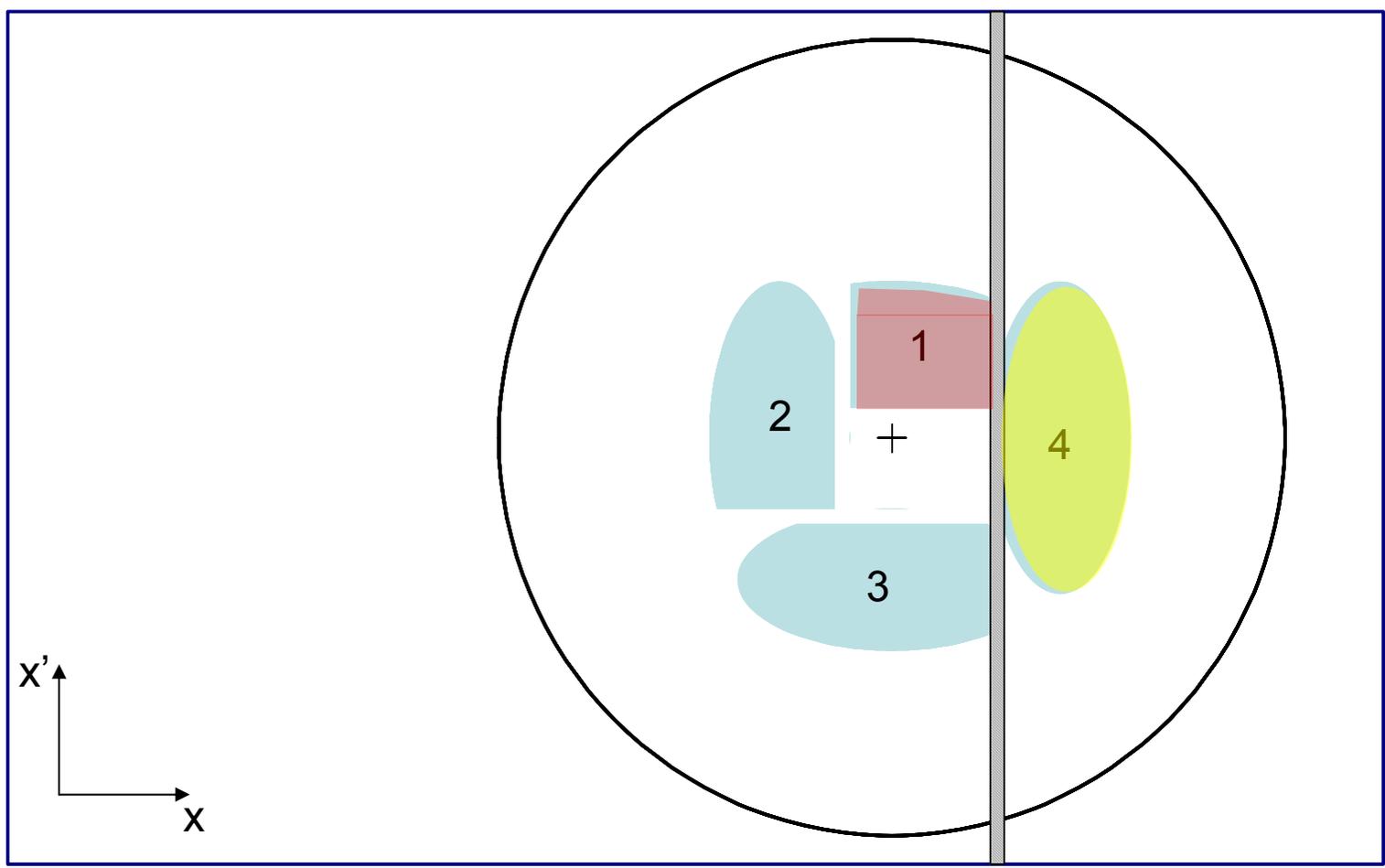
Multi-turn Injektion

Turn 3



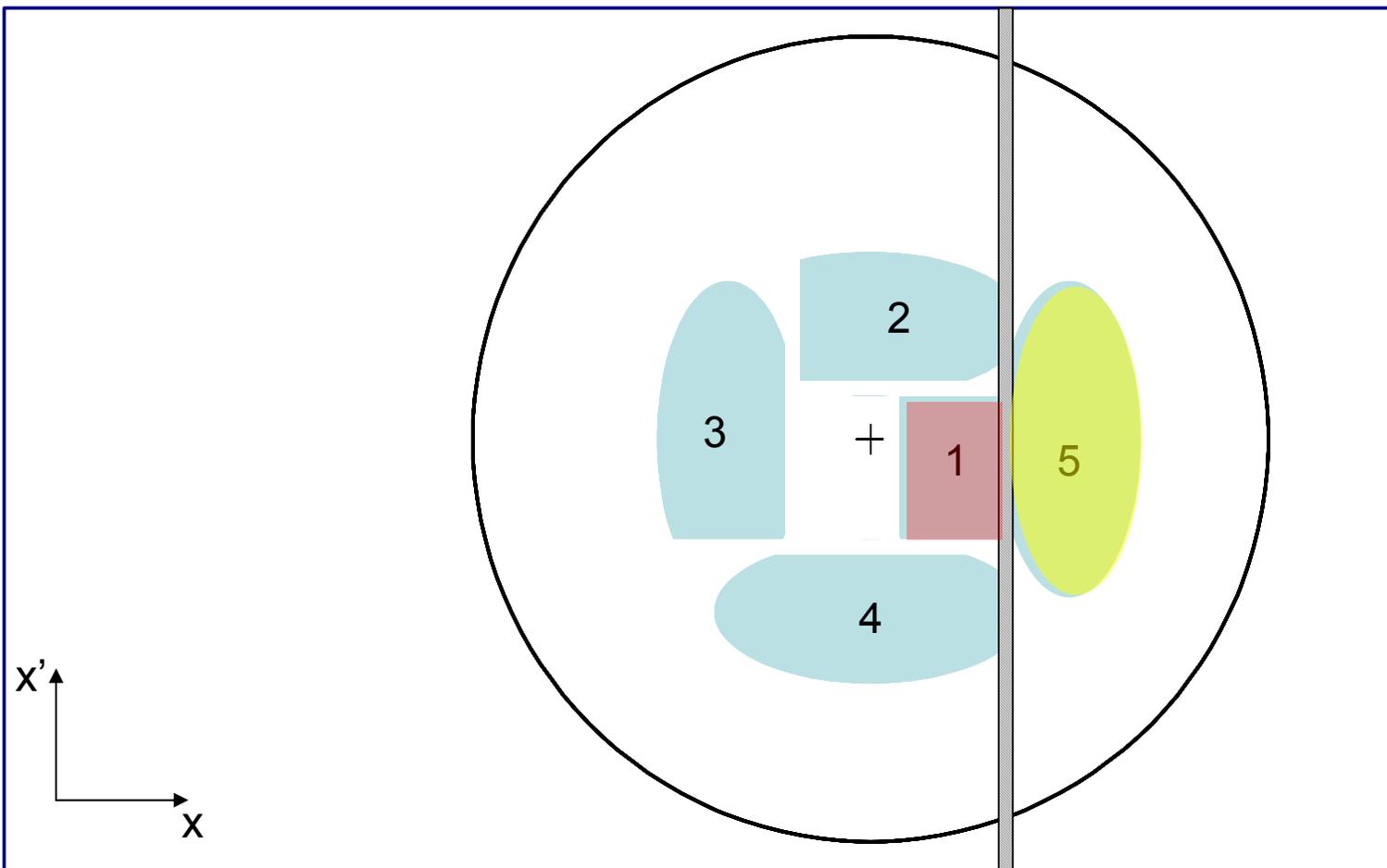
Multi-turn Injektion

Turn 4



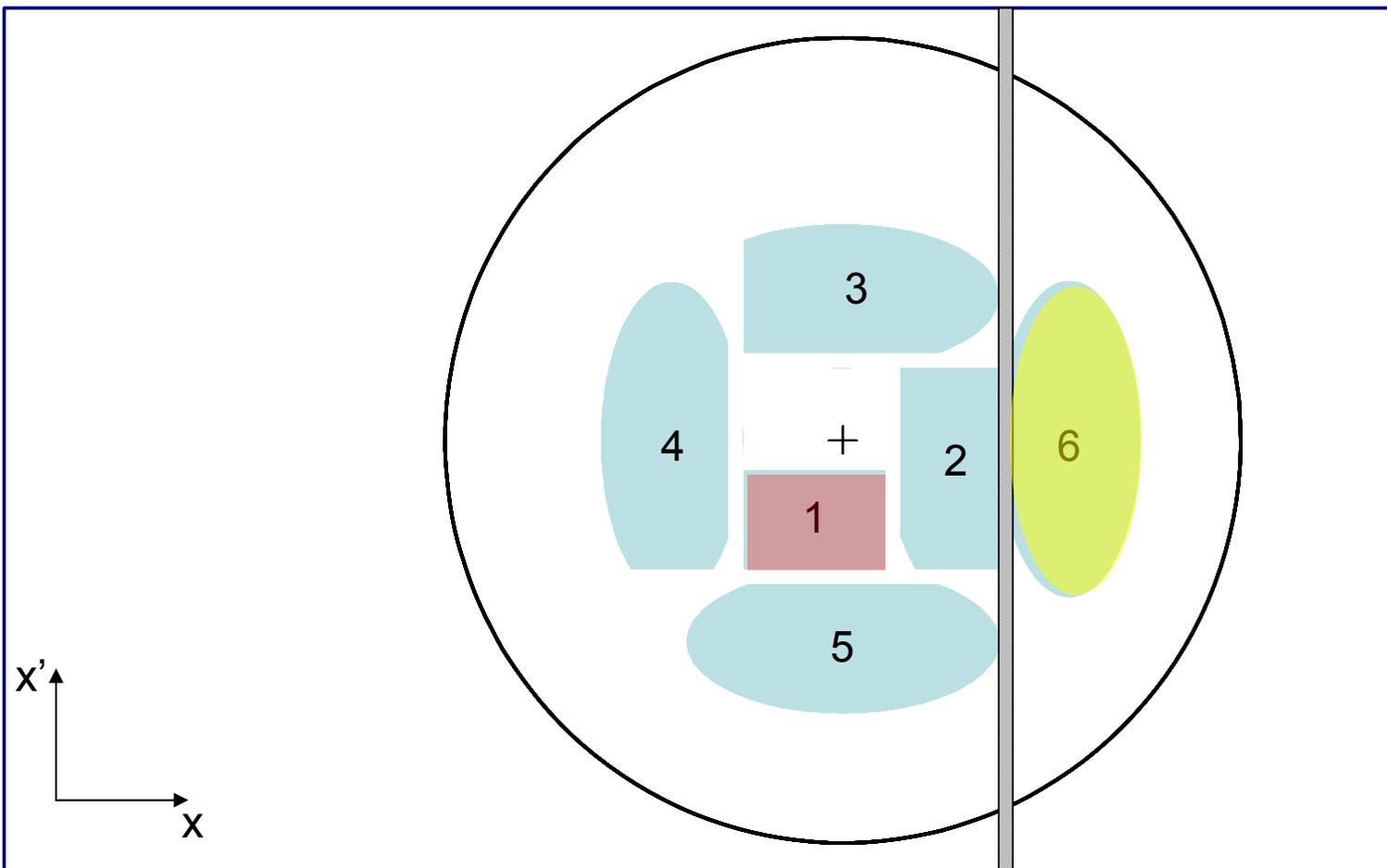
Multi-turn Injektion

Turn 5



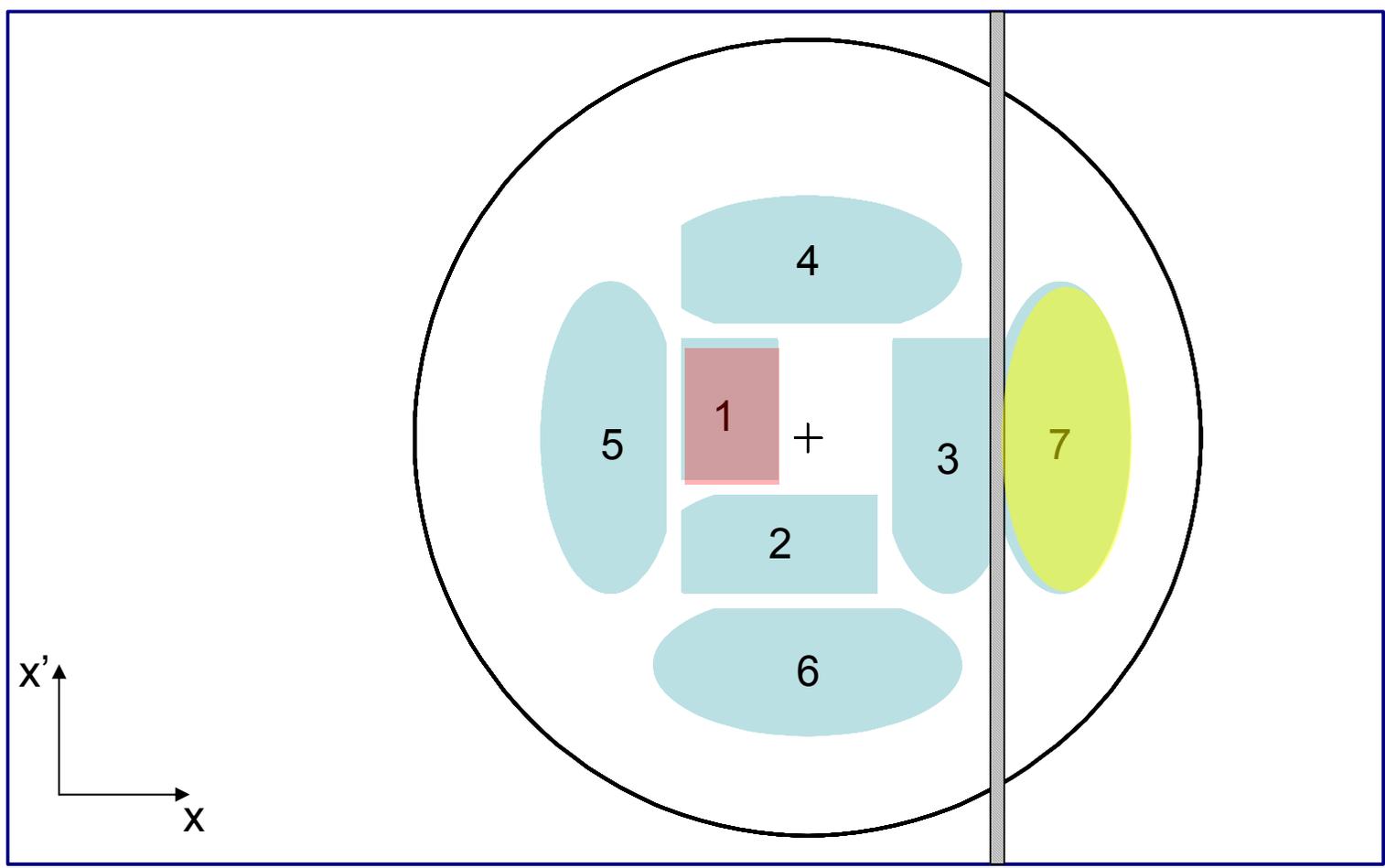
Multi-turn Injektion

Turn 6



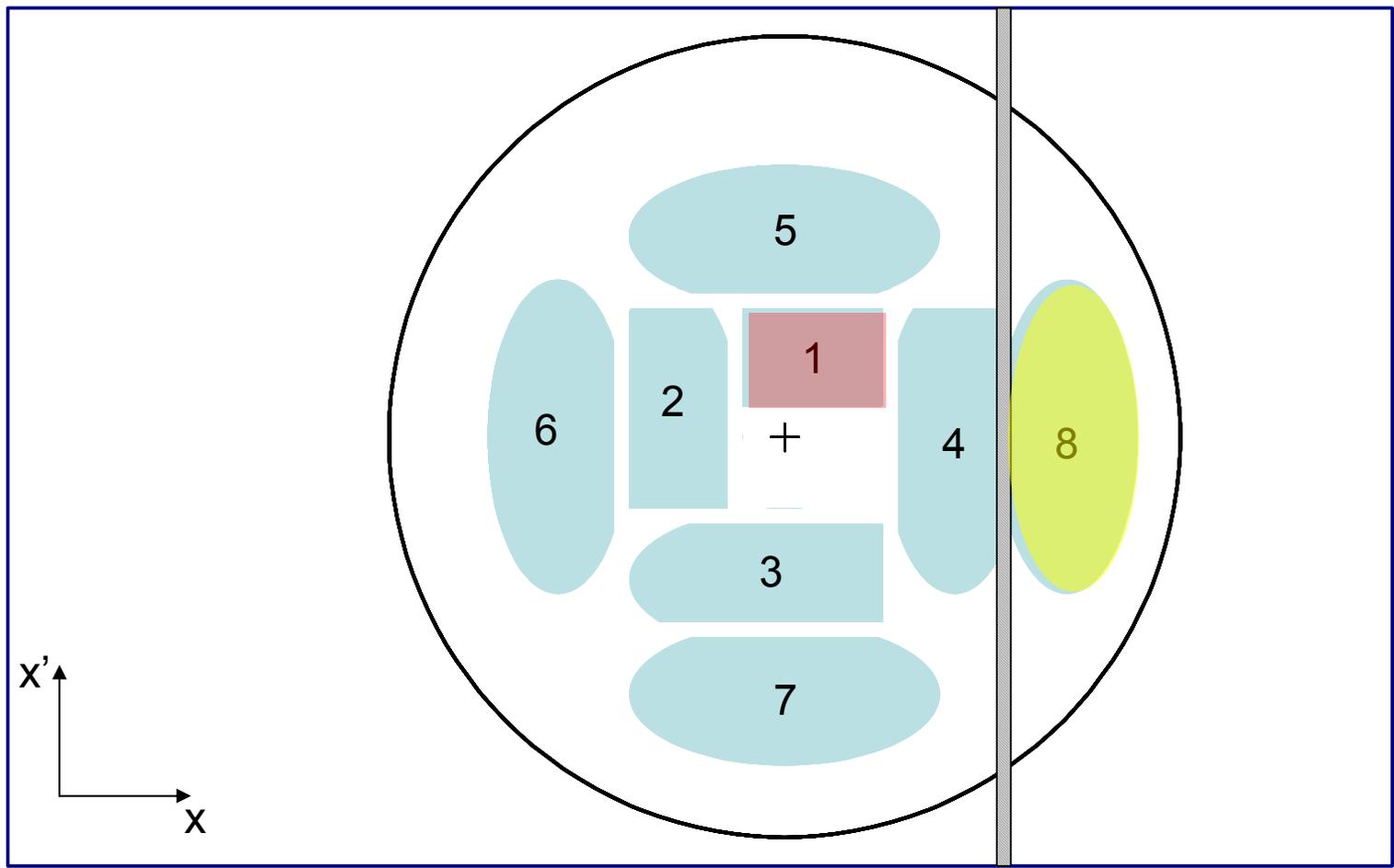
Multi-turn Injektion

Turn 7



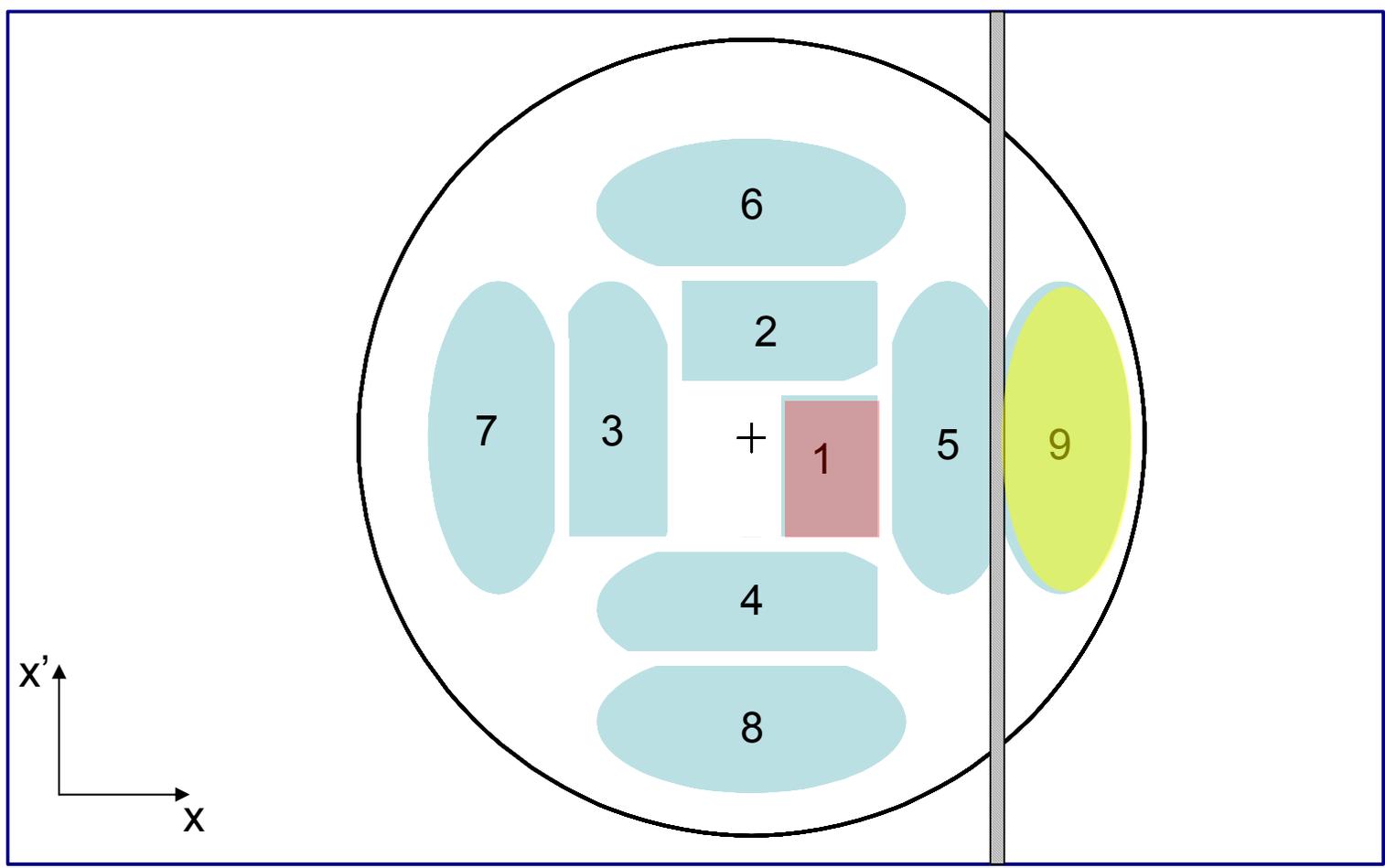
Multi-turn Injektion

Turn 8



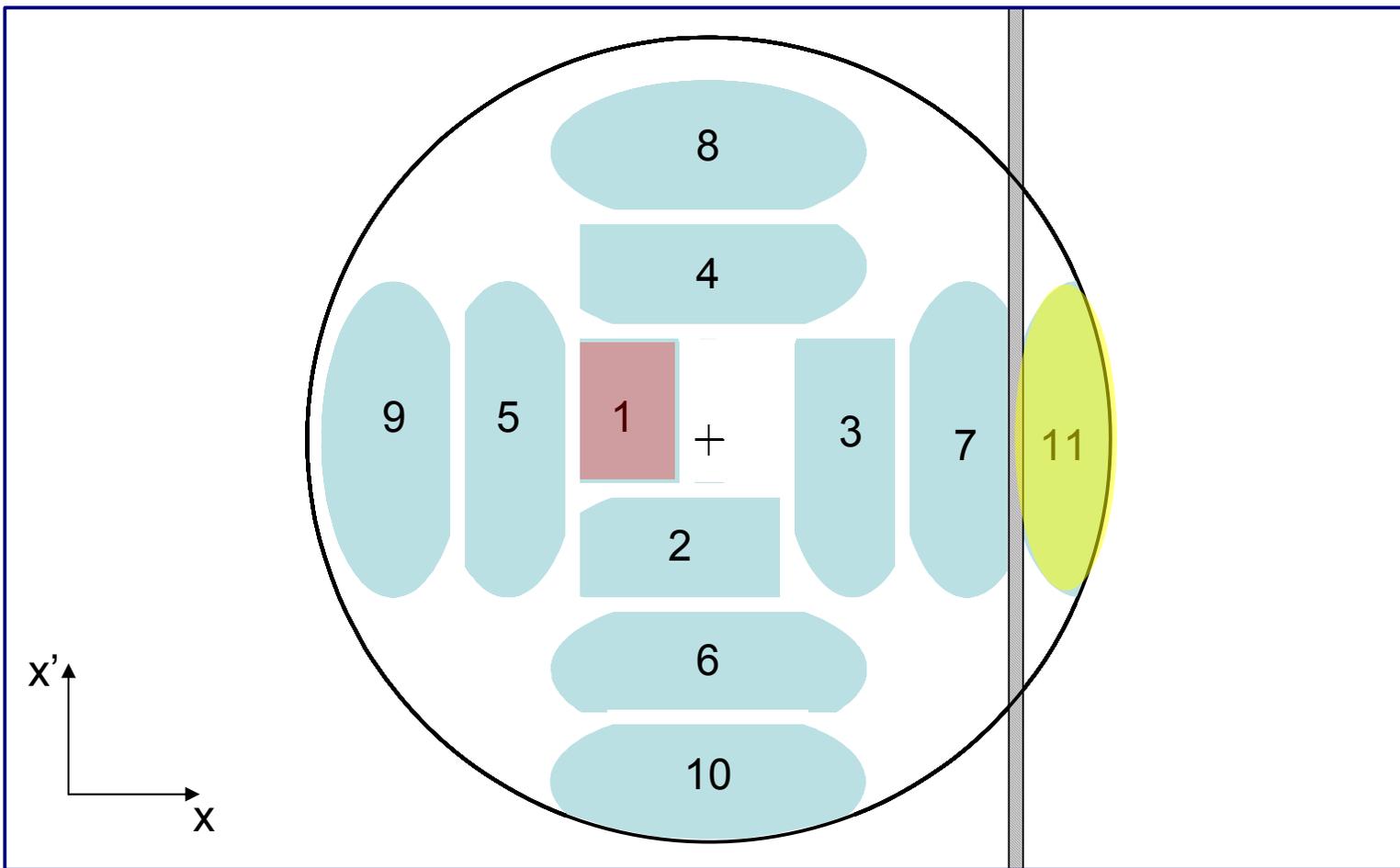
Multi-turn Injektion

Turn 9



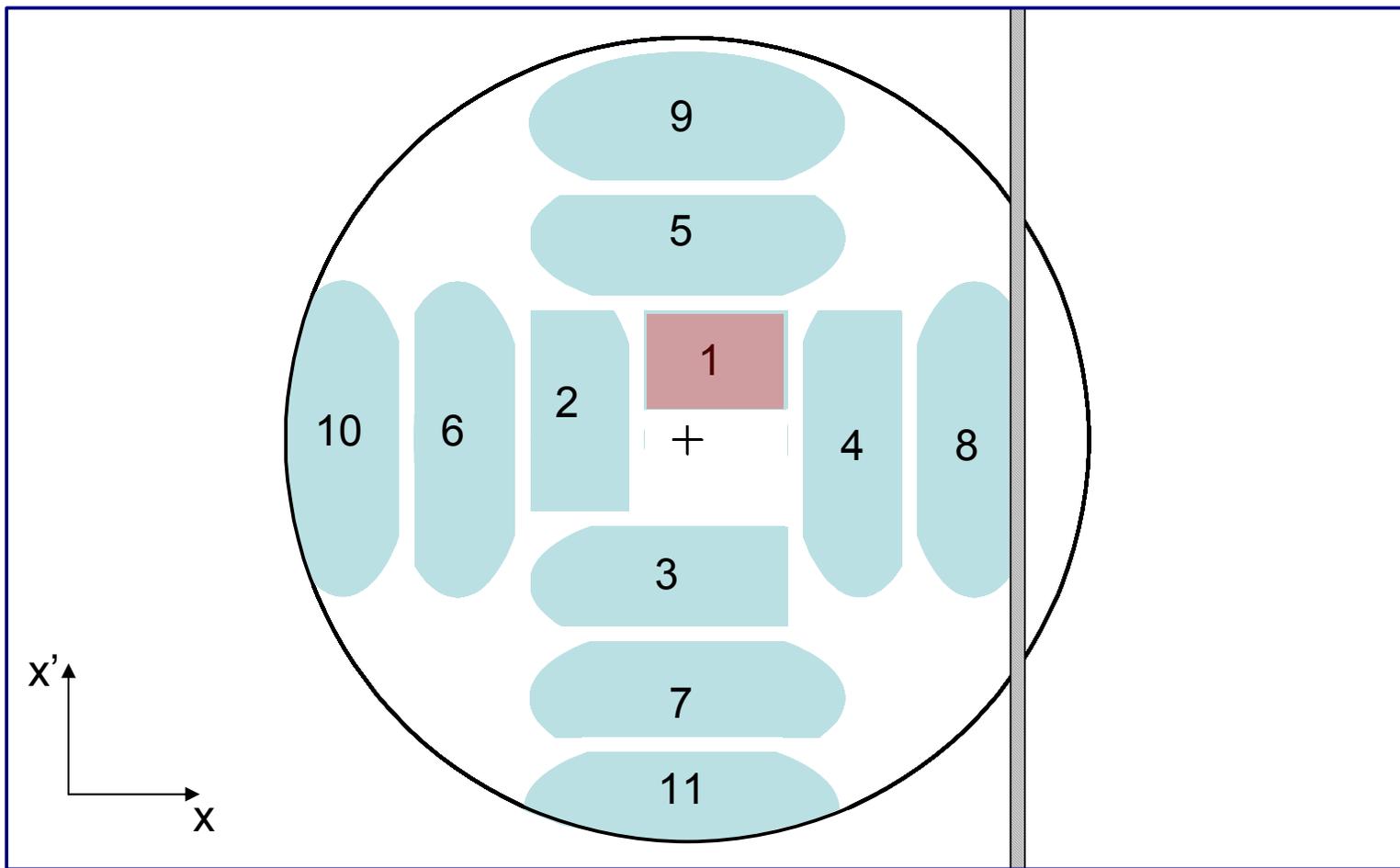
Multi-turn Injektion

Turn 11



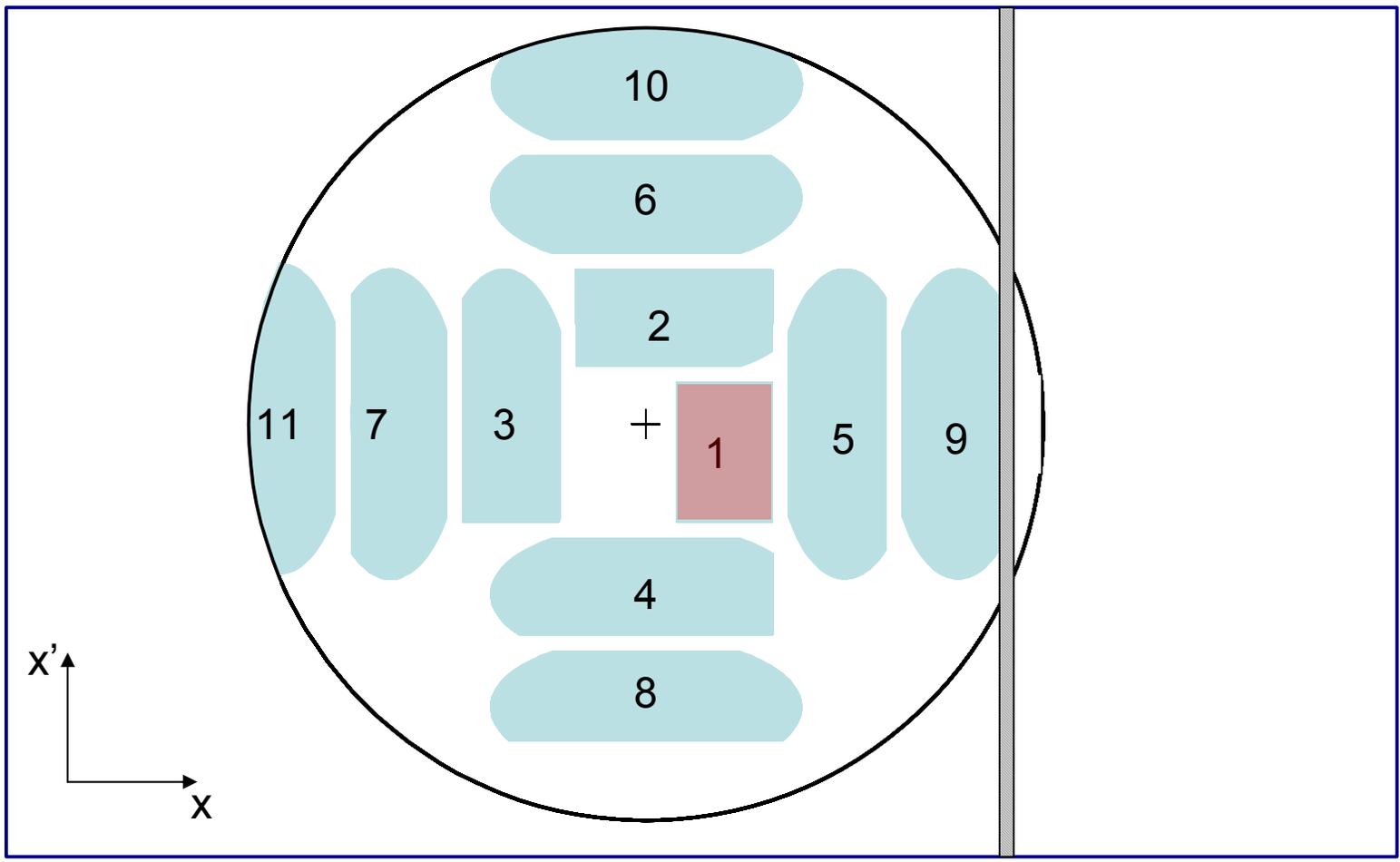
Multi-turn Injektion

Turn 12



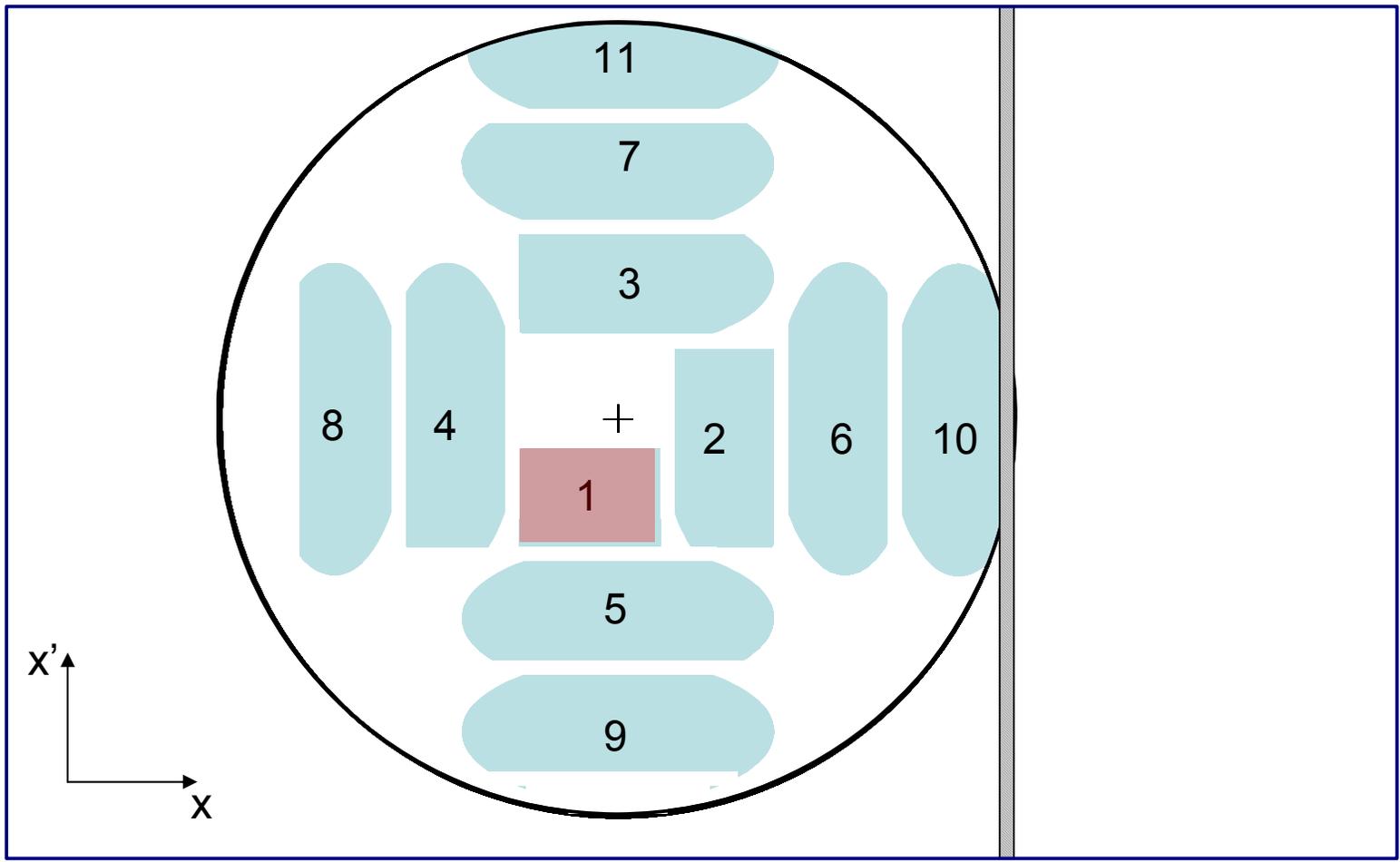
Multi-turn Injektion

Turn 13



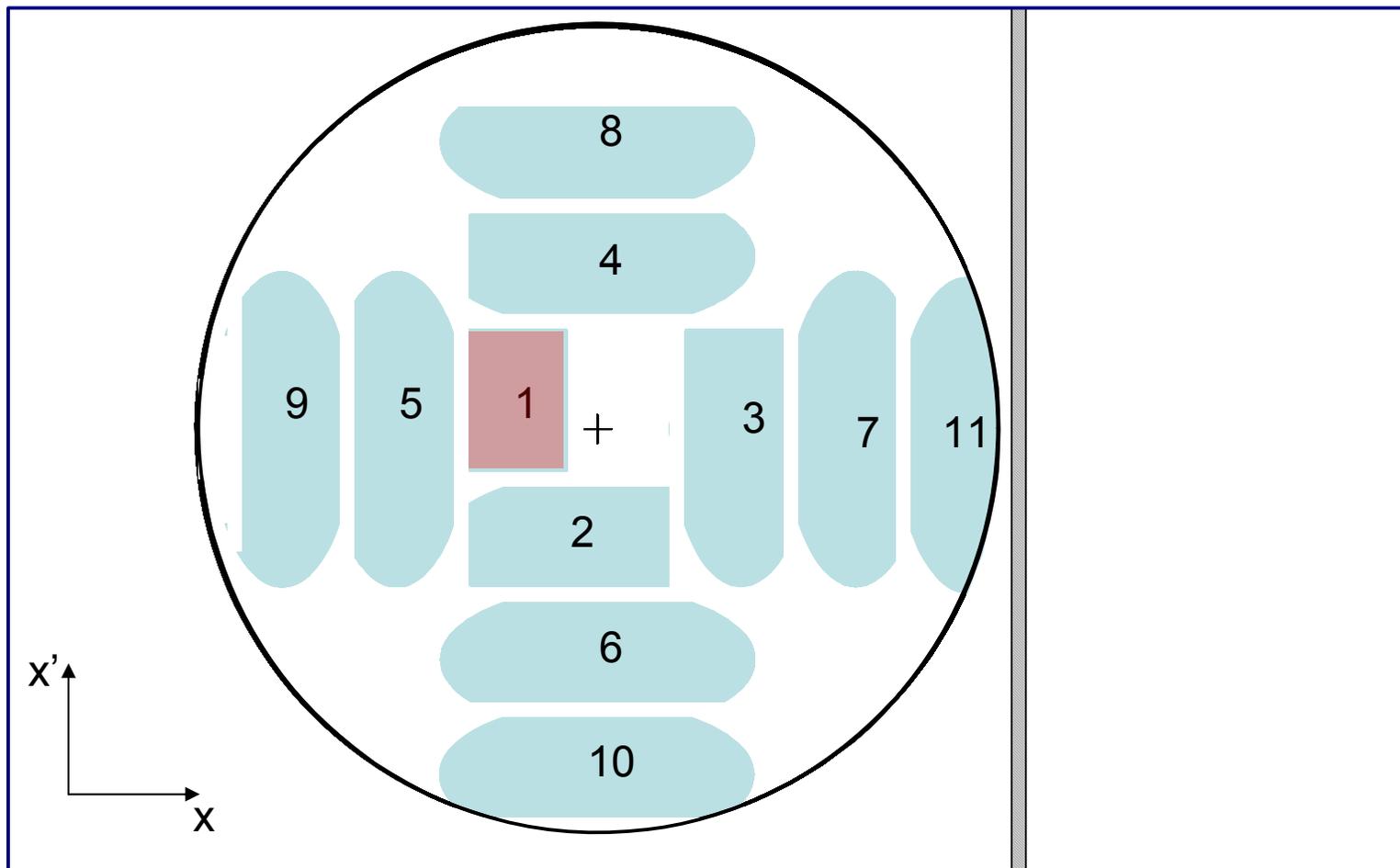
Multi-turn Injektion

Turn 14



Multi-turn Injektion

Turn 15



H- Injektion (Ladungstausch)

- **Multi-turn Injektion:**

- Kein “sauberes” Verfahren
- Teilchenverluste ($\sim 10 - 50 \%$)!
- Umschichtung des Phasenraumvolumens aber nicht Erhöhung der Dichte.

- **Verbesserung mittels H- Injektion**

- Injektion eines H^- Strahles (Masse wie p aber negative Ladung).
- Entgegengesetzte Ablenkung im Magnetfeld (Lorentzkraft)

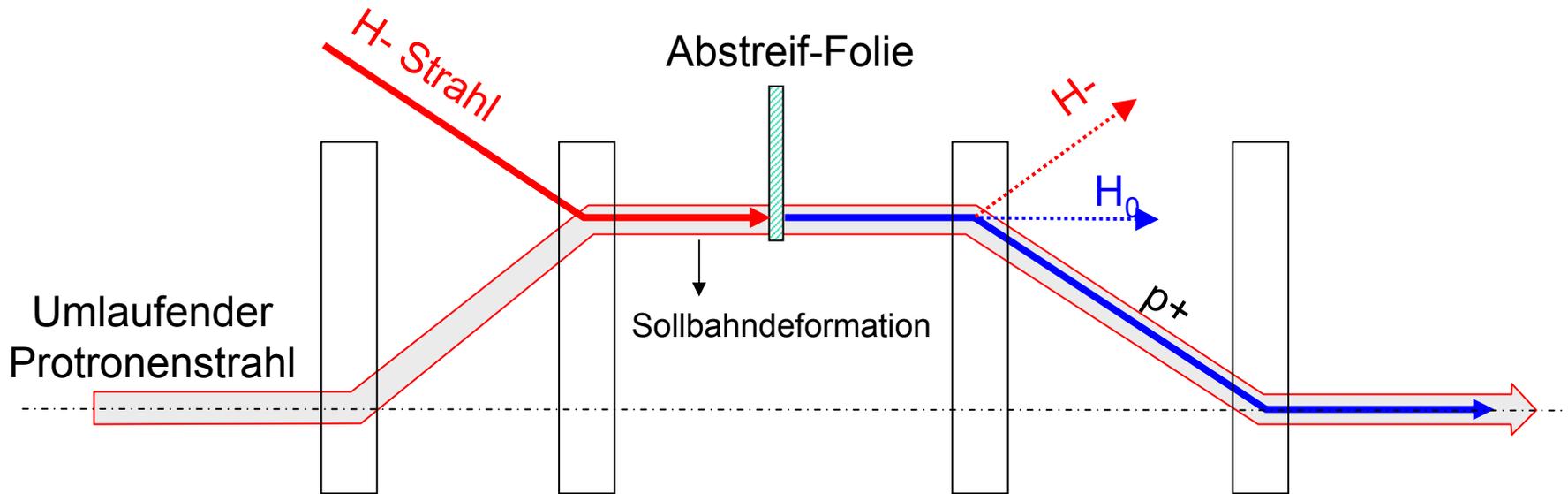
$$F_{\text{radial}} = \pm qvB$$

- Abstreifung von 2 Elektronen ($H^- \rightarrow p^+$) mittels dünner Folie, wenn injizierter und zirkulierender Strahl sich überschneiden.

- **“Überlistung” des Liouville Theorem**

- Erhaltung der Gesamtphasendichte mit den abgestreiften Elektronen.
- Ermöglicht mehrmalige Injektion in den gleichen (Protonen) Phasenraum.

H- Injektion (horizontale Ebene)



- **Kombination der H- Injektion mit multi-turn Prinzip**

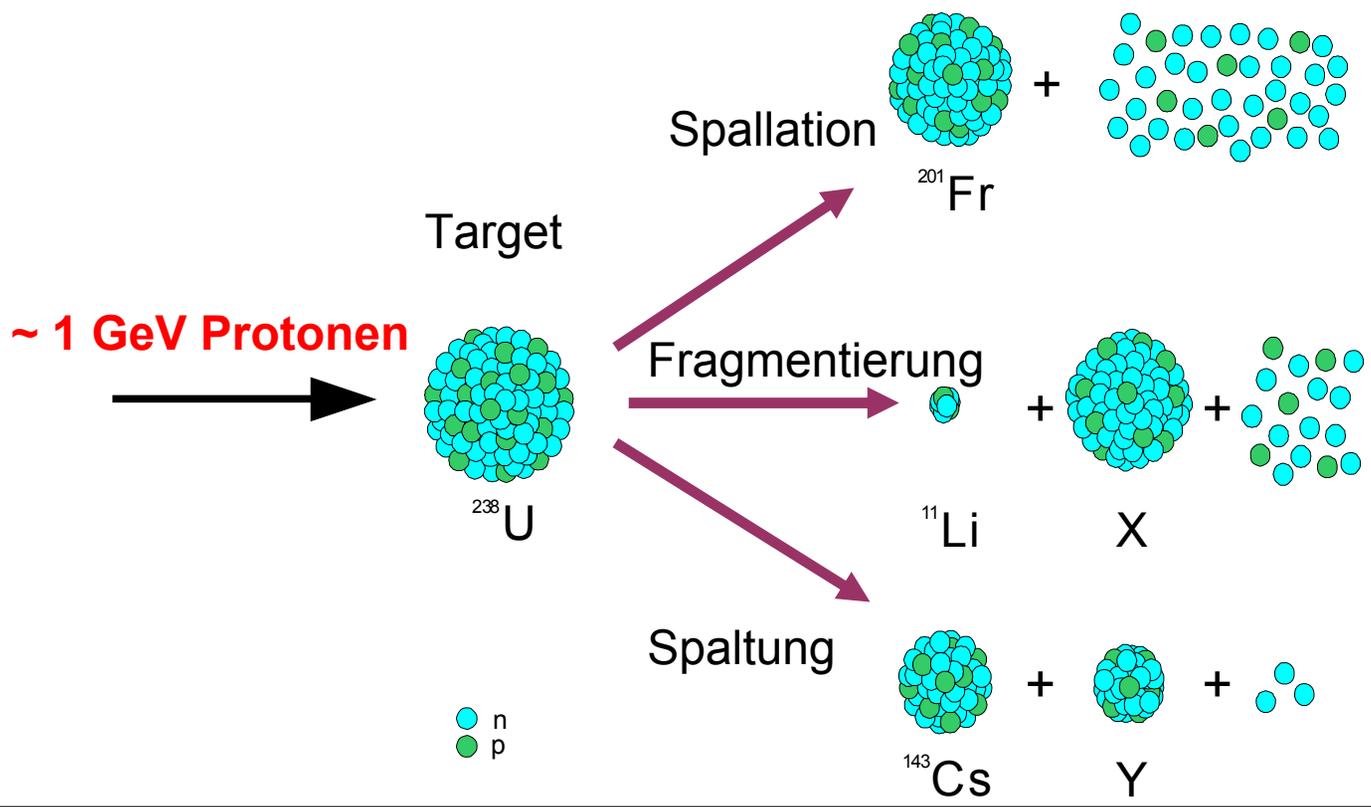
- Umlaufender Strahl kann aber mehrfach durch Folie geführt werden
- Dadurch Erhöhung der Phasenraumdicke möglich (~Faktor 3)
- Sehr sauberes Verfahren (Teilchenverluste im Bereich 1%)

- **Methode der Wahl für Hochintensitätsanwendungen**

- Hauptproblem ist Stabilität der Kohlenstoff- oder Aluminiumfolien (Folie wird stark aktiviert)! **Foliendicke (99% Abstreifung) 800 MeV - 200 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ (~1 μm C)**

Neutronenspallationsquellen - Prinzip

- **Erzeugung von Neutronenstrahlen über Spallationsreaktion:**
 - Beschuss eines fixen Targets mit hochenergetischen Protonen
 - Anregung der Atomkerne des Targetmaterials
 - Spontanes “Abdampfen” von Spallationsneutronen





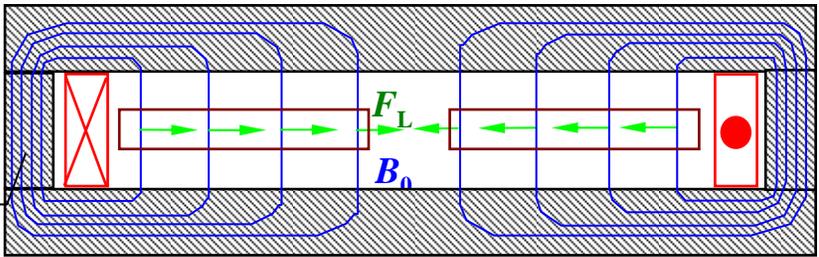
Überblick: Beschleuniger - Spallationsquellen

- **Quasi-kontinuierlich:**
 - Basierend auf Zyklotron.
 - Strahlstruktur: quasi-kontinuierlich mit 10...50 MHz Substruktur
 - **Paul Scherer Institut (Zyklotron)**
- **Lange Pulse:**
 - Basierend auf Linearbeschleuniger.
 - Strahlstruktur: ~1 ms Pulslänge, 50 Hz Wiederholfrequenz
 - **ESS (Linearbeschleuniger direkt)**
- **Kurze Pulse:**
 - Basierend auf Linac und Synchrotron
 - Strahlstruktur: ~1 μ s Pulslänge, 50 Hz Wiederholfrequenz
 - **AUSTRON (Synchrotron als Beschleuniger)**
 - **ESS (Synchrotron als Speicherring)**

Prinzip des Zyklotrons

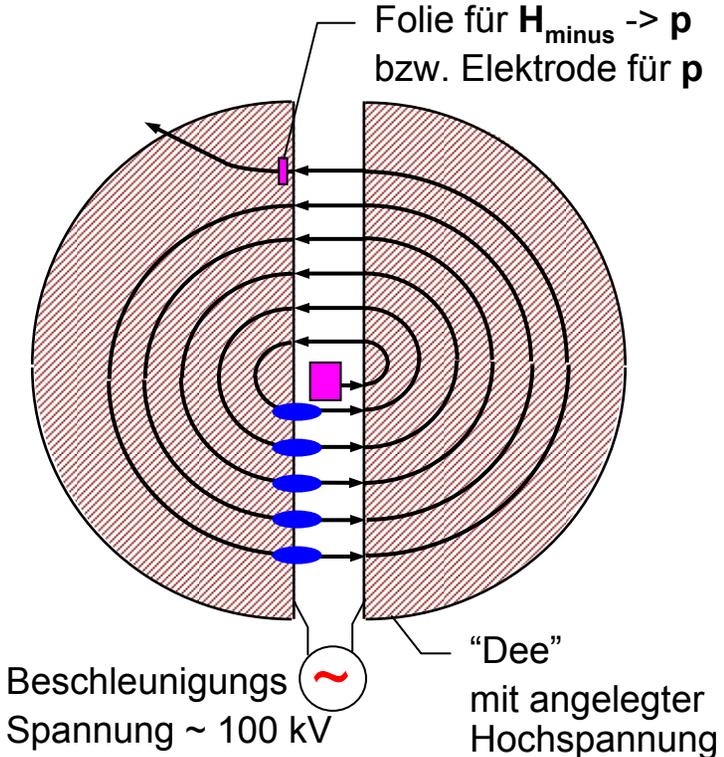
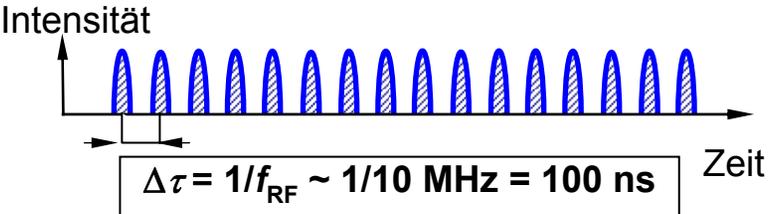
- Konstantes, homogenes vertikales Magnetfeld.
- Geladenes Teilchen bewegt sich auf Kreisbahn
- Lorentzkraft = Zentripetalkraft
- Radial: $(m_0\gamma)v^2/r = qvB_0$

Zyklotron
Magnet,
homogenes
Magnetfeld



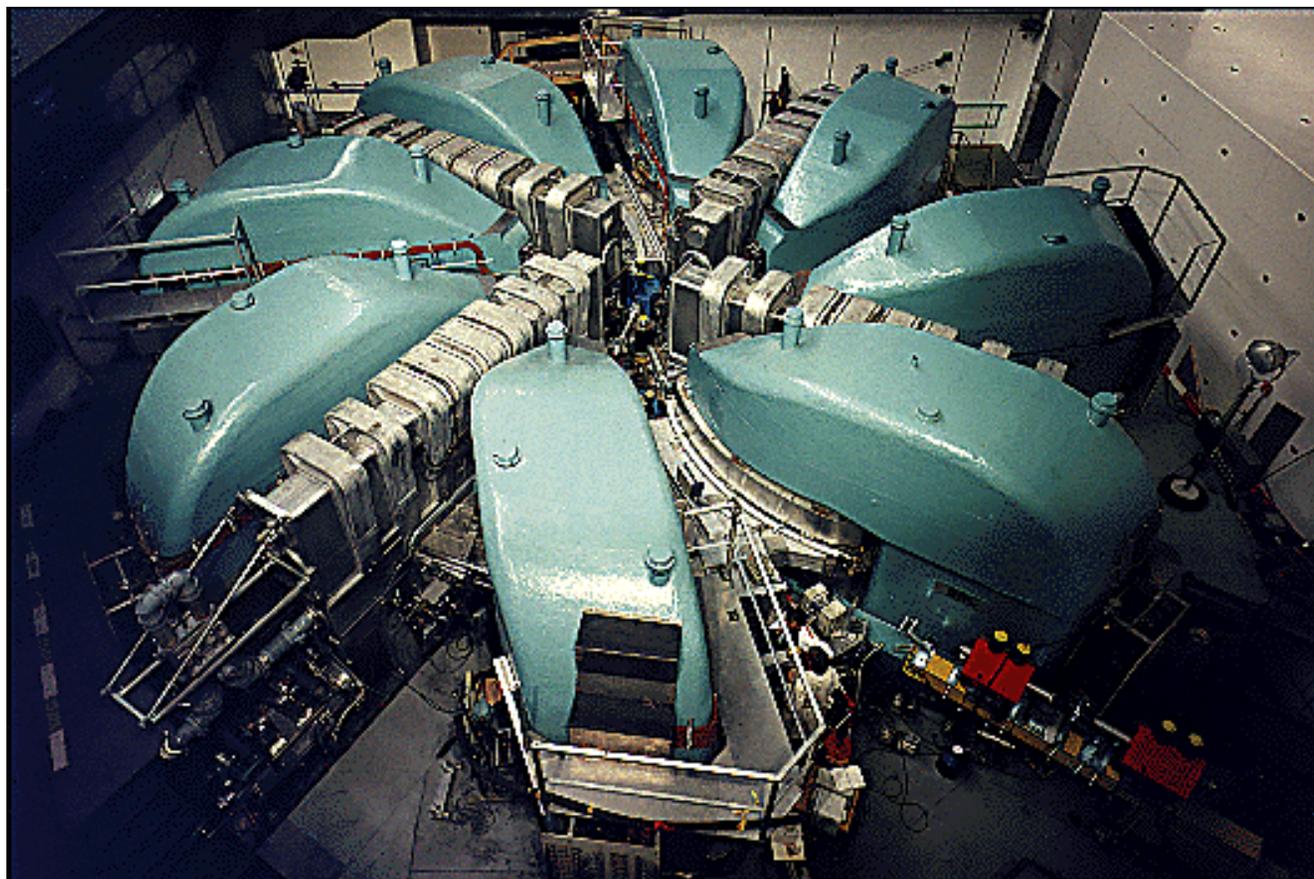
• Zyklotronfrequenz: $\omega = q \cdot B_0 / m_0 \gamma$ (~10 MHz)

• Strahlstruktur: quasikontinuierlich, fixe Energie



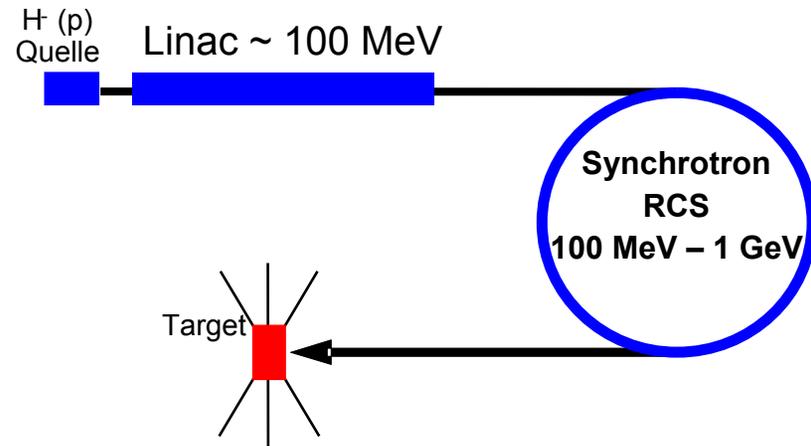
Quasi-kontinuierliche Quelle

- **PSI – Zyklotron**
 - 600 MeV p Energie.
 - 1.5 mA Strahlstrom (dc)
 - 0.9 MW Strahlleistung
- **Strahlstruktur:**
 - 50.63 MHz.
 - 20 ns Paketabstand
 - 1 ns Paketlänge



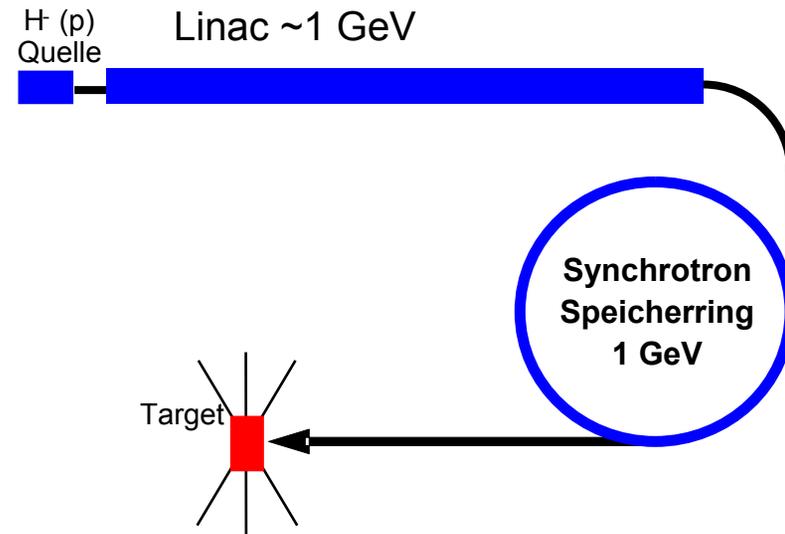
- **Quelle bis zu 1 MW Strahlleistung:**

- Hauptbeschleuniger ist Synchrotron mit hoher Wiederholfrequenz (typ. 50 Hz).
- “Rapid Cycling Synchrotron”
 - Bsp. AUSTRON



- **Für höhere Leistungen**

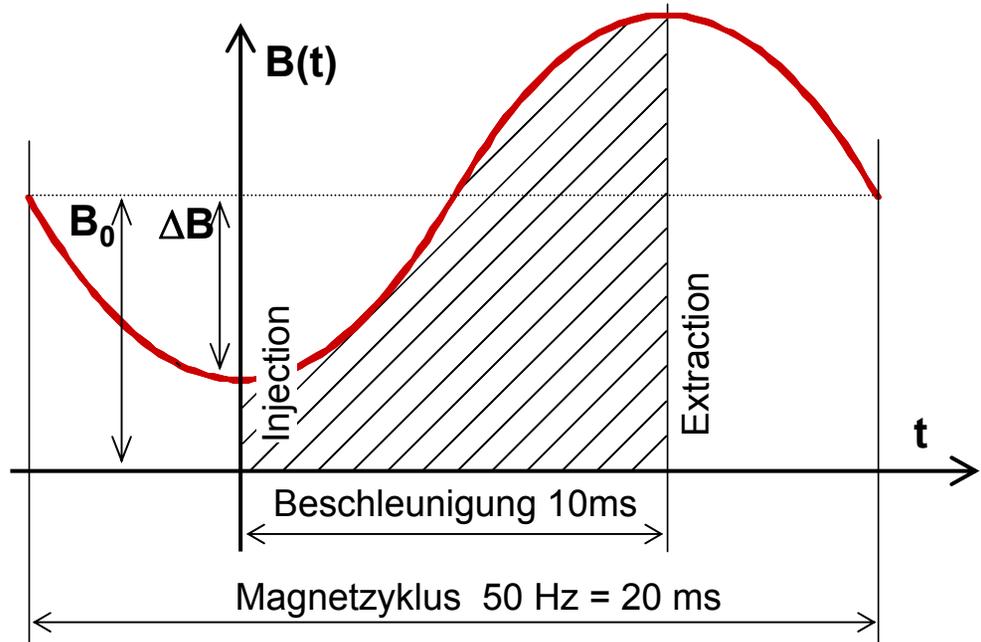
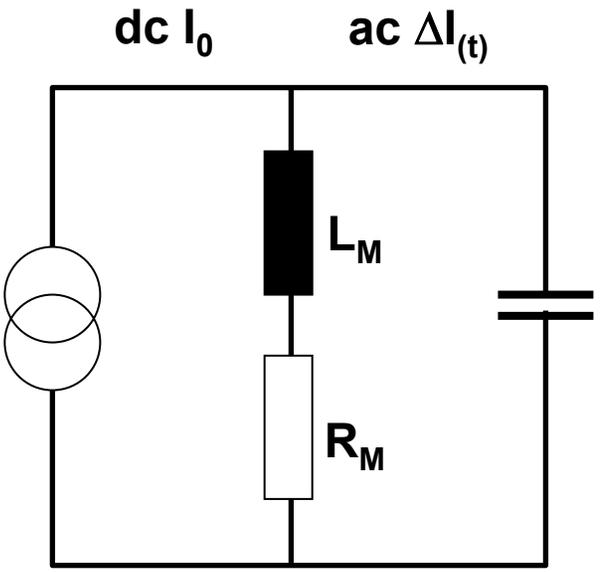
- Teilchenverluste bei Beschleunigung im RCS zu groß.
- Gesamte Beschleunigung im Linac → wesentlicher höhere Kosten aber:
- Vereinfachung des Synchrotrons → nur als Speicherring zur Pulsverkürzung.
 - Bsp. ESS (SNS)



Rapid Cycling Synchrotron (RCS) < 1MW

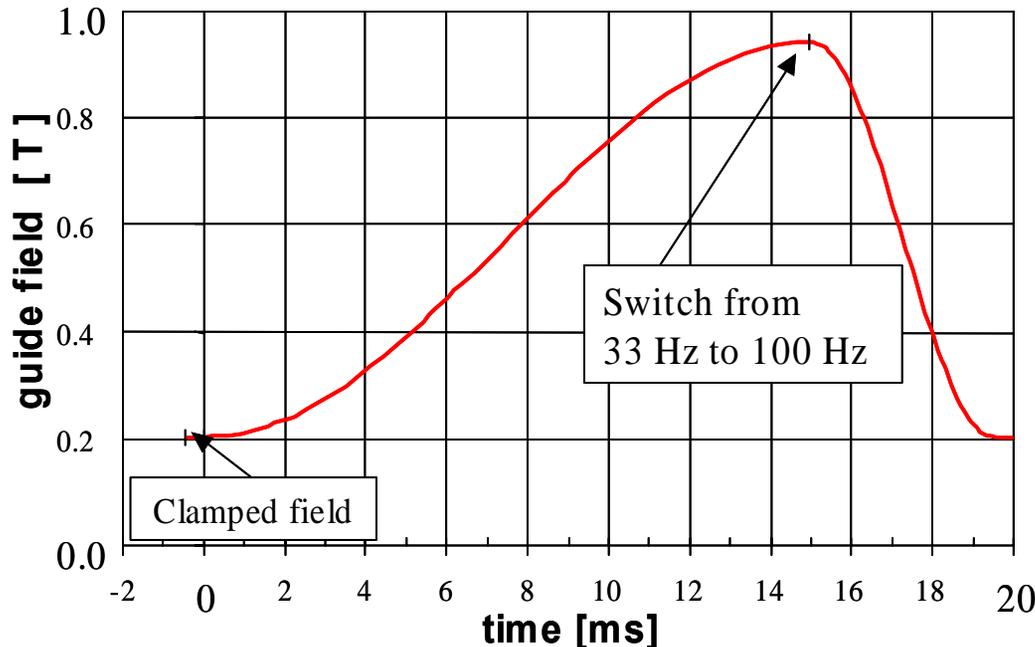
- **Basiert auf LC- Schwingkreisprinzip “resonante Stromversorgungen”.**
 - Magneten (Induktivität) und Stromversorgung (Kapazität)
 - Abstimmung auf Wiederholfrequenz, typischerweise 50 Hz:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \Rightarrow I(t) = I_0 - \Delta I \cdot \cos(\omega t) \Leftrightarrow B(t) = B_0 - \Delta B \cdot \cos(\omega t)$$



Beschleunigung im RCS

- **Problem 1: sehr kurze Beschleunigungszeit von 10 ms**
 - Umfang ~ 300 m \rightarrow Umlauffrequenz ~ 1 MHz ($v=c=3E8$ m/s).
 - **Nur 10^4 Umläufe für Energiegewinn ~ 1 GV $\rightarrow 100$ kV pro Umlauf!**
 - Viele Beschleunigungsstrukturen (10 kV/m), ineffiziente Beschleunigung.
 - Strahlenschutzprobleme wegen Teilchenverlust:



- **2 Resonanzfrequenzen**
 - 33 Hz Beschleunigung (15 ms)
 - 100 Hz negative Rampe (5 ms).

RCS Wirbelstromproblem

- Problem 2: Wirbelströme wegen sehr hoher Magnetfeldrampe**

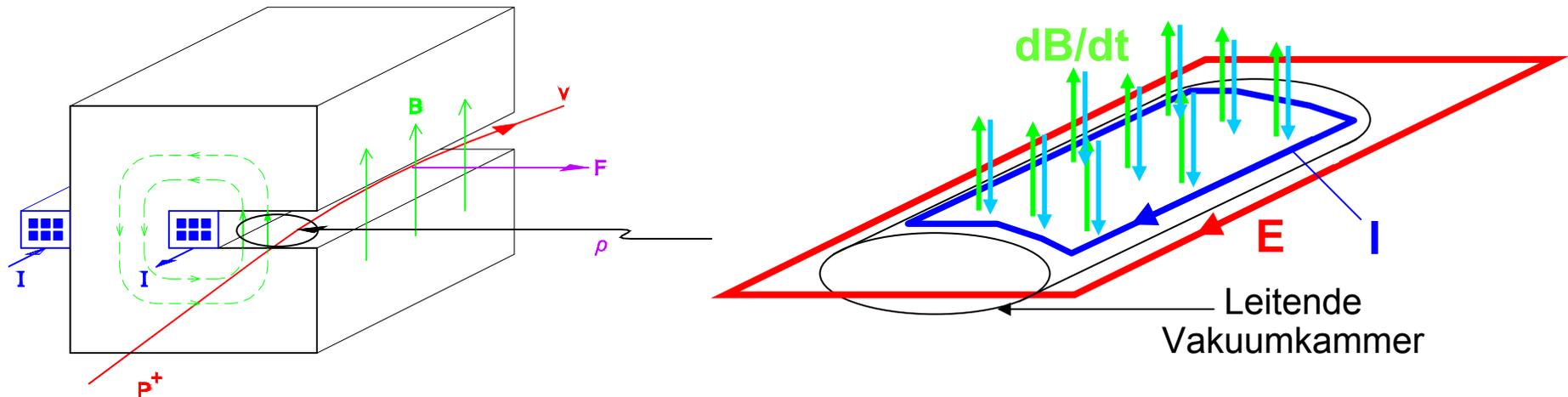
- Injektionsfeld ~ 0.1 T, Extraktionsfeld ~ 1 T, $\Delta B \sim 1$ T.

- Feldrampe (10 ms): $dB/dt \sim 100$ T/s

Maxwell: $\text{rot}\mathbf{E} = -d\mathbf{B}/dt$

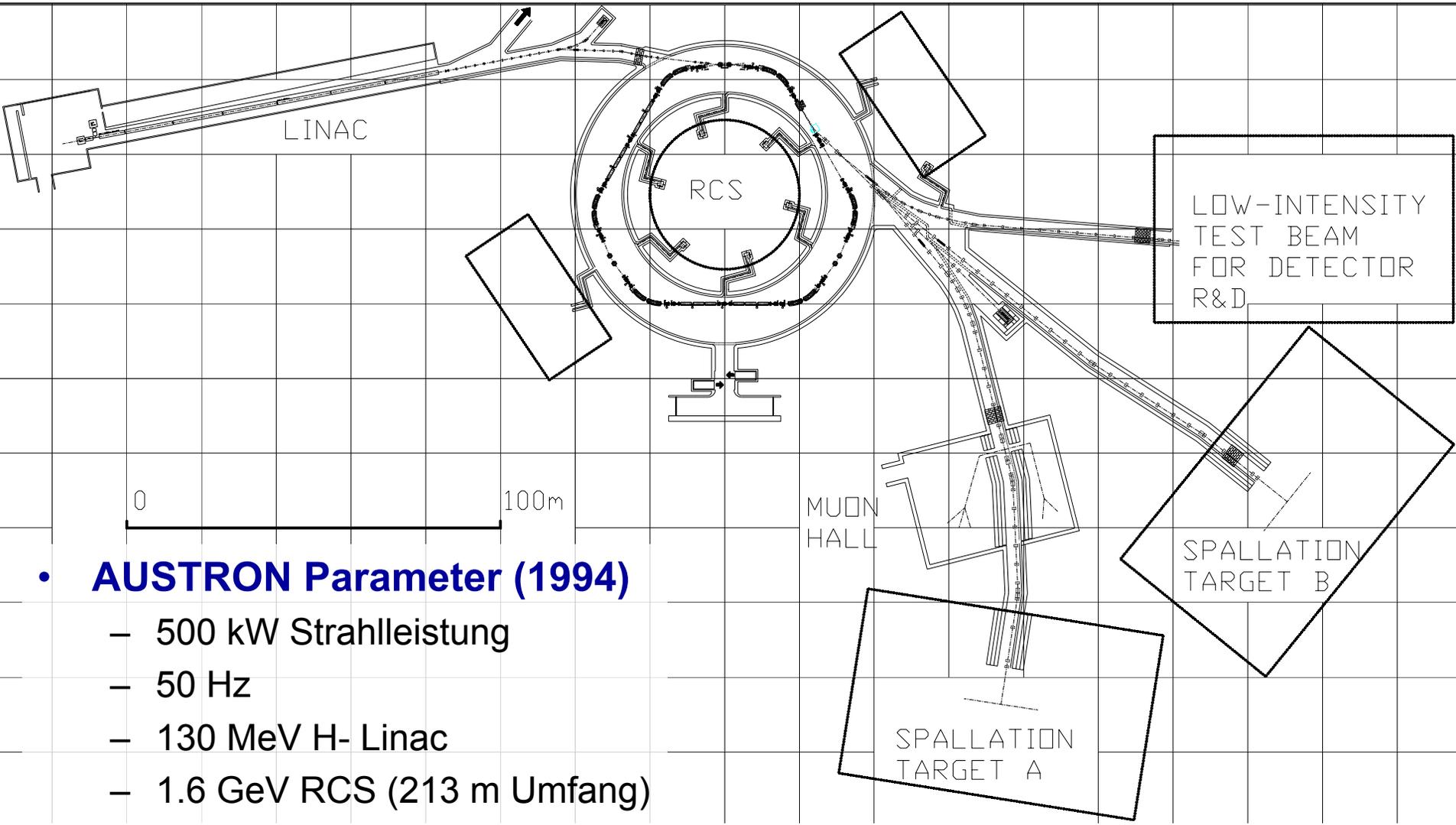
- Elektrisches Feld bewirkt Stromfluß in Vakuumkammer.

- Resultierendes Magnetfeld wirkt Feldänderung entgegen!



- Lösung: Keramische Vakuumkammer, laminierte Magnete.**

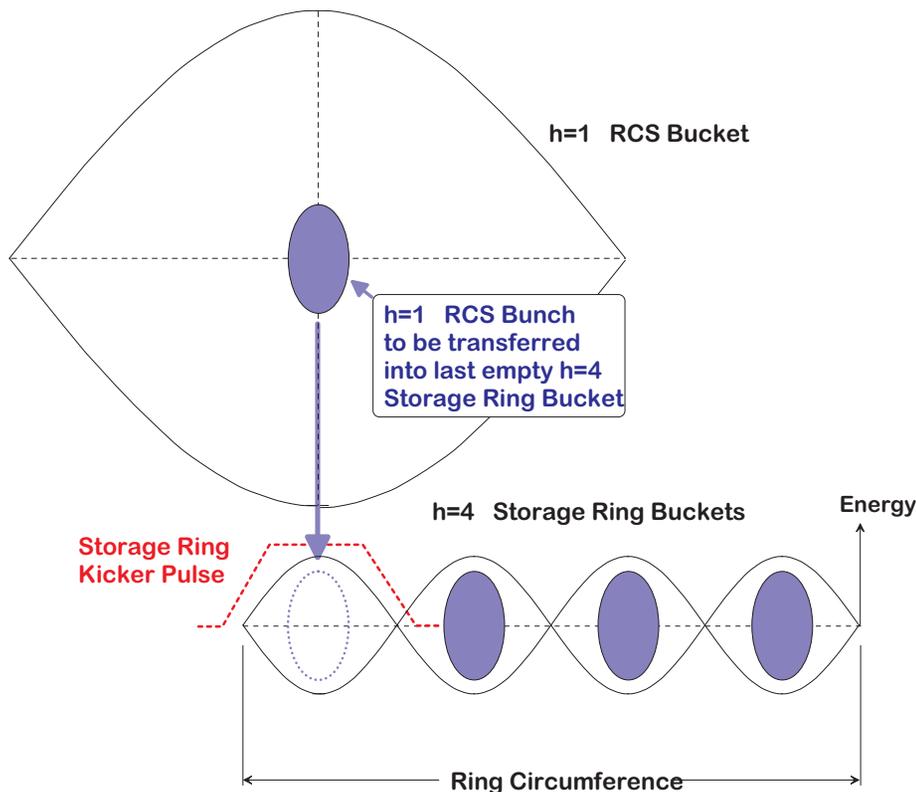
AUSTRON Spallationsquelle



- **AUSTRON Parameter (1994)**
 - 500 kW Strahlleistung
 - 50 Hz
 - 130 MeV H- Linac
 - 1.6 GeV RCS (213 m Umfang)
 - 4×10^{13} Protonen pro Puls

AUSTRON 10 Hz Erweiterung

- **10 Hz Betrieb zur Erhöhung des Spitzenflusses**
 - Zusätzlicher Speicherring für 4 aufeinander folgende RCS Pulse (4 Pakete).
 - Extraktion der 4 Pakete des Speicherrings & 1 Paket vom RCS alle 100 ms.
 - Gesamtpulslänge $\sim 1\mu\text{s}$



- **RCS Hochfrequenzsystem:**

- $f_{\text{HF}} = f_{\text{rev}}$
- Synchrone Bedingung 1 mal pro Umlauf erfüllt $\rightarrow 1$ Paket

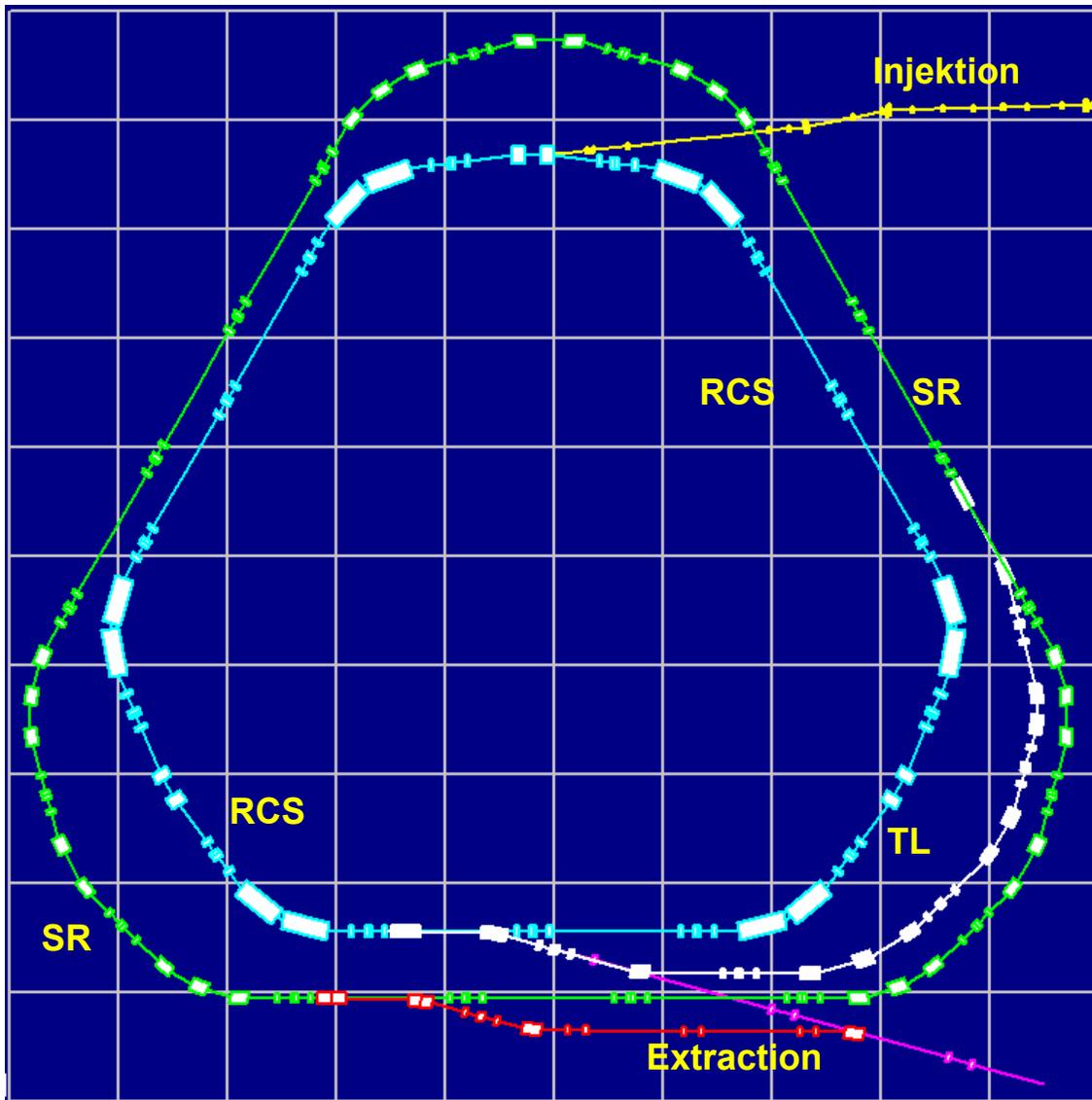
- **SR Hochfrequenzsystem:**

- $f_{\text{HF}} = 4 \cdot f_{\text{rev}}$
- Synchrone Bedingung 4 mal pro Umlauf erfüllt $\rightarrow 4$ Pakete

- **Spitzenfluss $2 \times 10^{14}/\text{Puls}$**



AUSTRON Spallationsquelle 50/10 Hz



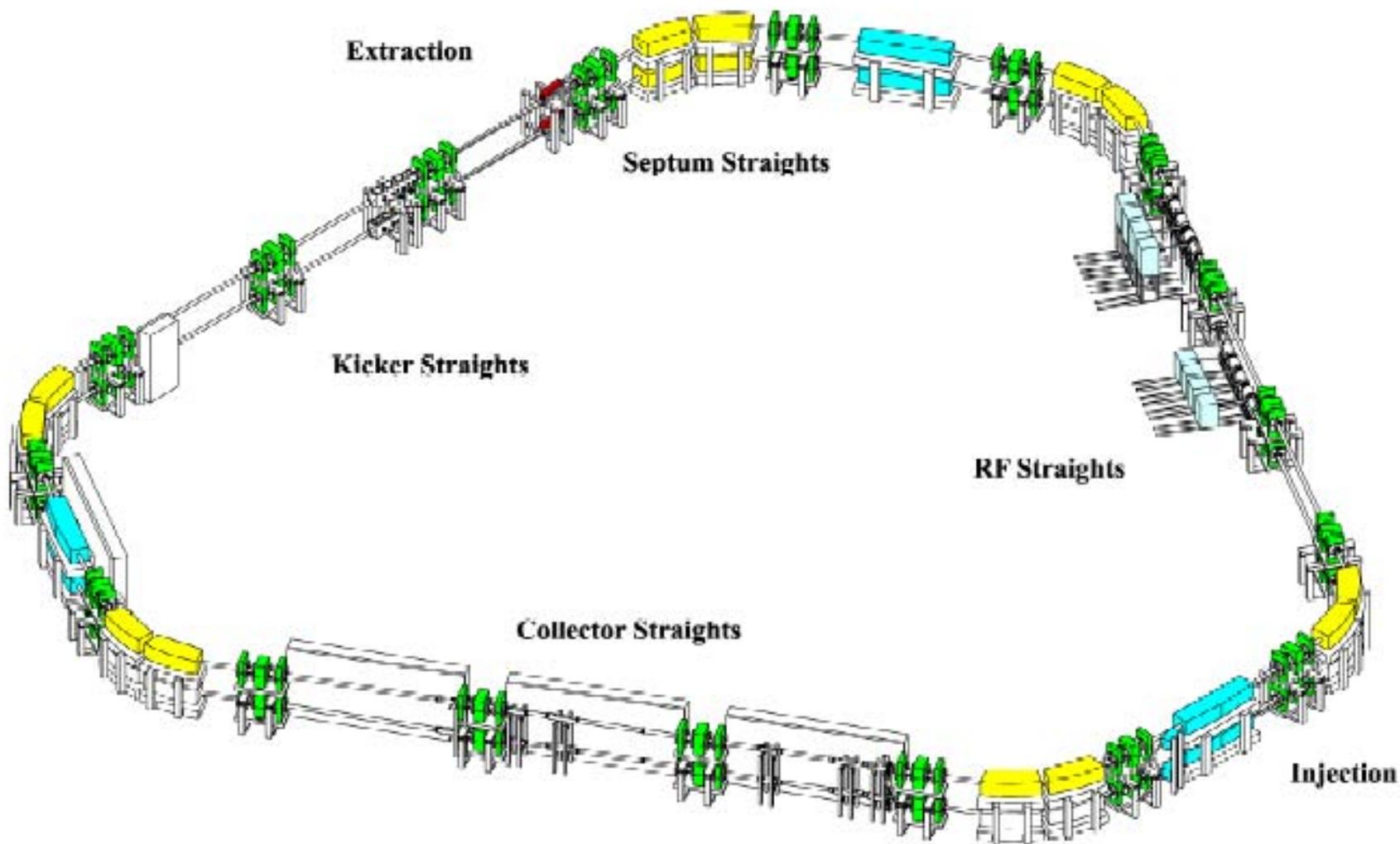
- 10 Hz Speicherring (SR) mit konstanter Energie 1.6 GeV.
- SR Umfang 260 m
- Einzelpulslänge 100 ns
- Gesamtpulslänge 1 μ s



Gepulste über 1 MW

- **Hauptbeschleuniger ist Linac bis etwa 1 GeV**
 - Lange \sim ms Pulse bei gewünschter Endenergie
 - **Ermöglicht sofort “Langpulsbetrieb.**
- **Für kurze Pulse wird Synchrotron zur Akkumulation benötigt**
 - Keine Beschleunigung, nur Speicherung
- **Bsp European Spallation Source**
 - 10 MW Strahlleistung,
 - 100 Hz Linac bis 1.6 GeV
 - 5 MW “long-pulse” direkt mit jedem 2. Linacpuls (50 Hz)
 - 5 MW “short-pulse” mit 2 Synchrotron als Akkumulatoren (50 Hz)
 - 2 x 400 turns H- Injektion in die Synchrotrons

ESS Spallationsquelle



Neutrinos

Aufbau der Materie (**Fundamentarteilchen**)
3 Familien Leptonen und Quarks

	LEPTONEN		QUARKS	
„normale Materie“	Elektron $q=-1$,	Elektron Neutrino $q=0$, Sehr schwache WW mit Materie	Up $q=+2/3$ Protonen: 2up-1down Neutrons: 1up-2down	Down $q=-1/3$
	Muon	Muon Neutrino	Charm	Strange
	Tau	Tau Neutrino	Top	Bottom
ANTIMATERIE				

- **Physik: Neutrinooszillation, Massenspektrum, CP Verletzung**
- **Anforderung: gut definierte Strahlen einer Neutrinoart**

Quellen für Neutrinostrahlen

- Natürliche Quellen:**

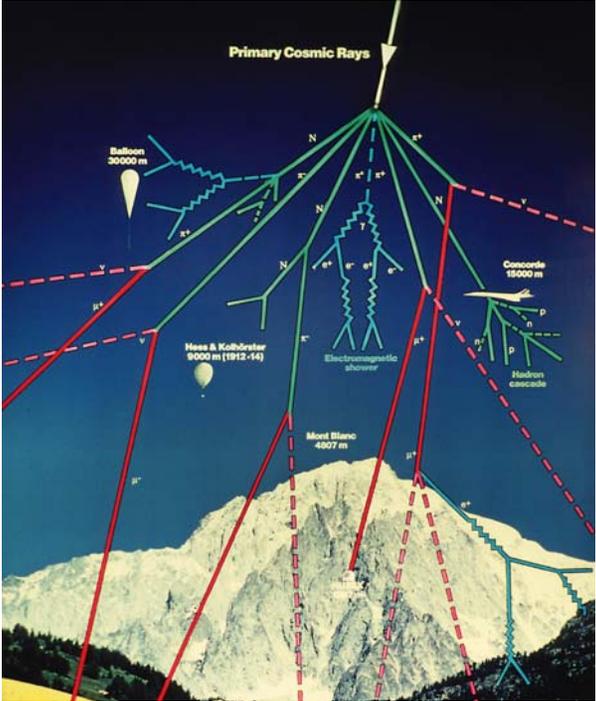
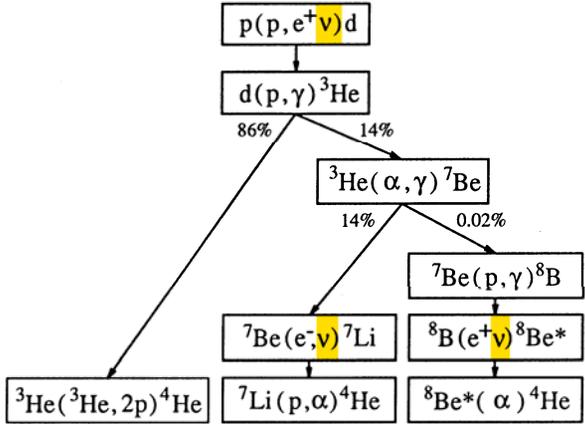
- Solarneutrinos (ν_e):
(Kernreaktionen in der Sonne)
- Atmosphärische Neutrinos (ν_e, ν_μ):
WW kosmische Strahlung - Atmosphäre

- Andere Quellen:**

- Reaktorneutrinos (ν_e) Beta-Zerfall:
 $n \rightarrow p + e^- + \nu_e$
- Beta-Zerfall von radioaktiven Isotopen.

- Beschleuniger:**

- Erzeugung, Beschleunigung, Speicherung von instabilen Teilchen Sekundärstrahlen bei deren Zerfall Neutrinos auftreten.
- Pionen, Kaonen, Müonen, β -aktive Ionen



Neutrinoszillationsexperimente

- Oszillation beschrieben durch:

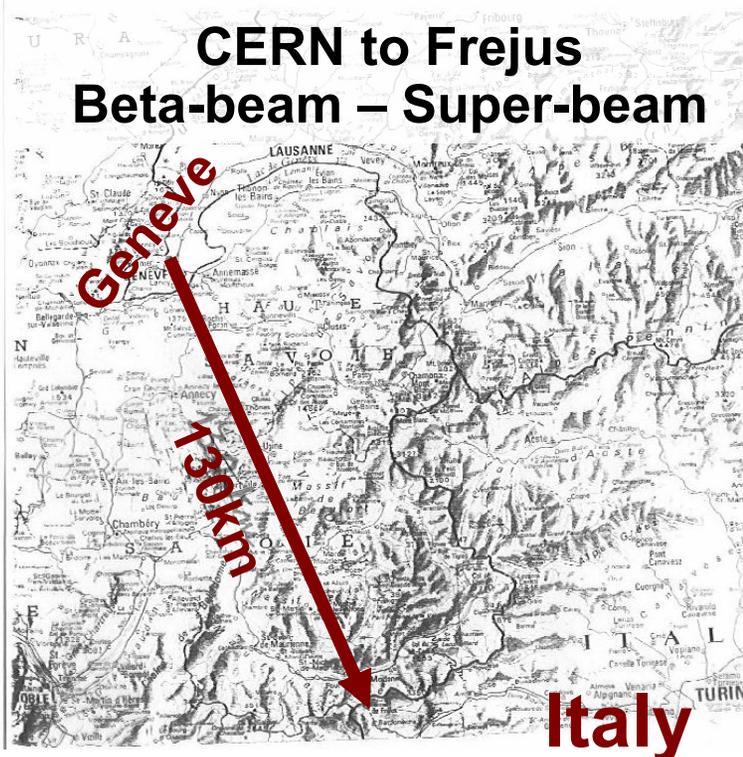
$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{23}^2 L}{4E_\nu} \right) + f(\delta)$$

- Ziel:

- Messung des “mixing angle θ_{13} ”
- Messung der Phase δ (CP Verletzung)
- Optimierung Beschleuniger/Experiment für maximale Oszillationswahrscheinlichkeit.

$$\sin^2 \left(\frac{\Delta m_{23}^2 L}{4E_\nu} \right) = 1$$

1. Detektorstandort (Untergrund) fixiert L.
2. Fixiert ideale Neutrinoenergie
3. Entsprechendes Beschleunigerdesign





Beschleuniger als Neutrinoquellen

- Konventionelle Neutrinostrahlen und "Superbeams" (heute)**

– Erzeugungskanal: $p \rightarrow \text{target} \rightarrow \pi^+ (\pi^-)$ 2. Generation
 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ 3. Generation

- Neutrino Factory (in 15-20 Jahren?).**

– Erzeugungskanal: $p \rightarrow \text{target} \rightarrow \pi^+ (\pi^-)$ 2. Generation
 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ 3. Generation
 $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$ 4. Generation

- Beta Beam (in 10-15 Jahren?)**

– Erzeugungskanal: $p \rightarrow \text{target} \rightarrow {}^6\text{He} ({}^{10}\text{Ne})$ 2. Generation
 ${}^6\text{He} \rightarrow {}^6\text{Li} + e^- + \bar{\nu}_e$ 3. Generation
 $({}^{18}\text{Ne} \rightarrow {}^{18}\text{F} + e^+ + \nu_e$ 3. Generation)



Anforderungen an Beschleuniger

- **Hohe Energie der “Mutterteilchen”**
→ **um fokussierten Neutrinostrahl zu erhalten.**
 - Zerfall im Teilchensystem sphärisch symmetrisch. Transfo Laborsystem:
 - Transversaler Impuls unverändert.
 - Impuls in Strahlrichtung transformiert sich mit γ .
 - **Strahlöffnungswinkel $\propto 1/\gamma$.**
- **Hohe Intensität des “Mutterstrahles”**
→ **um hohe Neutrinointensität zu erreichen.**
 - Neutrinos kommen vom Zerfall des Sekundär- oder Tertiärstrahls.
 - Intensitätsverlust um 1-2 Größenordnungen pro Generation.
 - **Typische Neutrinoraten $\sim 10^{19} - 10^{21}$ pro Jahr (10^7 s) d.h. $10^{12} - 10^{14}$ v/s !**
- **Ausgeprägte Pulsstruktur im Mutterstrahl**
→ **um Signal im Detektor zu verbessern.**
 - Neutrinostrahl hat Zeitstruktur des Mutterstrahls.
 - **Tastverhältnis (Strahl/kein Strahl) $\sim 10^{-4}$** erhöht Spitzenfluss um Faktor 10^4 .
 - Unterdrückung des Untergrunds im Detektor (solare und atmosph. Neutrinos).



CERN Neutrino to Gran Sasso Projekt

- Konventioneller Neutrinostrahl vom CERN nach Gran Sasso (I).
- Distanz zum Neutrinodetektor 732 km.

Oszillation $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$.

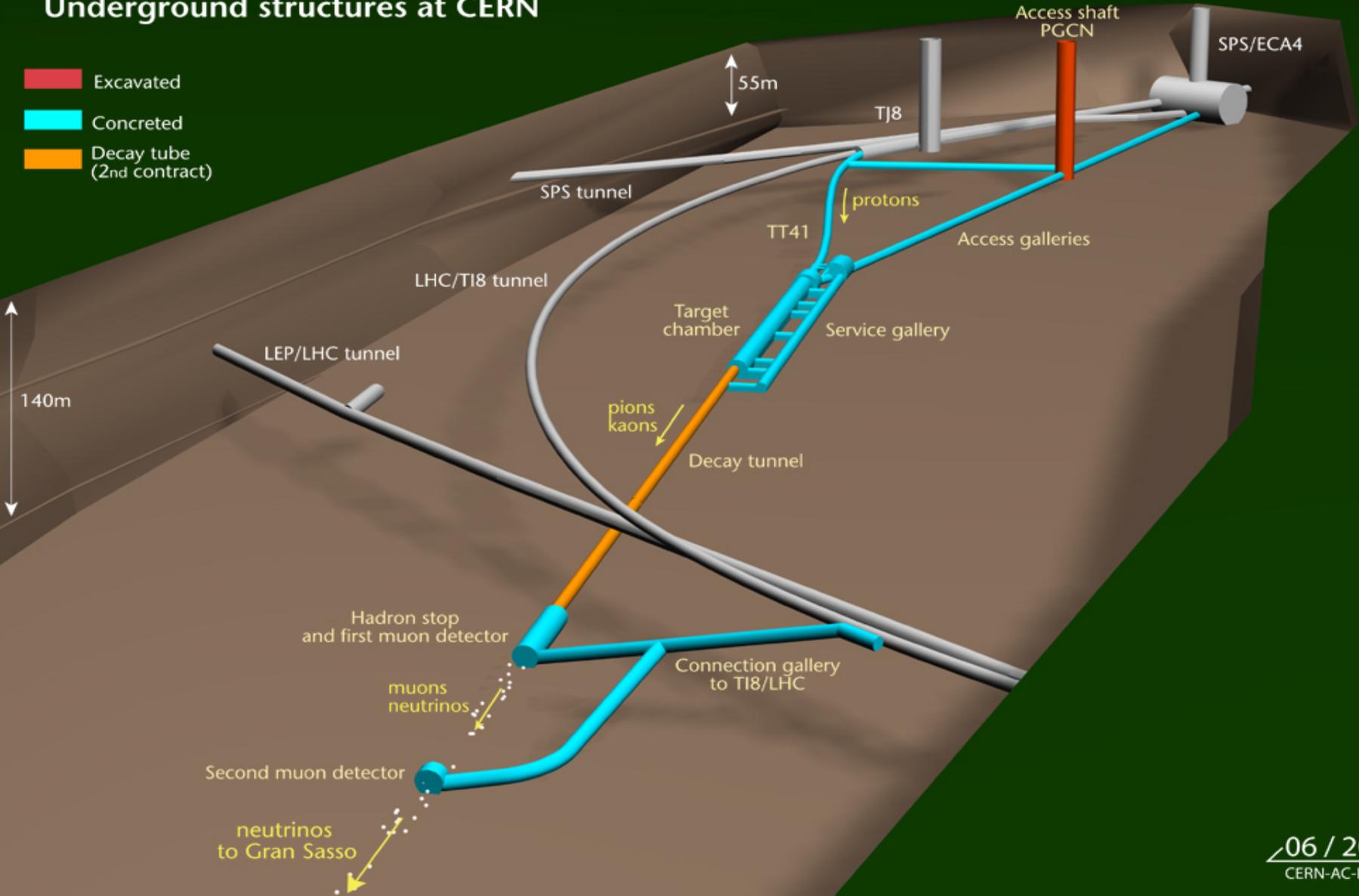
- **Strahlparameter am target:**
 - 400 GeV Protonen (Linac2 – PS Booster – PS – SPS)
 - 4.8×10^{13} Protonen pro Puls, Wiederholrate 6 s.
 - Strahlleistung: $4.8 \times 10^{13} \cdot 400 \times 10^9 \cdot 1.602 \times 10^{-19} / 6 = 0.5$ MW.
- **Zerfallstrecke:**
 - Pionen werden fokussiert (magnetisches Horn) → fixiert Neutrinorichtung.
 - Alle Pionen sollen zerfallen ($t_{1/2} = 10^{-8}$ s) → 1000 m Vakuumkanal.
 - Danach Materialblock zur Absorption aller Teilchen ausser Neutrinos.



CERN Neutrino to Gran Sasso Projekt

CERN NEUTRINOS TO GRAN SASSO Underground structures at CERN

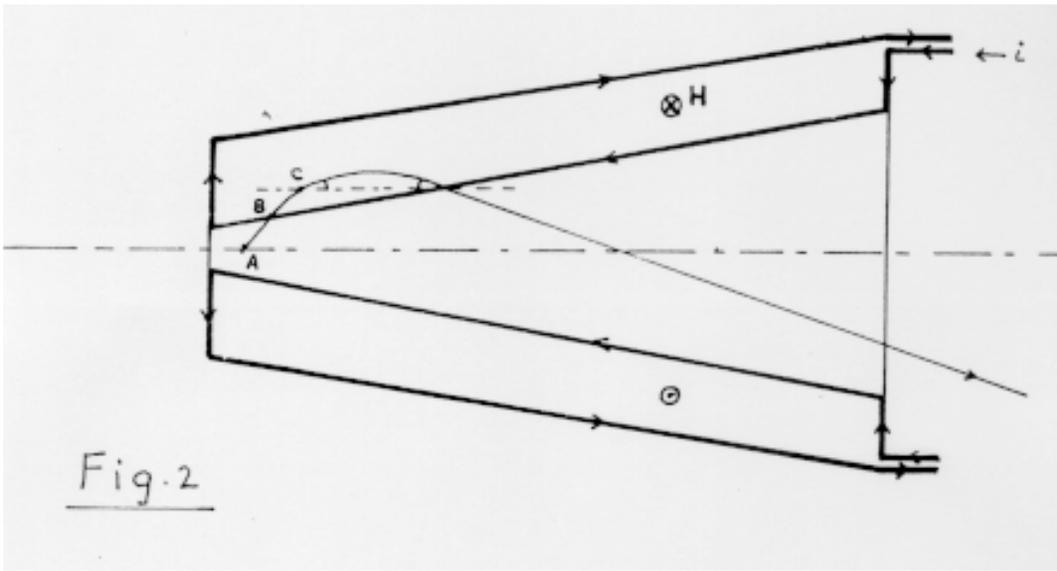
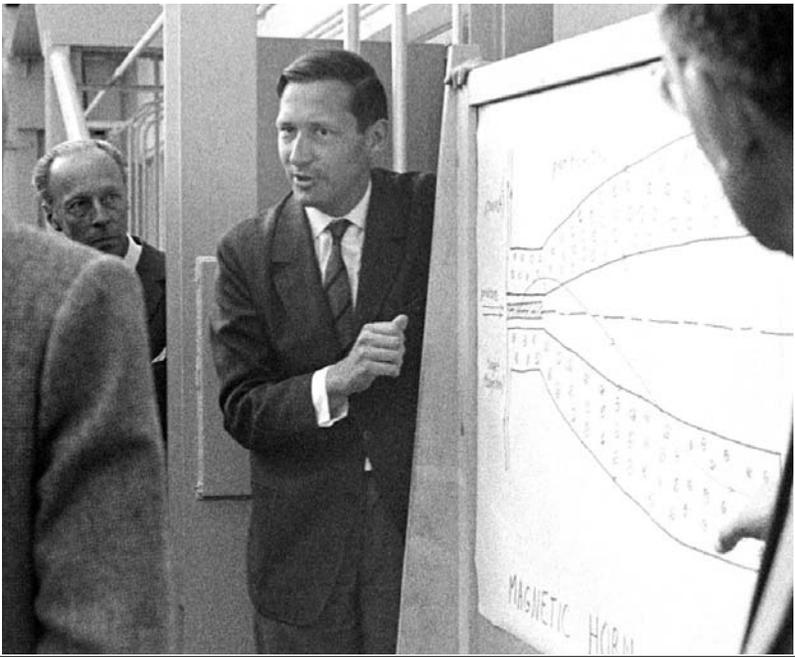
- Excavated
- Concreted
- Decay tube (2nd contract)



Fokussierung mittels magnetischem Horn

- **Fokussierung möglichst vieler Pionen nach target**
 - Essentiell zur Erhöhung des Wirkungsgrads (Anzahl der Neutrinos).

- **Räumlich begrenztes azimuthales Magnetfeld in Doppelhorn.**
 - Einfang von Teilchen in **definiertem Impuls und Winkelband**.
 - Eingesetzt auch bei Antiprotonenerzeugung, Positronenerzeugung, etc.
 - **Vorgeschlagen 1961 von S. Van der Meer.**



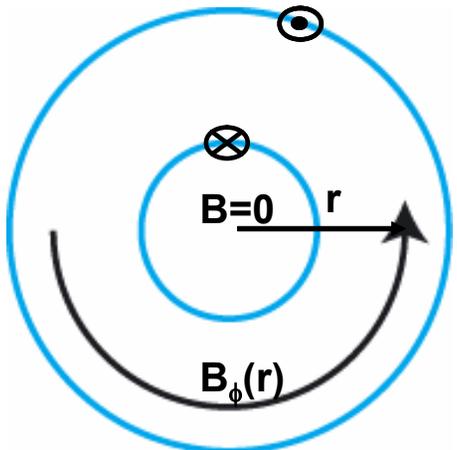
Prinzip magnetisches Horn

- Ampere's Gesetz

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = 2\pi r B = \mu_0 I$$

$$B_\phi(r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

- Hornquerschnitt:

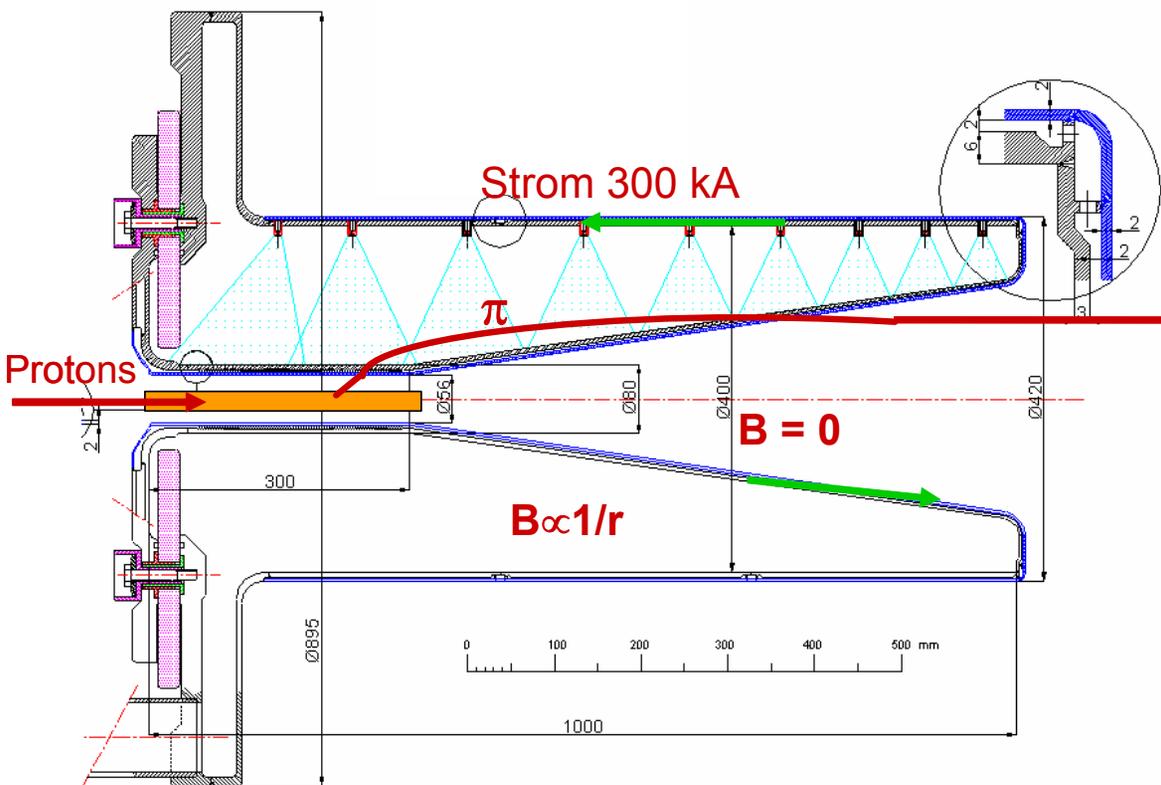


⊗ Strom OUT
 ⊙ Strom IN

- Fokussierung:

– Lorentzkraft:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$



NEUTRINO FACTORY - Horn 1 prototype

S. Rangod
15/05/2001



Neutrino Factory

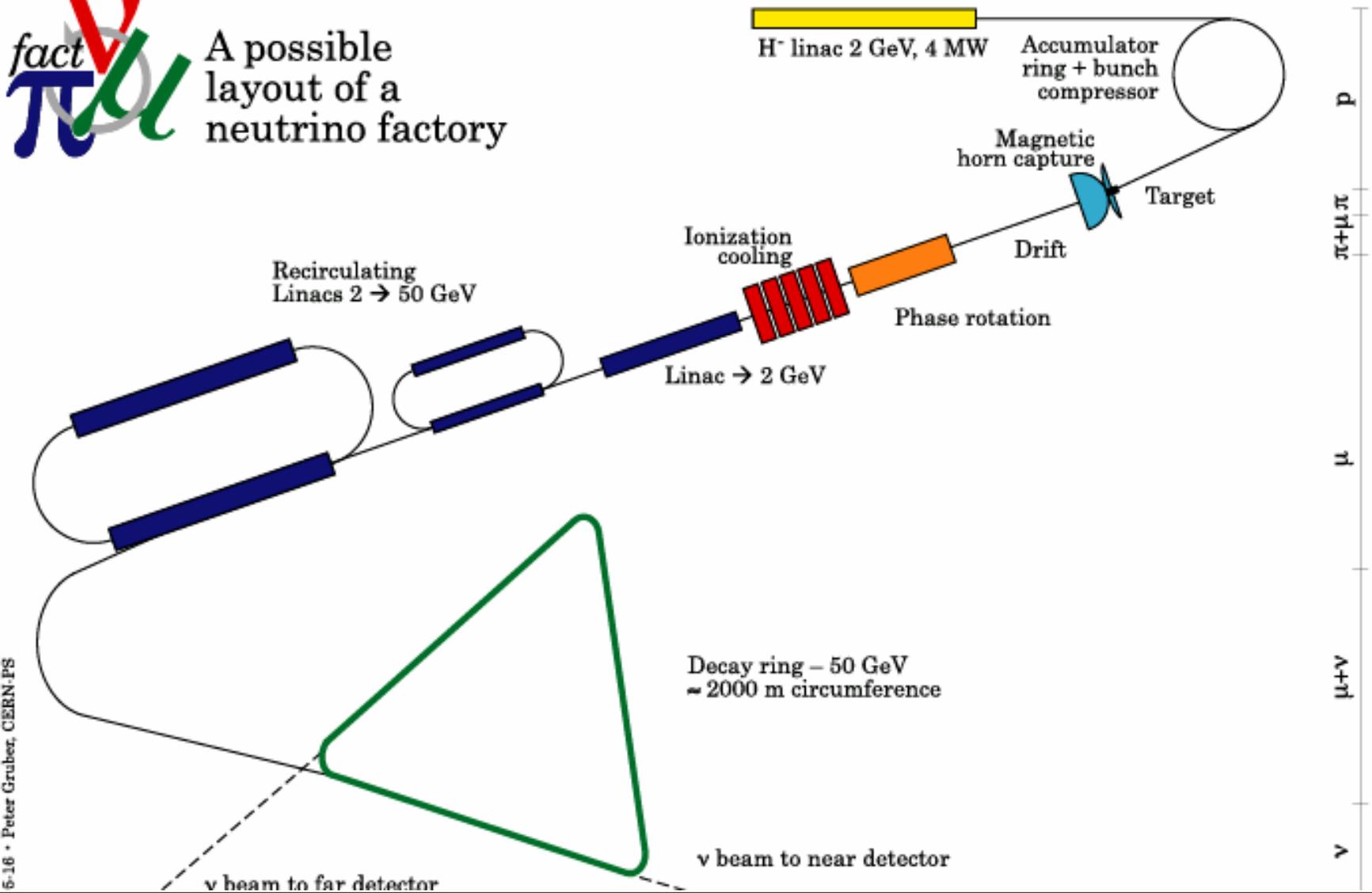
- **Weiterentwicklung von konventionellen Neutrinostrahlen**
 - Vorteil ist wesentlich höhere Neutrinoenergie und Fokussierung
- **Protonenstrahl ~5 MW bei 5-50 GeV**
 - Produktion Pionen/MW relativ unabhängig von p-Energie.
- **Pionenstrahl**
 - Fokussierung mit magnetischem Horn.
 - $t_{1/2} = 10^{-8}$ s: Zerfall innerhalb von einigen 100 m in Müonen.
- **Müonenstrahl (Mutterstrahl)**
 - Halbwertszeit ($t_{1/2} = 10^{-6}$ s): zu kurz für konventionelle Strahlbeschleunigung.
 - **Müonen Ionisationskühlen und Linearbeschleuniger** (keine Synchrotronlösung mit vielen Umläufen)
 - Müonenspeicherung bei hoher Energie in einem DC Synchrotron.
- **Neutrinostrahl**
 - Hochenergetisch wegen hoher Müonenergie
 - Stark fokussiert wegen hohem γ der Müonen (Öffnungswinkel $1/\gamma$)



Neutrino Factory



A possible layout of a neutrino factory



5-18 • Peter Gruber, CERN-PS

- **“Kühlen” eines Teilchenstrahls:**
 - Strahl hat Streuung im Impuls (Δp) sowie Divergenz in transversaler Richtung (horizontaler/vertikaler Öffnungswinkel).
 - **“Kühlen” = Reduktion der Streuung um Mittelwert (p_0) bzw. Sollbahn.**
 - **“Kühlen” = Erhöhung der Phasenraumdicke (\leftrightarrow Liouville!).**
 - **Satz von Liouville: In abgeschlossenem konservativem System bleibt die Phasenraumdicke konstant.**
- **Beschleuniger hat begrenzte “Akzeptanz” in Impuls (Energie) und auch in transversalen Dimensionen:**
 - Teilchen ausserhalb der Akzeptanz gehen verloren.
 - Impulsstreuung: keine Synchronisation mit HF, falsche Ablenkung in Magneten.
 - Transversale Divergenz (Strahlgrösse): Teilchenverlust an Vakuumkammer.
- **“Einfang” und Fokussierung möglichst vieler Müonen**
 - Essentiell zur Erhöhung des Wirkungsgrads der Neutrino Factory.

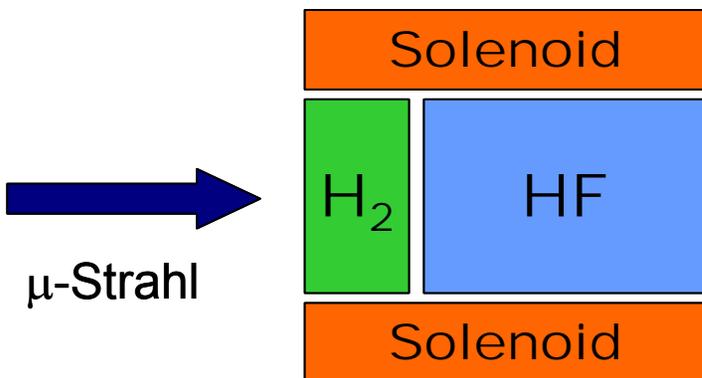
Kühlen von Müonen (Ionisation cooling)



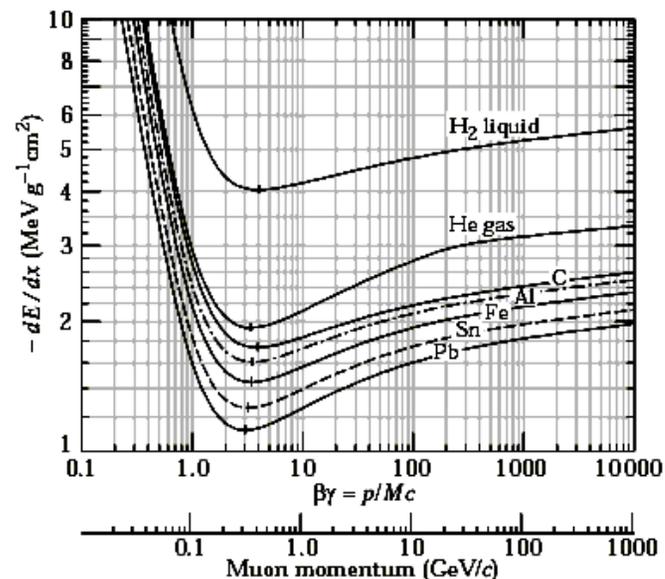
- Kühlungseffekt in 3 Dimensionen:**

- Mittlere Defokussierung durch Streuung < geom. Fokussierung durch Beschleunigung.
- Energieverlust im Medium proportional zu Energie (dE/dx grösser für grösseres E).

Flüssiger H_2 : dE/dx



HF ersetzt nur **Energieverlust in Strahlrichtung!**





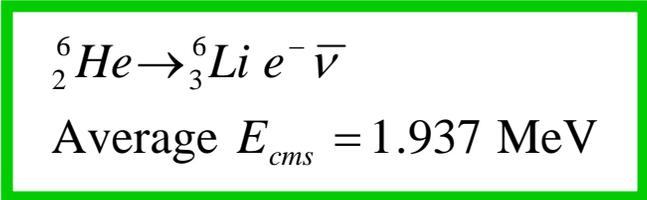
Beta-beam Neutrinoquelle - Prinzip

- Ziel: Erzeugung eines reinen Strahls von ν_e ($\bar{\nu}_e$) über beta-Zerfall von radioaktiven Ionen in Hochenergiespeicherring.
- Ionenauswahl:
 - Hohe Produktionsrate
 - Edelgase bevorzugt (gasförmig, beweglich → Diffusion aus target)
 - Nicht zu kurze Halbwertszeit (Zerfall während Beschleunigung)
 - Nicht zu lange Halbwertszeit (kein Zerfall – keine Neutrinos...)
 - Keine gefährlichen, langlebigen Zerfallsprodukte

• **Bester Kompromiss:**

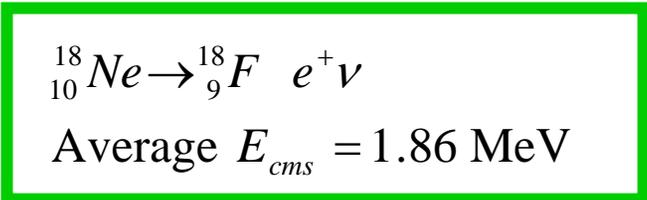
– **${}^6\text{He}^{2+}$ für Antineutrinos:**

• $t_{1/2} = 0.8 \text{ s}$



– **${}^{18}\text{Ne}^{10+}$ für Neutrinos:**

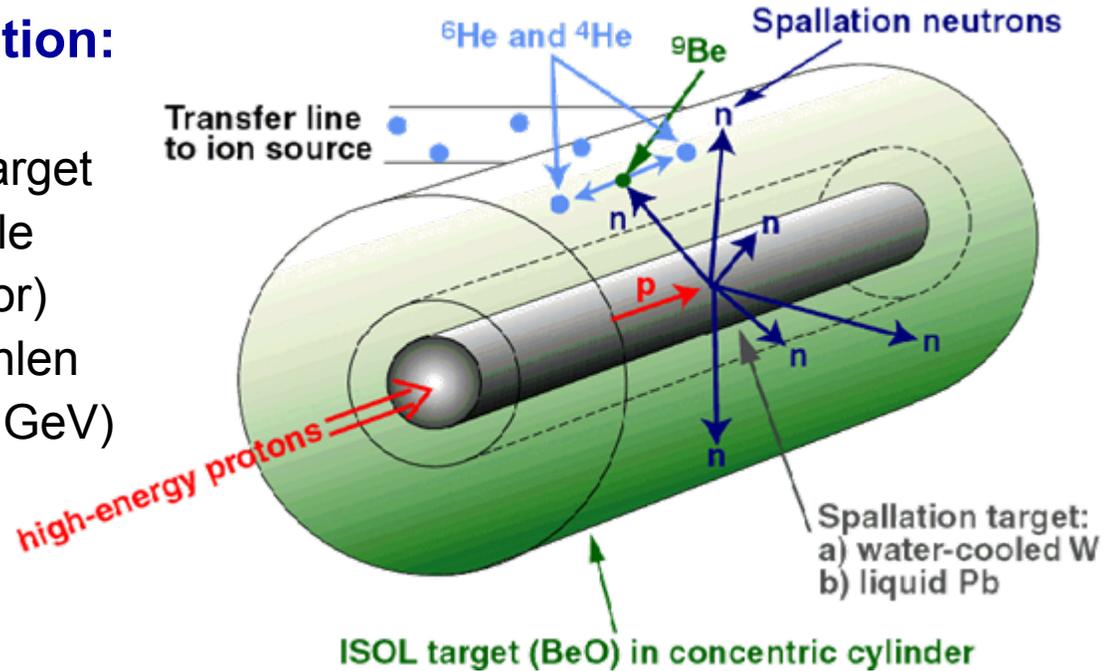
• $t_{1/2} = 1.7 \text{ s}$



Ionenproduktion ${}^6\text{He}$ und ${}^{18}\text{Ne}$

- ${}^6\text{He}$ → indirekt über Spallation:

- ${}^9\text{Be} (n, \alpha) {}^6\text{He}$
- Indirekt über Konversionstarget
- Prinzip wie Spallationsquelle
- Targetmaterial BeO (Isolator)
- Konverter lässt sich gut kühlen
- $10^{13}/\text{s}$ (dc) für 100 kW p (1 GeV)



- ${}^{18}\text{Ne}$ → direkt über Spallation

- ${}^{24}\text{Mg}^{12} (p, p_3 n_4) {}^{18}\text{Ne}^{10}$
- Targetmaterial MgO (Isolator).
- $10^{12}/\text{s}$ (dc) für 100 kW p (GeV)



Beta Beam Gesamtanlage

Ionenproduktion

Ionenbeschleunigung

Neutrinoquelle

