

Der LHC – Das größte wissenschaftliche Experiment aller Zeiten

Teil 1: Die Beschleuniger der LHC Injektor-Kette

Erk Jensen/CERN

CERN

- gegründet 1954, heute 20 Mitgliedsstaaten
- etwa 10'000 Personen arbeiten bei CERN, davon 2250 CERN-Personal
- Jahresbudget etwa 1 Mrd. CHF (600 M€)
- die französisch-schweizer Grenze geht durch die meisten CERN Beschleuniger hindurch.



Gliederung des Vortrags:

Die Kettenglieder ...

- Ionenquelle
- RFQ
- Linac 2
- PSB
- PS
- SPS

dabei erwähnte Konzepte

Duoplasmatron
RFQ
Alvarez-Struktur

{ Betatron-Schwingungen
Tune-Diagramm
Raumladungseffekte
Ferrit-Kavität

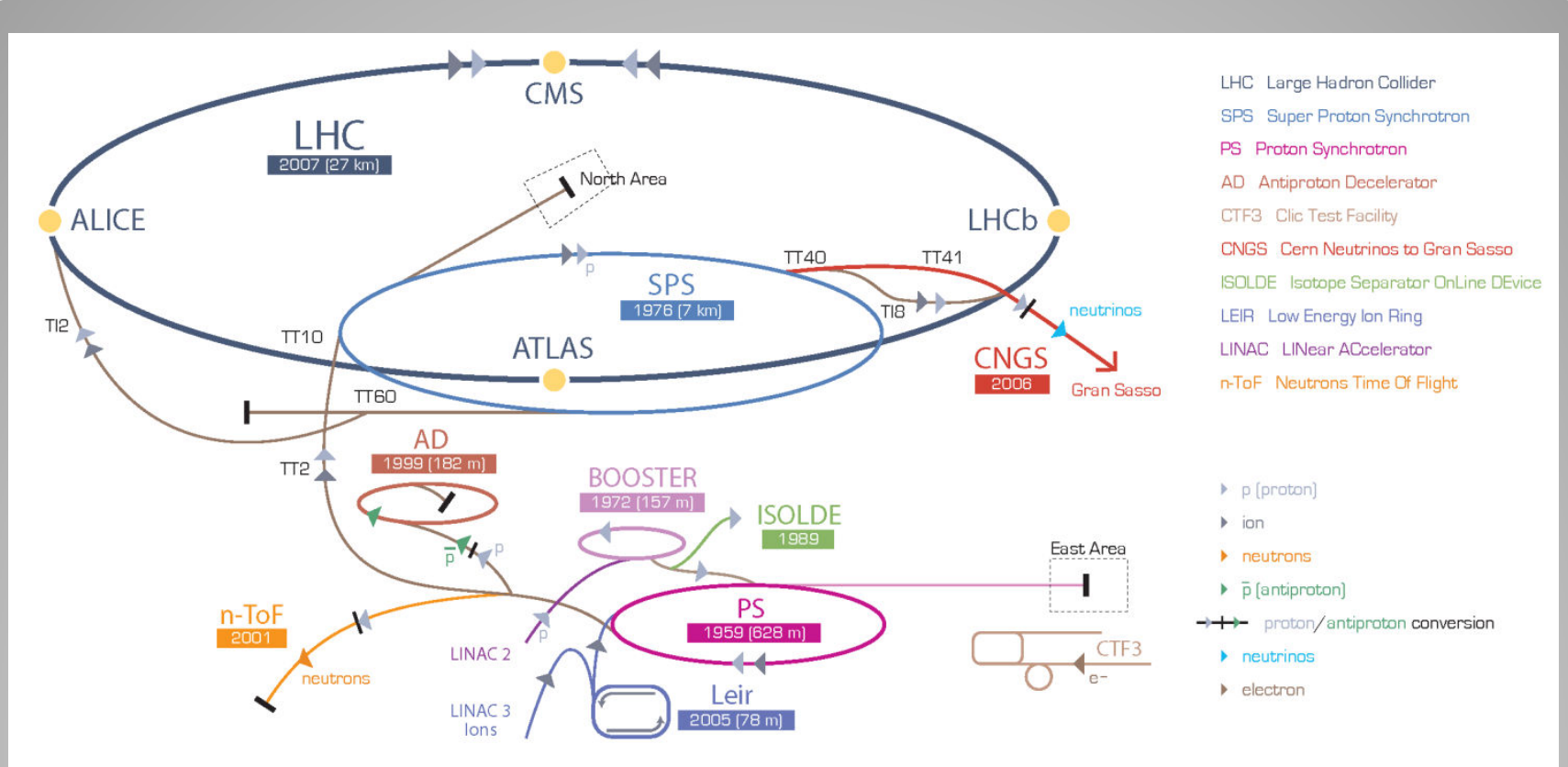
... und deren Zusammenspiel

{ Transition
Phasenstabilität
Longitudinale Strahl-
gymnastik

{ e-cloud
Schutz der Maschine
CNGS

LHC Injektions-Sequenz

Der CERN Beschleuniger-Komplex



Zur Erinnerung: Definitionen

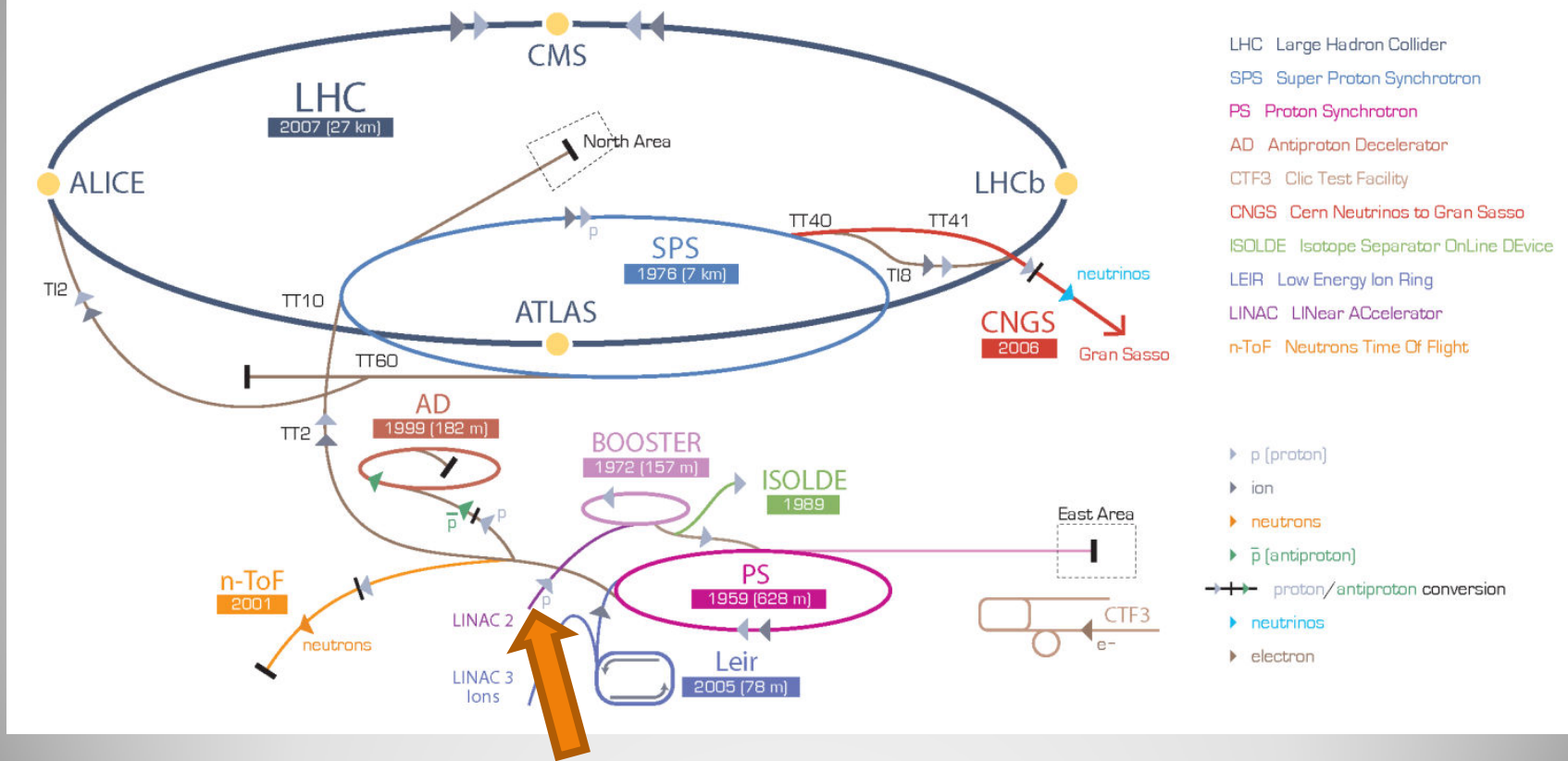
- Natürliche Einheiten, basierend auf universellen Naturkonstanten:
 - Geschwindigkeit in c (299.792458 mm/ns)
 - Ladung in e ($1.602176487 \cdot 10^{-19}$ C)
- Daraus ergeben sich die natürlichen Einheiten für Energie, Impuls und Masse
 - Energie in eV (keV, MeV, GeV, TeV),
 - Impuls in eV/c
 - Masse in eV/c^2
- Protonenmasse: $1.672\ 621\ 637 \cdot 10^{-27}$ kg = $938.272\ 013$ MeV/ c^2
- 1 MeV = $1.6 \cdot 10^{-19}$ MJ

<http://physics.nist.gov/cuu/Constants/>

Impuls, Energie und Geschwindigkeit

- Grundgleichung: $E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$
- In Einheiten von MeV für Energie, MeV/c für Impuls, MeV/c² für Masse und mit der Protonenmasse m
... ergibt sich folgende Tabelle:

E_{kin}	$p c$	$\beta = v/c$	$E = mc^2 + E_{kin}$	
0 eV	0 eV	0	938.27 MeV	Proton in Ruhe
90 keV	12.996 MeV	0.01385	938.36 MeV	Quelle
750 keV	37.523 MeV	0.03996	939.02 MeV	RFQ
50 MeV	310.37 MeV	0.31405	988.27 MeV	Linac 2
1.4 GeV	2.1418 GeV	0.91596	2.3383 GeV	PSB
25.1 GeV	26.021 GeV	0.99935	26.038 GeV	PS
450 GeV	450.94 GeV	0.999998	450.94 GeV	SPS
7 TeV	7.0009 TeV	1.	7.0009 TeV	LHC



0 bis 90 keV – Die Ionenquelle

Modell der Protonenquelle



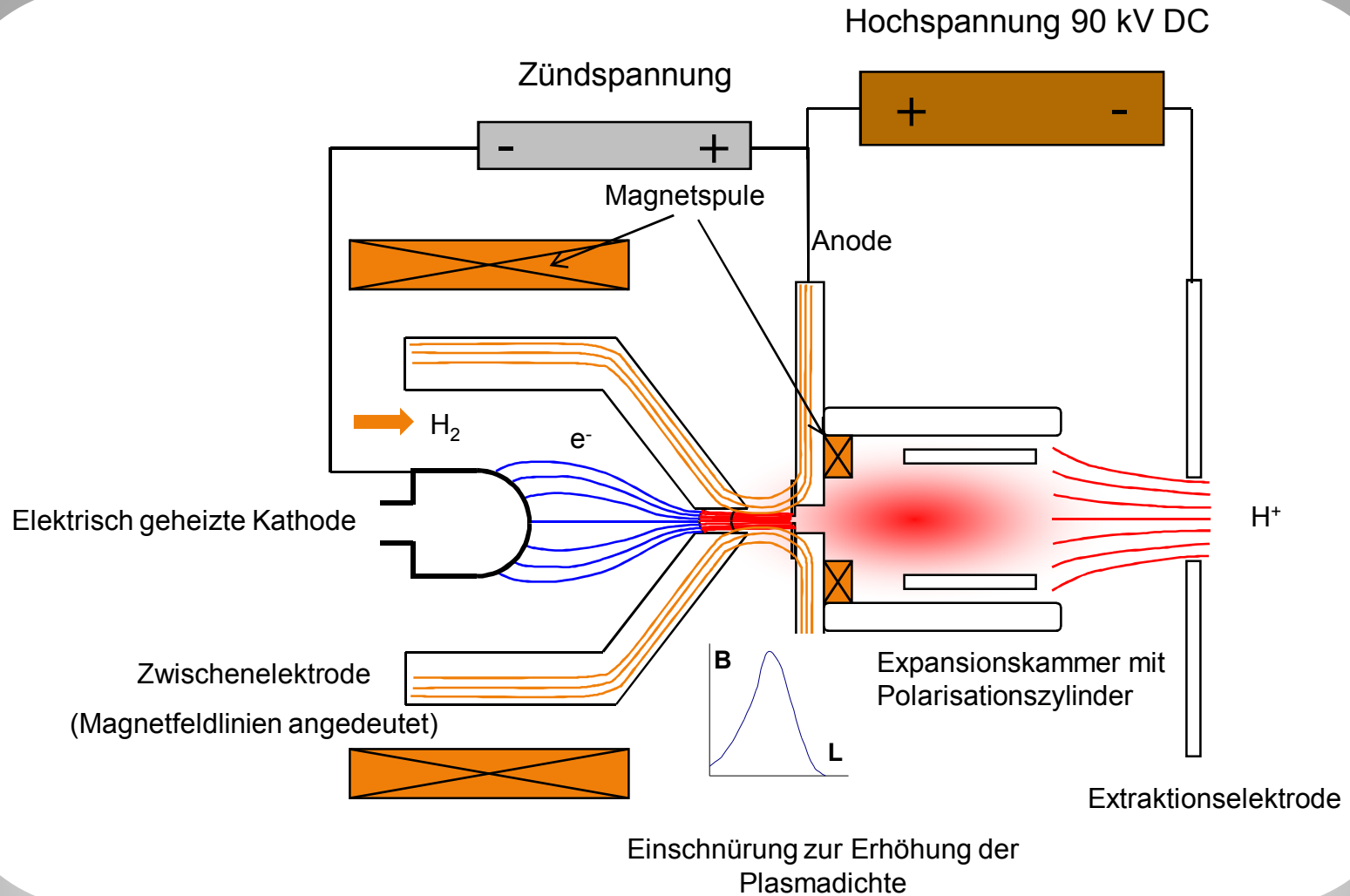
Faradayscher Käfig, in dem sich – auf 90 kV Potential – die wirkliche Protonenquelle befindet.

Wasserstoffflasche

1:1 Modell des Duo-plasmatrons

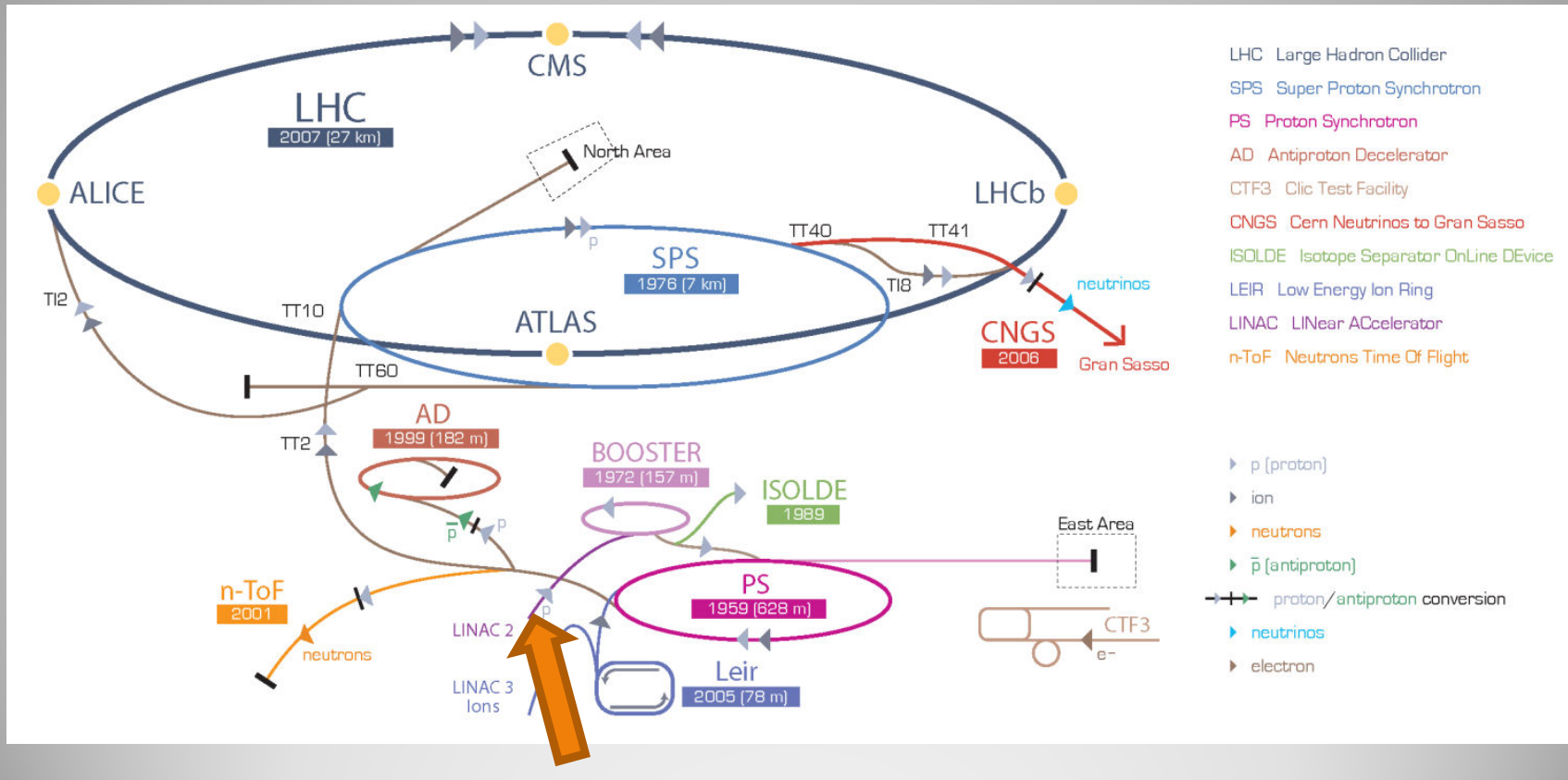
Strahlentunnel zum RFQ und Linac 2

Duoplasmatron – Prinzip



Duoplasmatron – Aufbau





90 bis 750 keV – RFQ

Länge: 2 m

Injektor für Linac 2 vor 1993



Faradayscher Käfig,
Ionenquelle und
Elektronik auf 750 kV
Potential

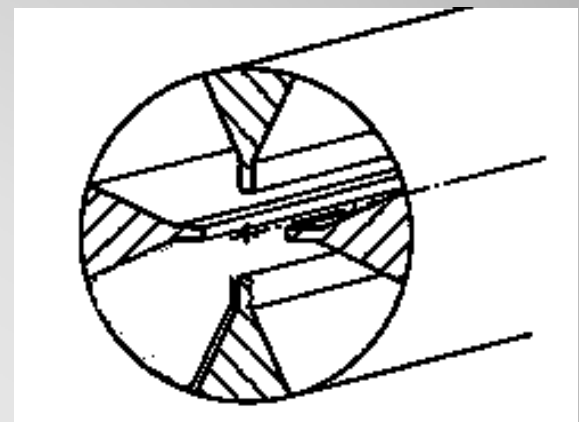
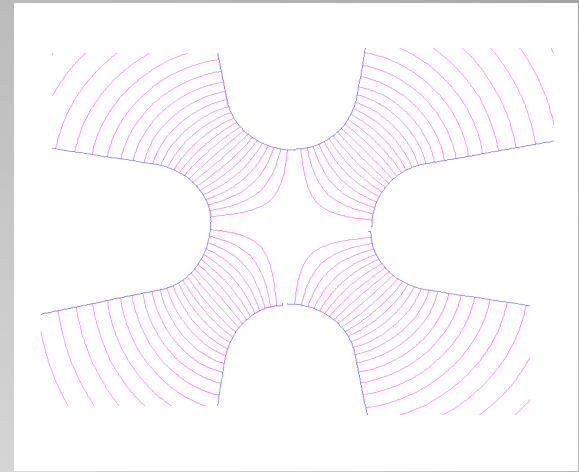
Strahlrohr zum Linac 2

Cockcroft-Walton,
750 kV

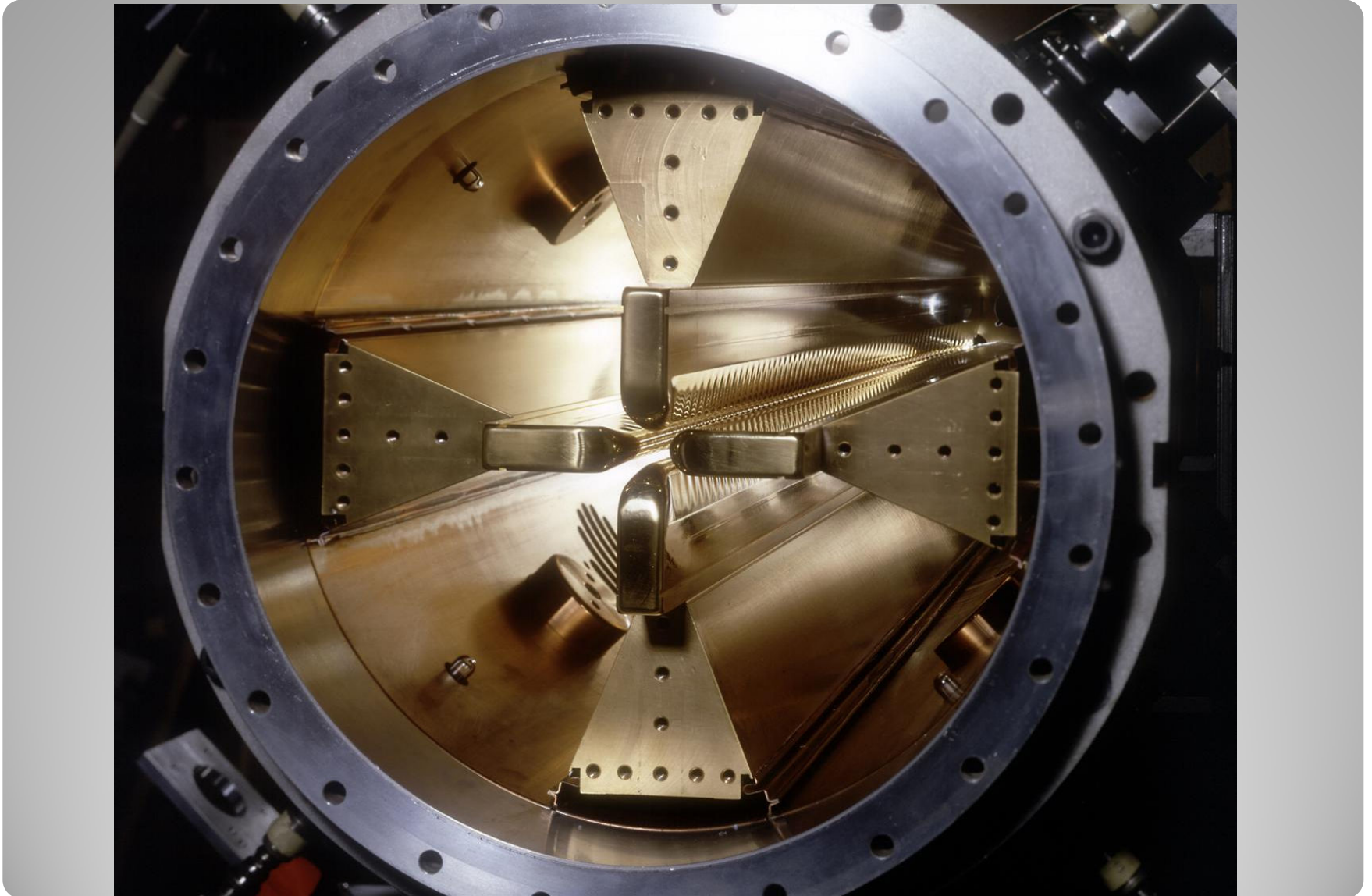
All dies wurde 1993 durch einen etwa 2 m
langen RFQ ersetzt ...

RFQ – Radiofrequenz Quadrupol

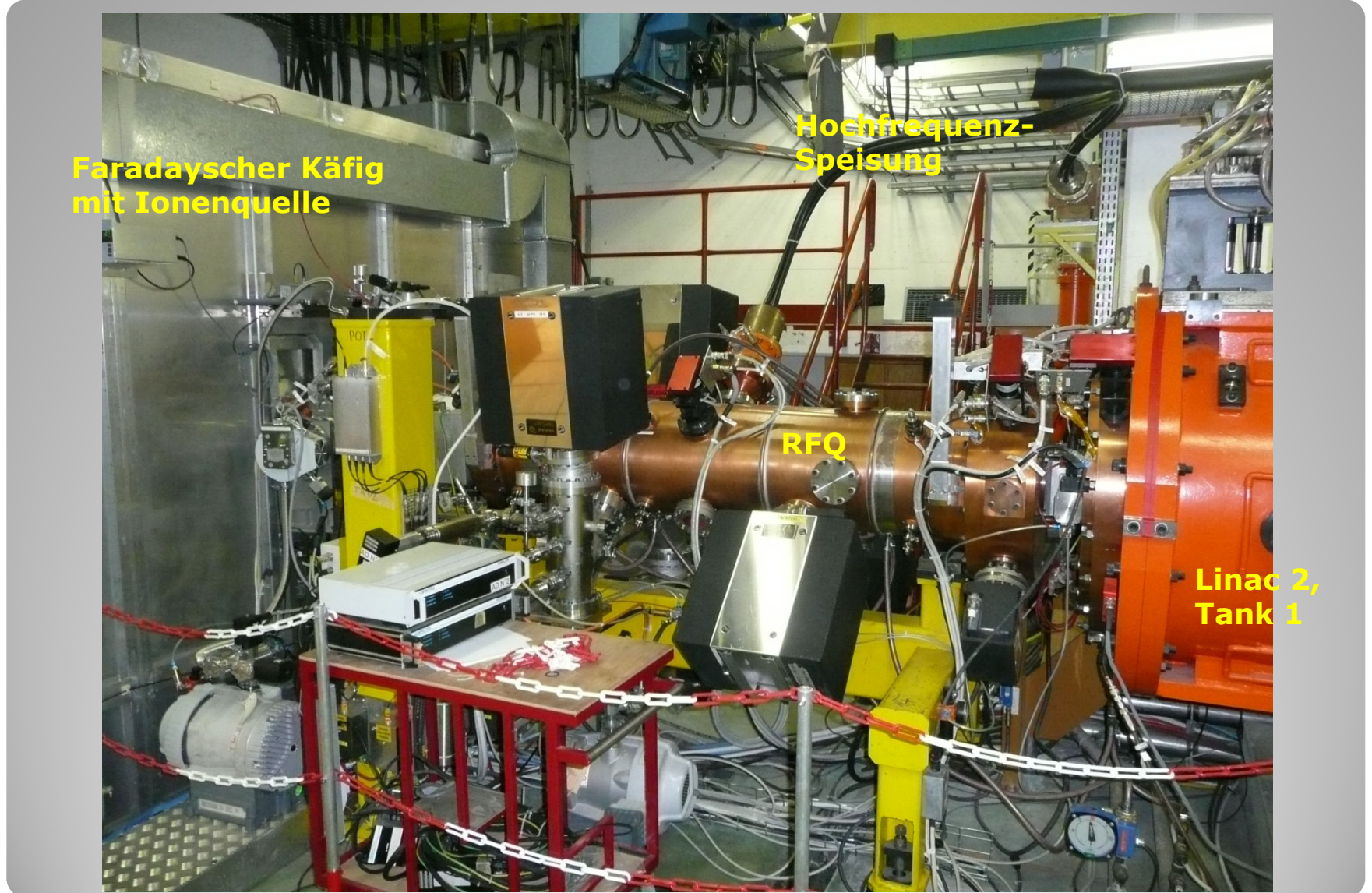
- 4 längliche Elektroden, die ein quadrupolares, transversal-elektrisches Feld formen.
- Dieses Feld variiert mit der HF (200 MHz) – d.h. für die in axialer Richtung laufenden Protonen ergeben sich abwechselnd F- und D- Quadrupole – ganz wie in einem FODO-Gitter. Das heißt, der RFQ fokussiert (ohne Magnete).
- Die Elektroden haben in Längsrichtung eine leichte Undulation – dadurch ergibt sich die zur Paketbildung und Beschleunigung notwendige longitudinale elektrische Feldkomponente.

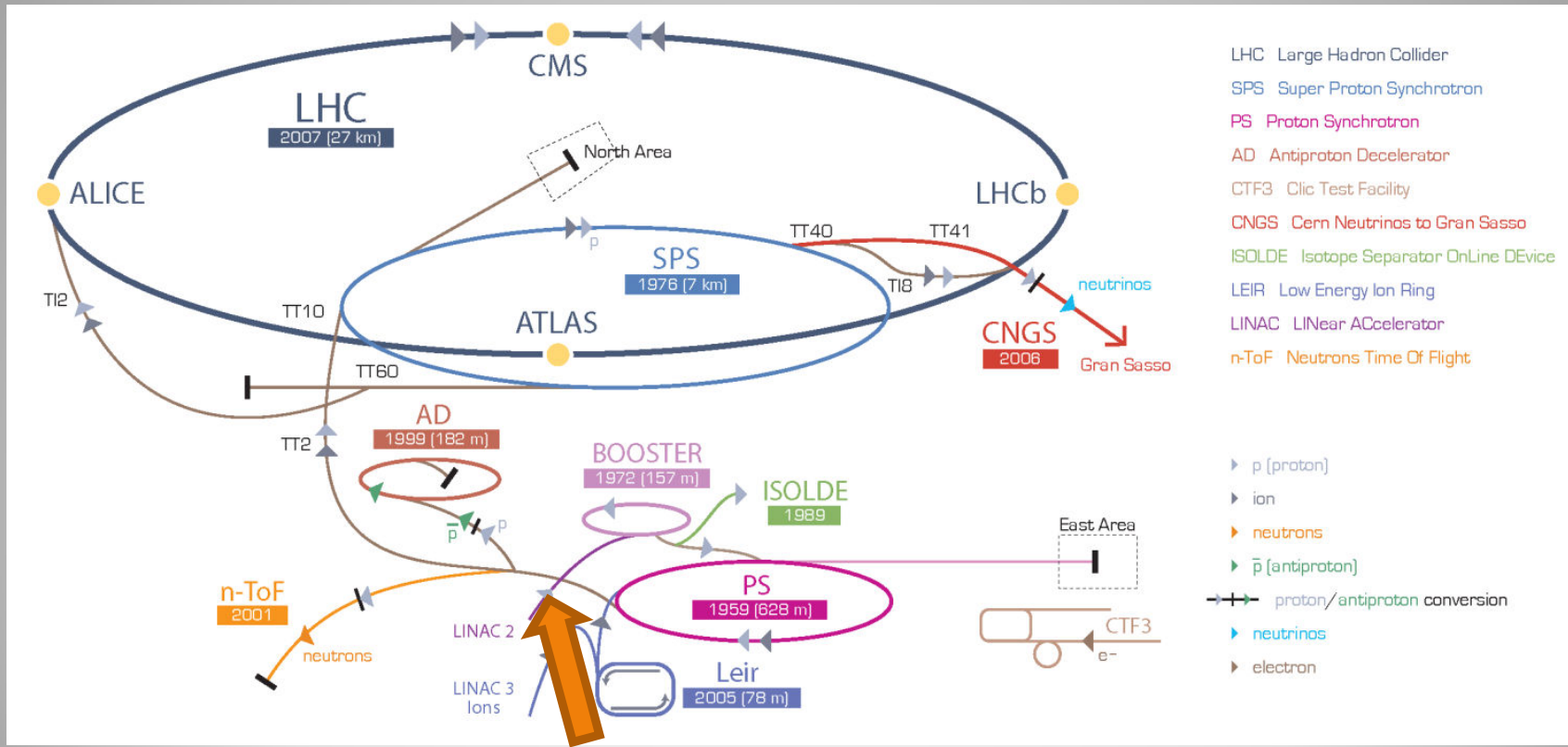


Innenansicht des RFQ



Außenansicht des RFQ



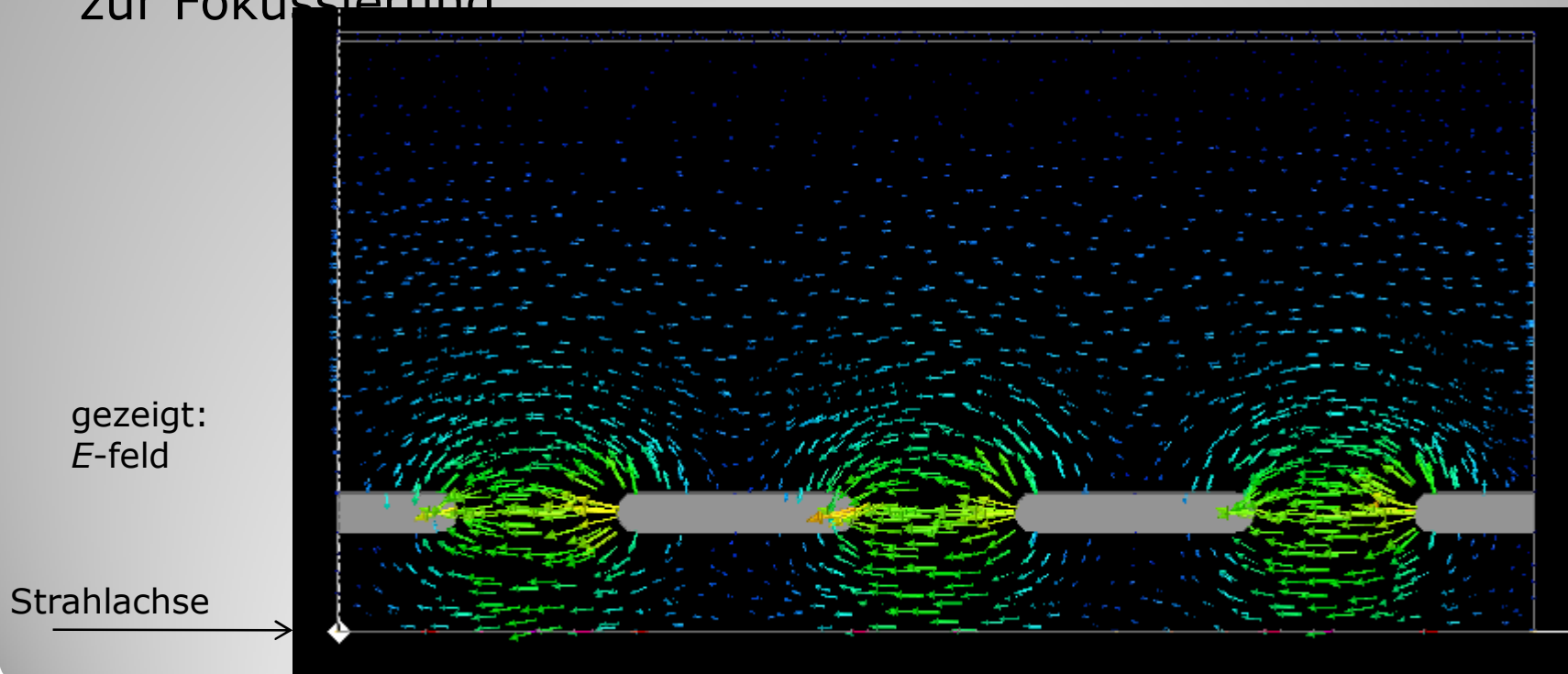


Von 0.75 bis 50 MeV – Linac 2

Länge: 34 m

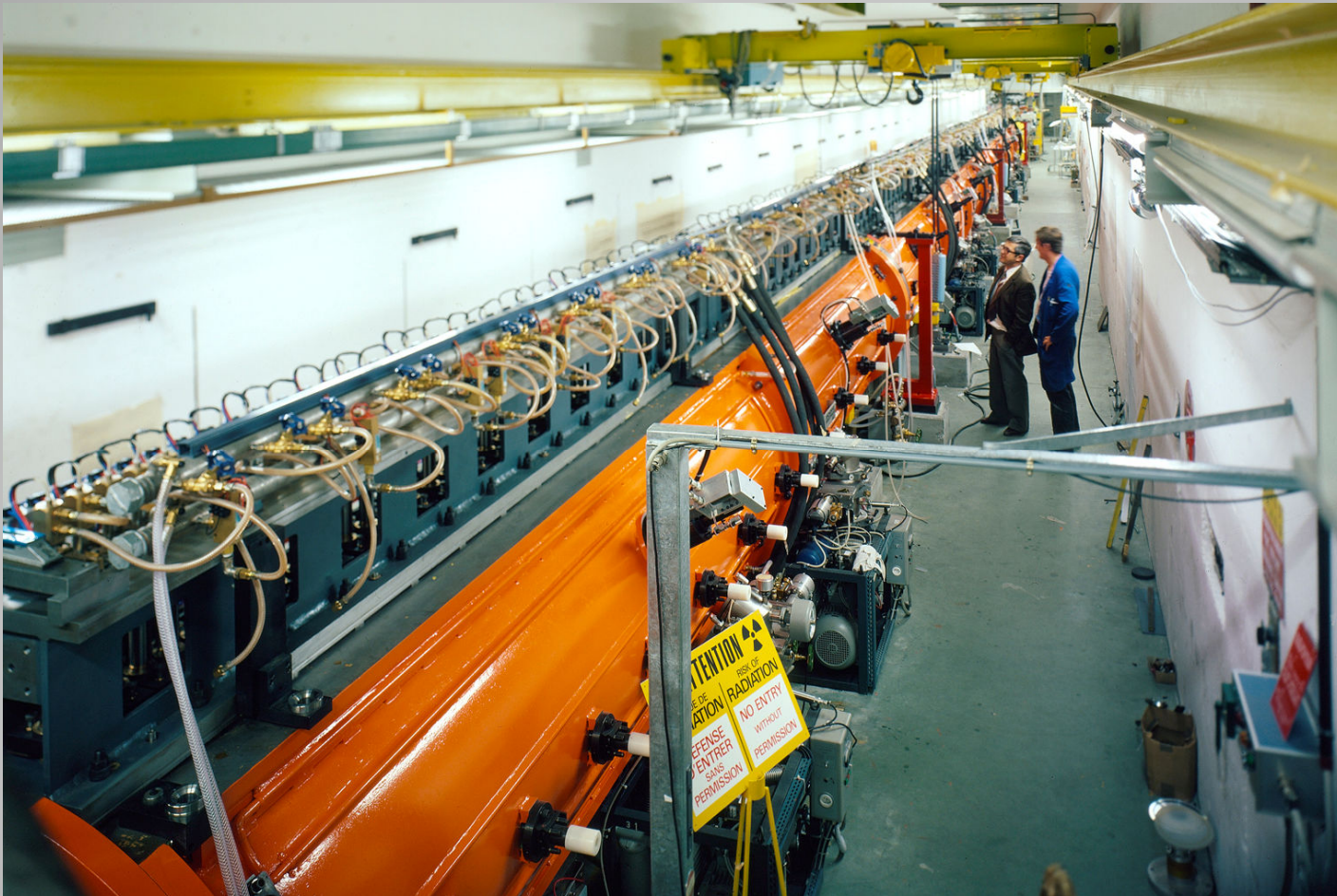
Alvarez-Struktur

- Die Alvarez-Struktur besteht aus einem Tank mit darin aufgehängten *drift tubes*, sie heißt daher auch **Drift Tube Linac**.
- Die *drift tubes* sorgen dafür, daß die Teilchen das Feld nicht sehen, wenn es die falsche Phase hat.
- In den *drift tubes* befinden sich magnetische Quadrupole zur Fokussierung



Linac 2

- 3 RF Tanks, 750 keV bis 50 MeV, ca. 34 m lang.
- Hochfrequenz 200 MHz, ca. 30 MW.



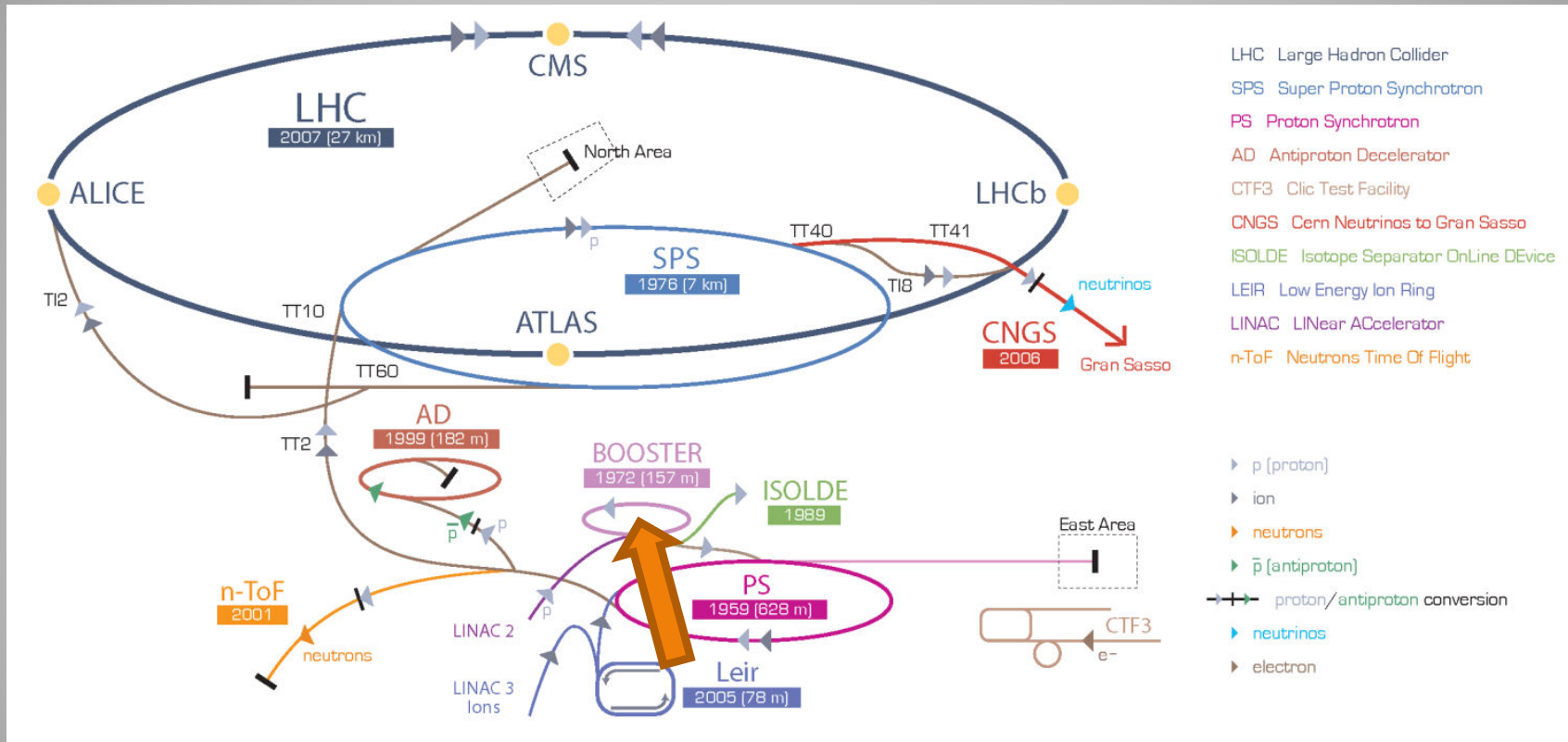
Die *drift tubes* des Linac 2



9. Juli 2009

DPG Schule "Beschleuniger- und Hochenergiephysik" Bad Honnef

19



Von 50 bis 1400 MeV – PS Booster

Radius: 25 m (Umfang ca. 157 m), 4 Ringe

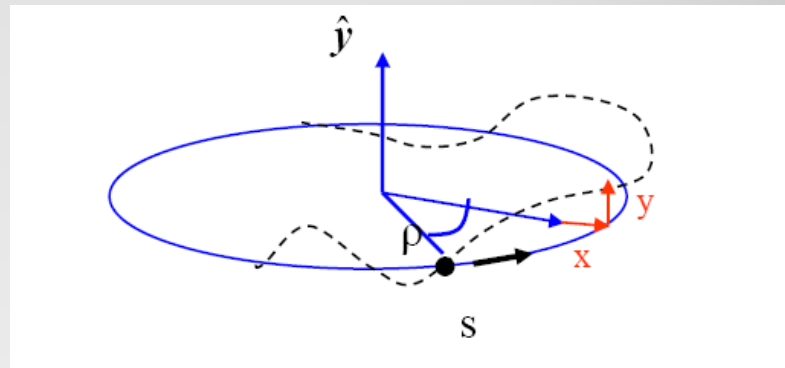
PS Booster – 4 Synchrotrons übereinander

- 4 separate Ringe übereinander, Radius 25 m
- Injektion in die 4 Ringe nacheinander über bis zu 20 Umläufe pro Ring.
- Raumladungseffekte bei niedriger Energie limitieren die Intensität im Booster.
Erreicht: Etwa $4 \cdot 10^{13}$ Protonen ($1 \cdot 10^{13}$ pro Ring)



Betatron-Schwingungen

- Der "*closed orbit*" zeichnet sich dadurch aus, daß ein Teilchen auf ihm nach genau einem Umlauf exakt wieder seine Anfangsbedingungen erreicht.
- Teilchen mit abweichenden Anfangsbedingungen (Position, Winkel) oszillieren wegen der fokussierenden Kräfte während des Umlaufs um diesen *closed orbit*.
- Die Anzahl dieser Betatron-Schwingungen pro Umlauf nennt man "*betatron tune*".
- Um Strahlverluste zu vermeiden, sollte der *betatron tune* nicht ganzzahlig (oder halbzahlig) sein (nichtlineare Resonanzen)!



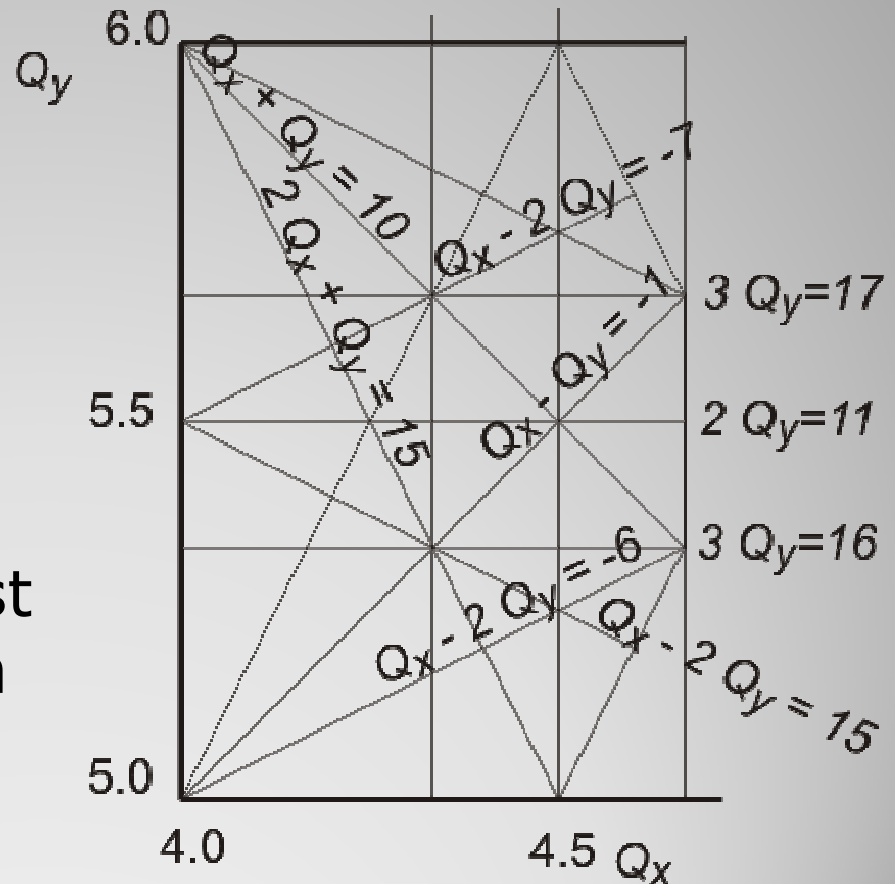
Tune Diagramm

- Im allgemeinen sind auch Resonanzen höherer Ordnung ($|i| + |j|$) zu meiden:

$$i Q_x + j Q_y = k$$

Tune Diagramm
für den
PS Booster mit
Resonanzen
erster, zweiter und
dritter Ordnung

- Man wählt einen Arbeitspunkt möglichst weit von diesen Linien entfernt.



Raumladungseffekte

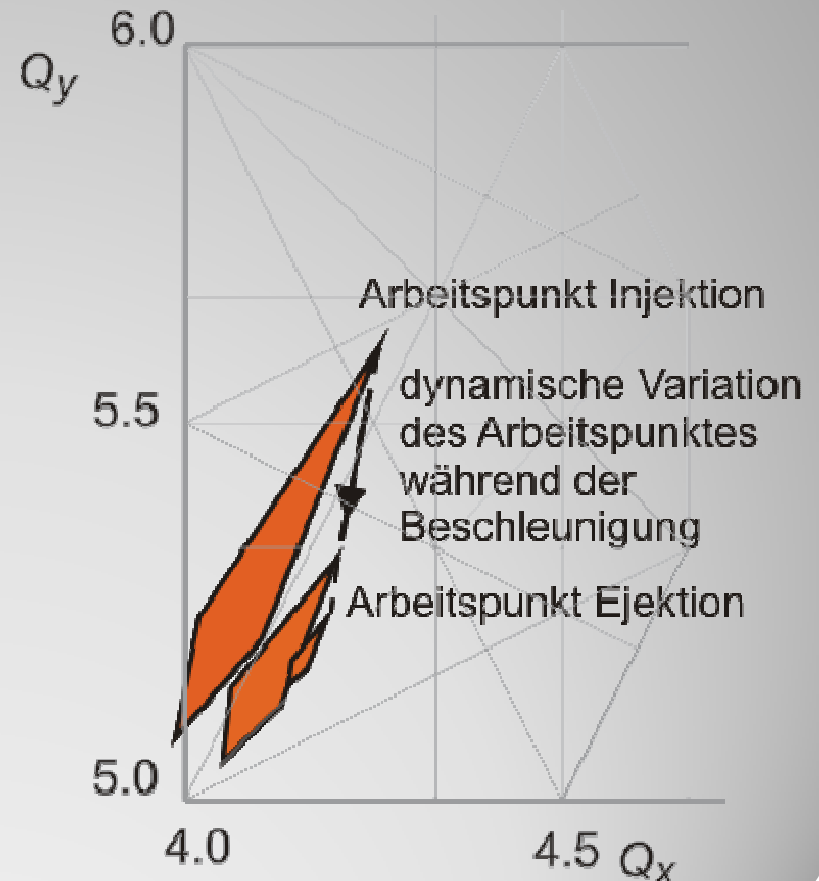
- Raumladungskräfte:
 - Elektrische Abstoßung (gleichnamige Ladungen e)
 - Magnetische Anziehung (parallele Ströme $I = v e$)
- Die magnetische Kraft wächst mit v , bis sie im Grenzfall $v = c$ die elektrische Kraft kompensiert.
- Die resultierende Raumladungskraft bleibt für $v < c$ abstoßend und nimmt mit der Energie ab.

$$F_{\text{Raumladung}} \propto \frac{1}{\beta \gamma^2}$$

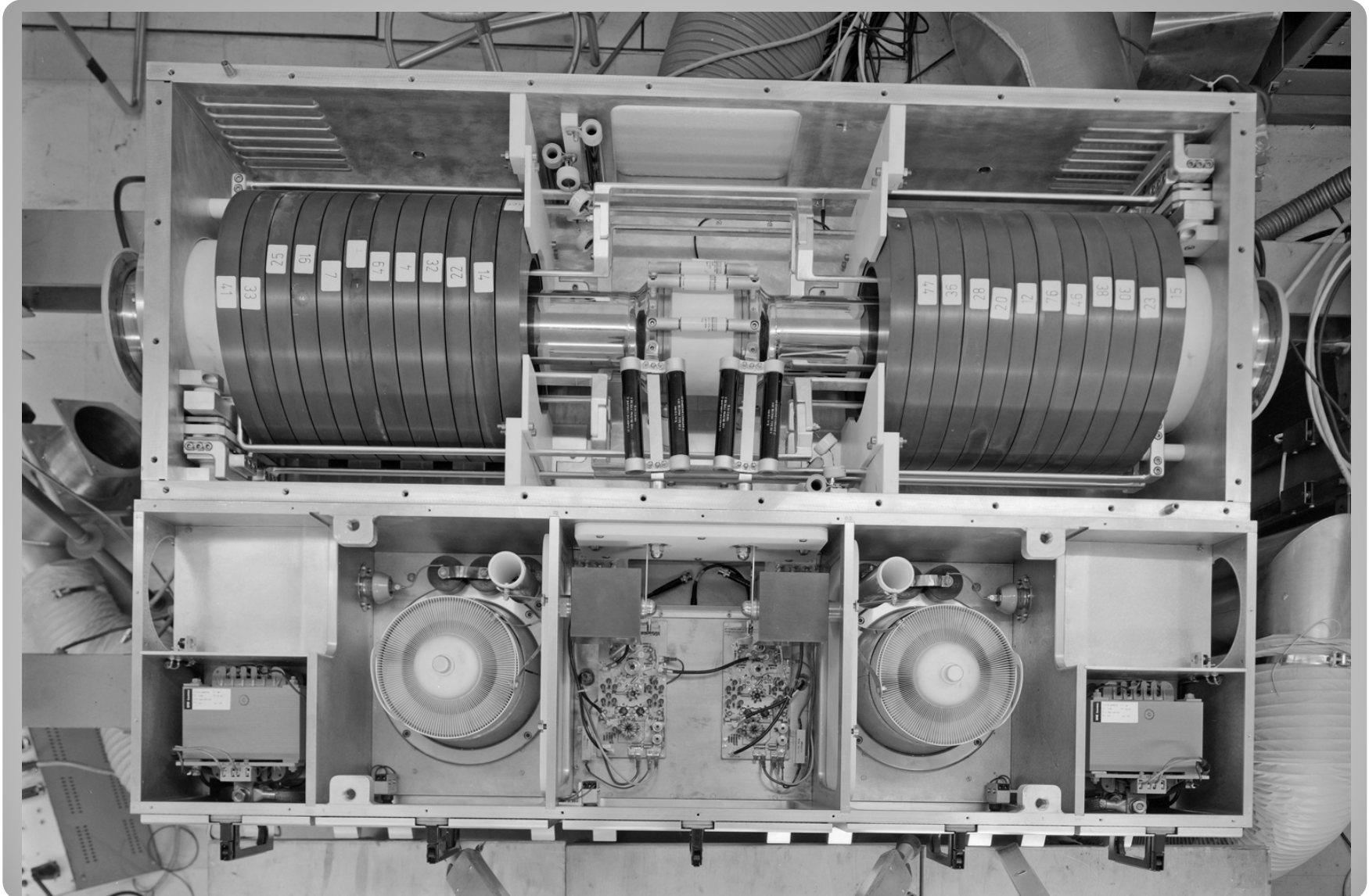
- ... daher sind Raumladungseffekte bei niedriger Energie besonders kritisch.

Tune spread

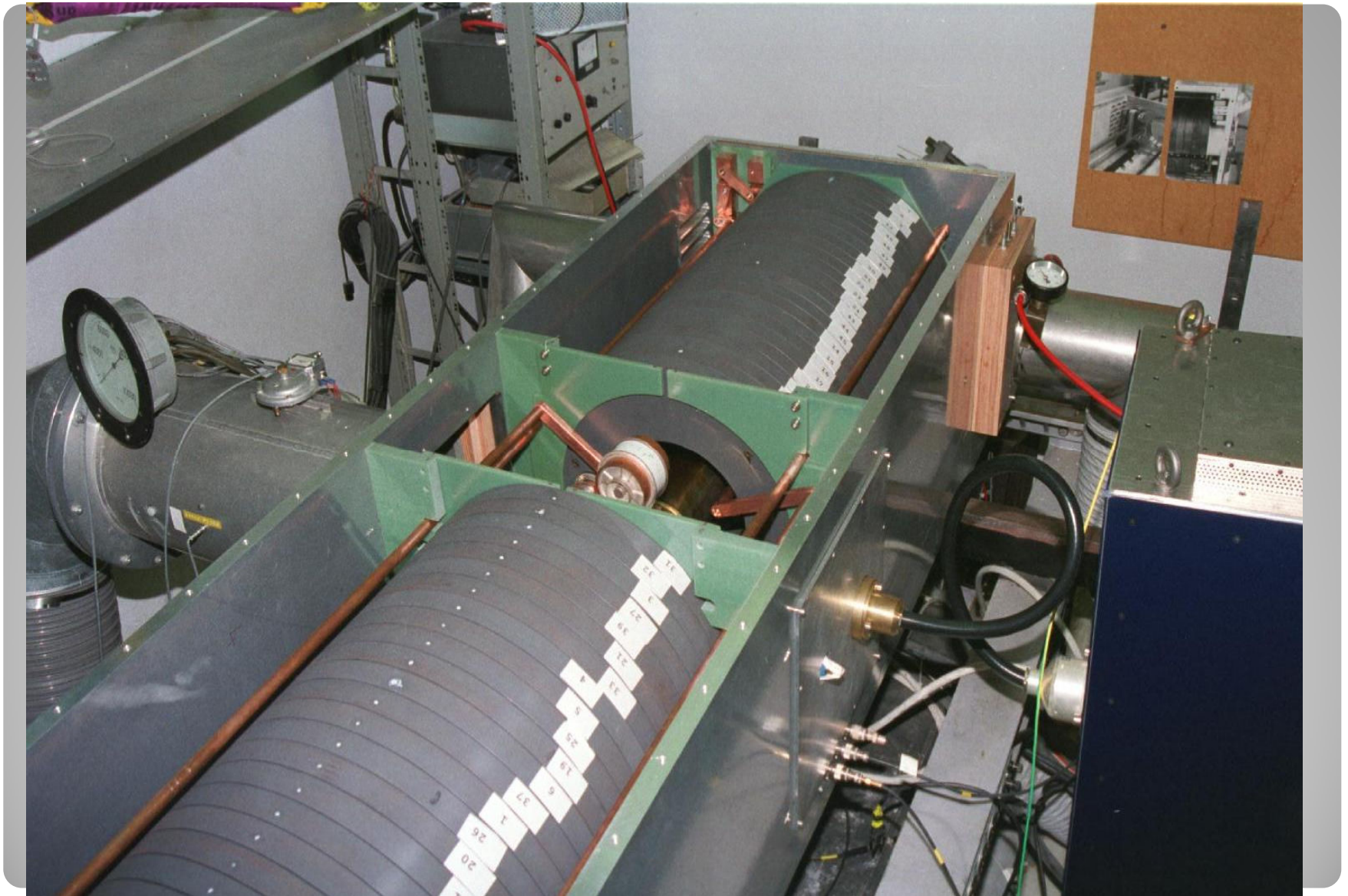
- Da die Raumladungskräfte die fokussierenden Kräfte mindern (die äußeren Teilchen schirmen die inneren ab), haben Teilchen inmitten eines Pakets geringere *betatron tunes* als solche am Rand. Es ergibt sich ein "*tune spread*".
- Um dennoch möglichst viel Ladung zu beschleunigen,
 - verändert man den Arbeitspunkt dynamisch,
 - kompensiert man einige Resonanzen mit Korrekturmagneten,
 - macht man die longitudinale Ladungsverteilung möglichst flach (z.B. mit RF-Systemen auf mehreren Harmonischen)



Booster Kavität 1983 (3 ... 8 MHz)



Booster Kavität 1996 (0.6 ... 1.8 MHz)



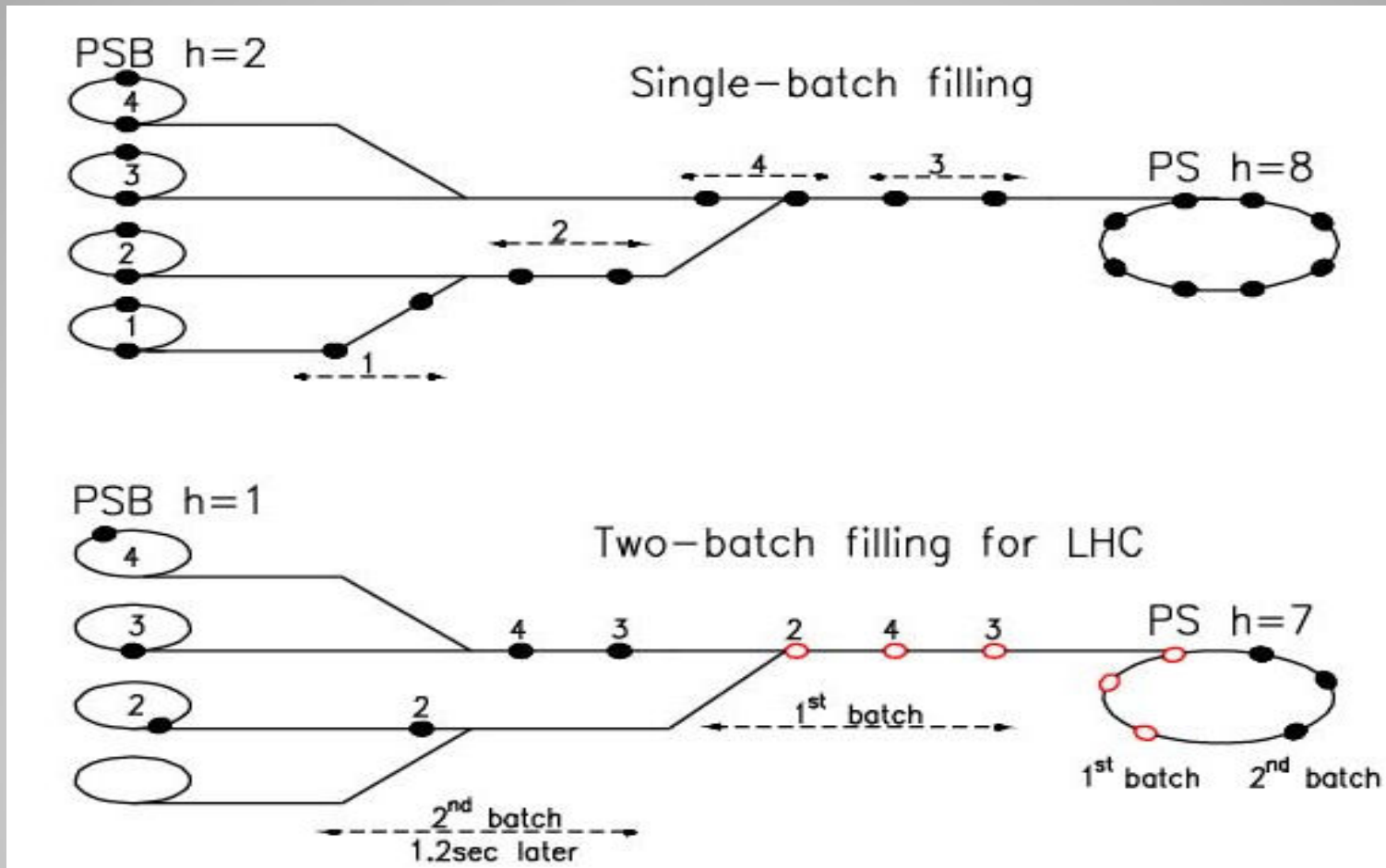
9. Juli 2009

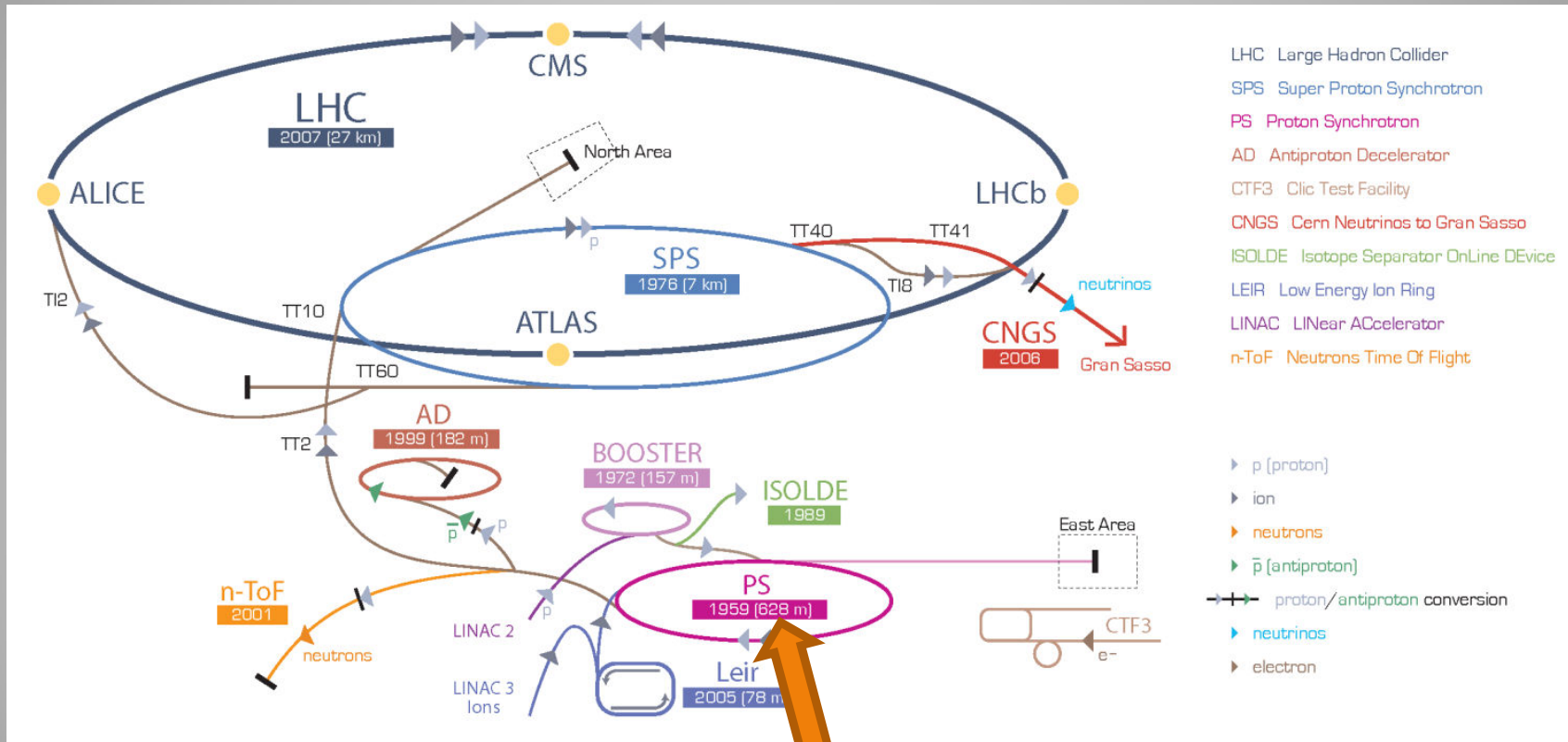
DPG Schule "Beschleuniger- und Hochenergiephysik" Bad Honnef

27

Strahltransfer von Booster zum PS

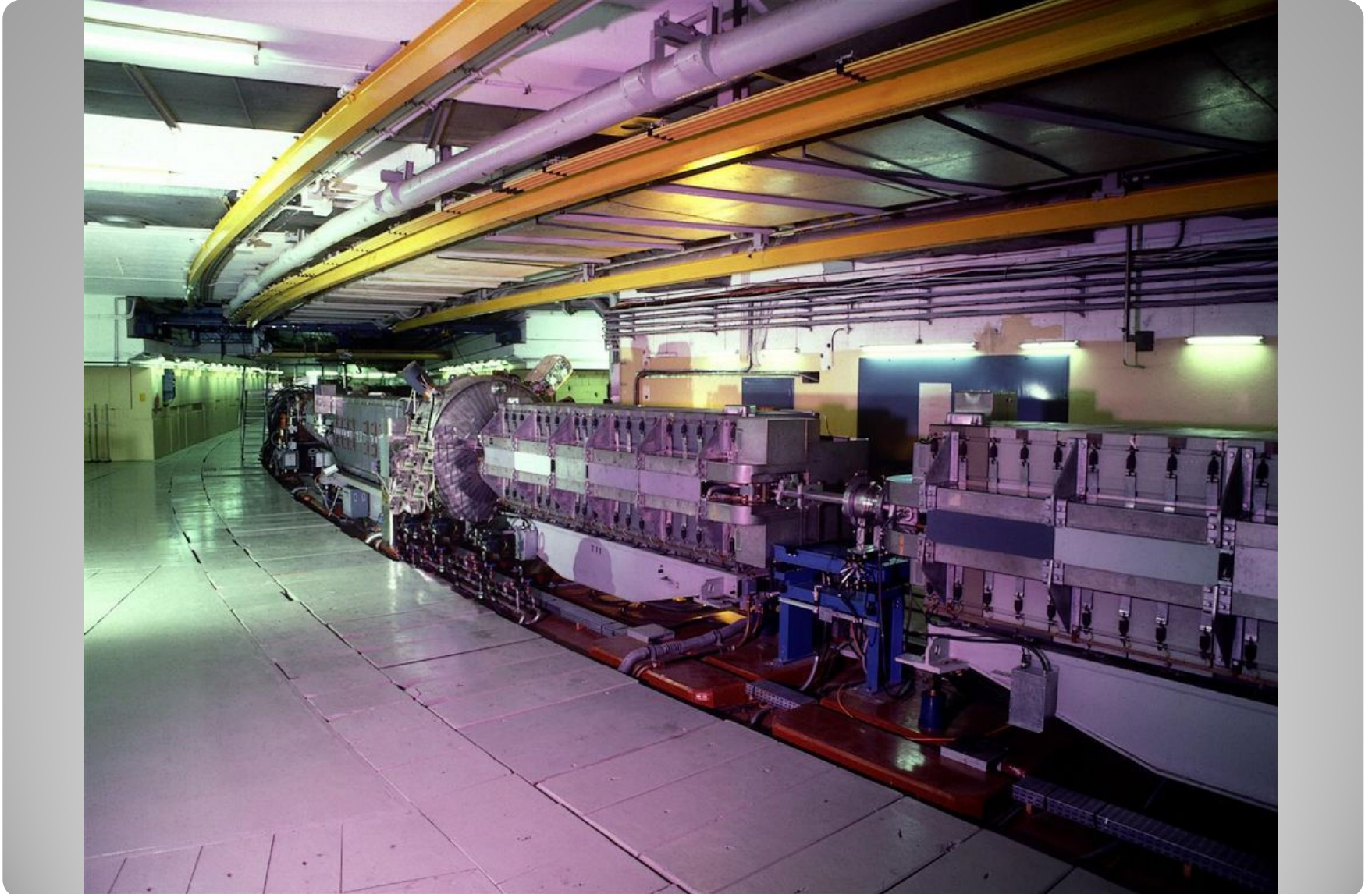
- “*double-batch*” erlaubt höhere Intensität





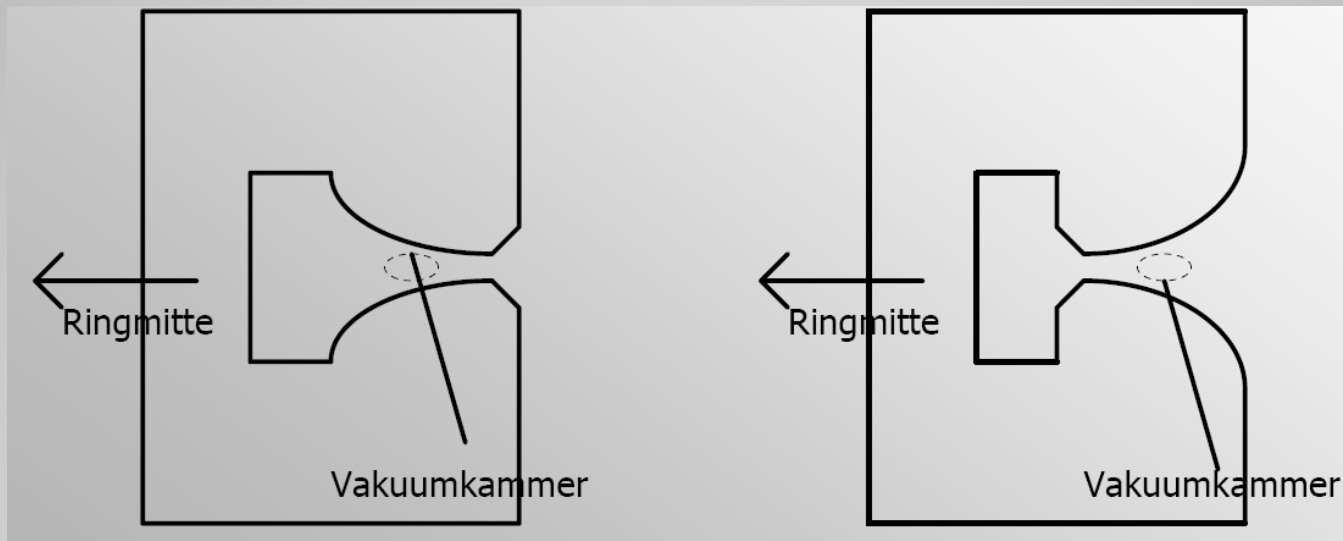
Von 1.4 bis 26 GeV – das PS

Radius: 100 m (Umfang ca. 628 m, 4 x PSB)



PS

- Das PS feiert 2009 seinen 50ten Geburtstag - für ein Synchrotron ist das ein hohes Alter!
- Es hat Dipole mit profilierten Polen, die gleichzeitig fokussierende Funktion haben (*combined function*)



horizontal fokussierend,
vertikal defokussierend

horizontal defokussierend,
vertikal fokussierend

Strahldynamik im Synchrotron

- Im homogenen Magnetfeld ergibt sich eine Kreisbewegung.
- Trägheitskraft = Rückstellkraft:

$$\omega p = q v B$$

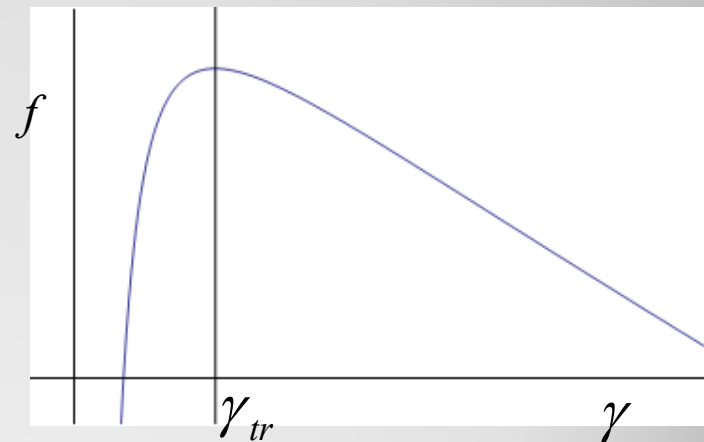
$$p/q = R B$$

- Bei Beschleunigung im Synchrotron (wachsendes p) wird B erhöht um R konstant zu halten.
- Teilchen mit leicht abweichender Energie werden durch Fokussierungsmagnete in der Strahlkammer gehalten; ihr Orbit etwas verschieden, beschrieben durch die "*momentum compaction*"

$$\alpha_p = \frac{\Delta R/R}{\Delta p/p}$$

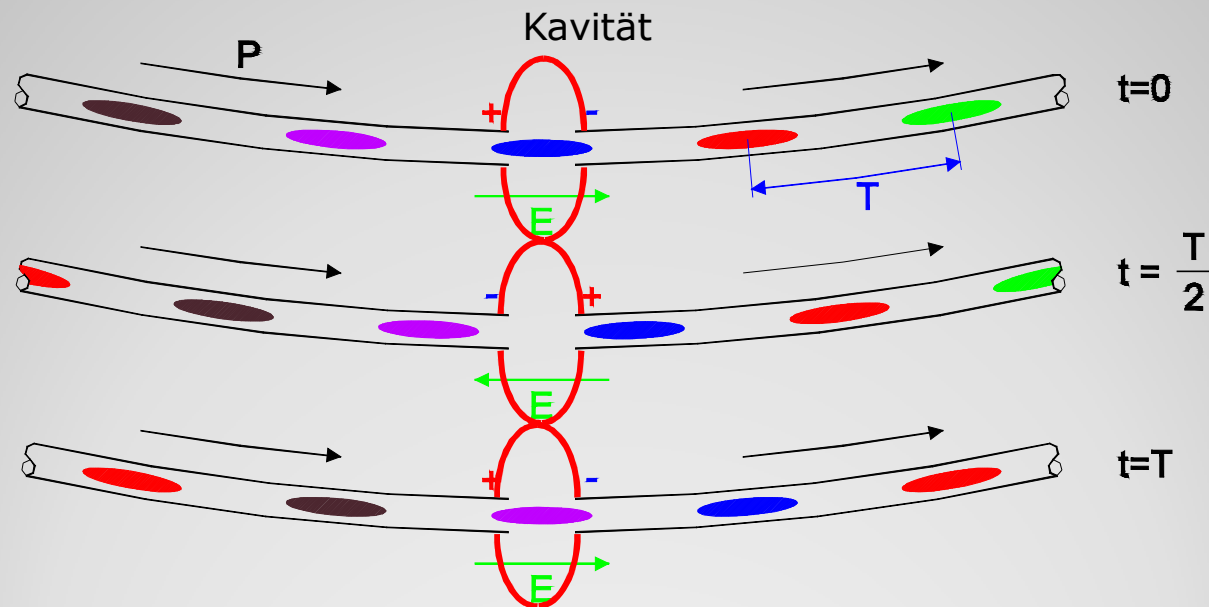
Umlauffrequenz - *transition*

- Die Umlauffrequenz f_{rev} ergibt sich aus $f_{rev} = \frac{v}{2\pi R}$.
- Teilchen mit abweichender Energie haben abweichende Umlauffrequenzen:
 1. da sie eine abweichende Geschwindigkeit haben,
 2. da sie (wegen der *momentum compaction*) einen längeren Weg zurücklegen:
$$\frac{\delta f}{f} = \frac{\delta v}{v} - \frac{\delta R}{R} = \frac{1}{\gamma^2} - \alpha_p$$
- D.h.: bei niedriger Energie wächst die Umlauffrequenz mit der Energie, bei hoher Energie wird sie wieder geringer.
- Die Energie γ_{tr} mit $\gamma_{tr}^{-2} = \alpha_p$ heißt *transition energy*.



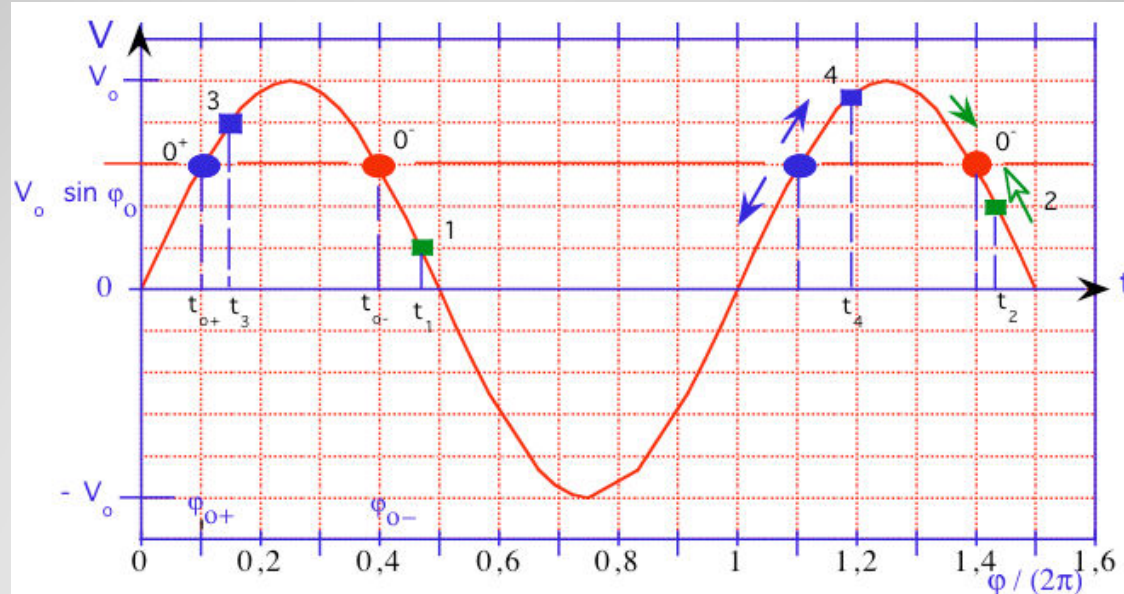
Beschleunigung

- Beschleunigt wird mit hochfrequenten elektrischen Feldern in sog. "Kavitäten".
- Damit das funktioniert, kommen die Protonen in Paketen – h Pakete passen auf einen Umlauf.
- Die Hochfrequenz ist dann $h f_{rev}$.

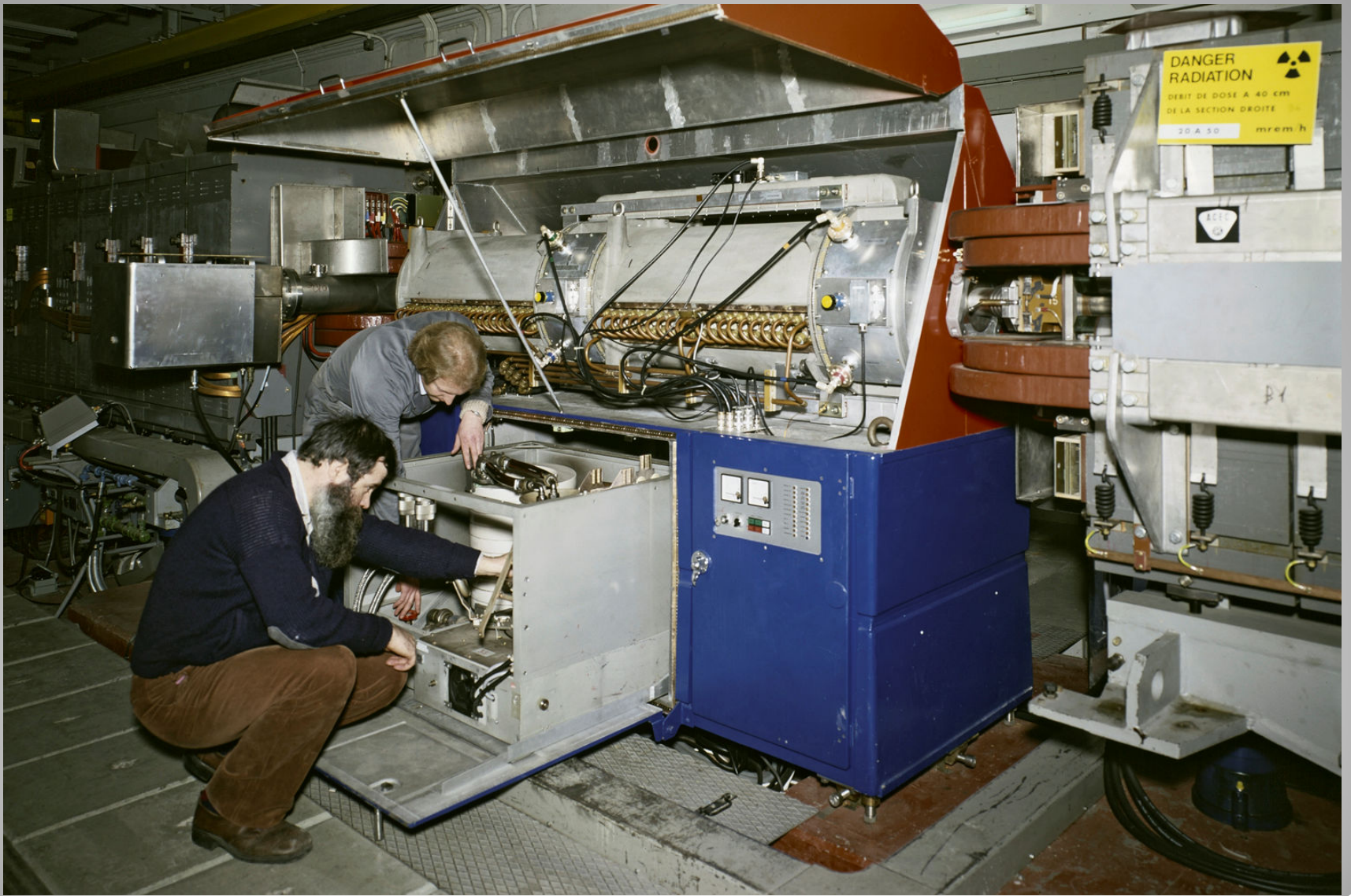


Phasenstabilität

- Annahme: die Spannung in der Kavität sei $V \sin(\omega t)$, ein Teilchen, das sie zum Zeitpunkt $\omega t_0 = \varphi_0$ passiert, erhalte gerade die richtige Energie $V e \sin(\varphi_0)$, um im nächsten Umlauf wieder zum Zeitpunkt t_0 am *gap* zu sein.
- Man nennt φ_0 die stabile Phase, wenn Teilchen in der Nähe von eine Rückstellkraft auf φ_0 zu erfahren.
- Unterhalb *transition* ist die stabile Phase φ_{0+} , oberhalb φ_{0-} . Bei *transition* muß daher die RF-Phase umgeschaltet werden!



PS Beschleuniger-Kavitäten



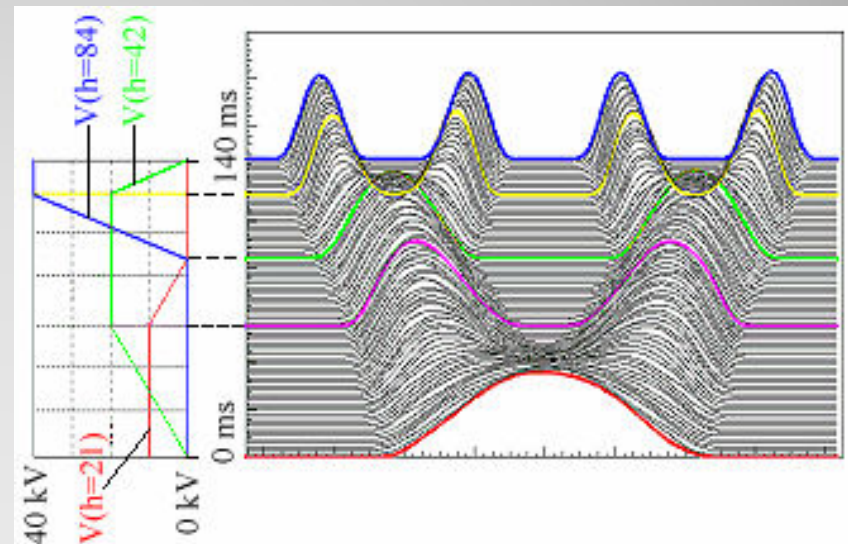
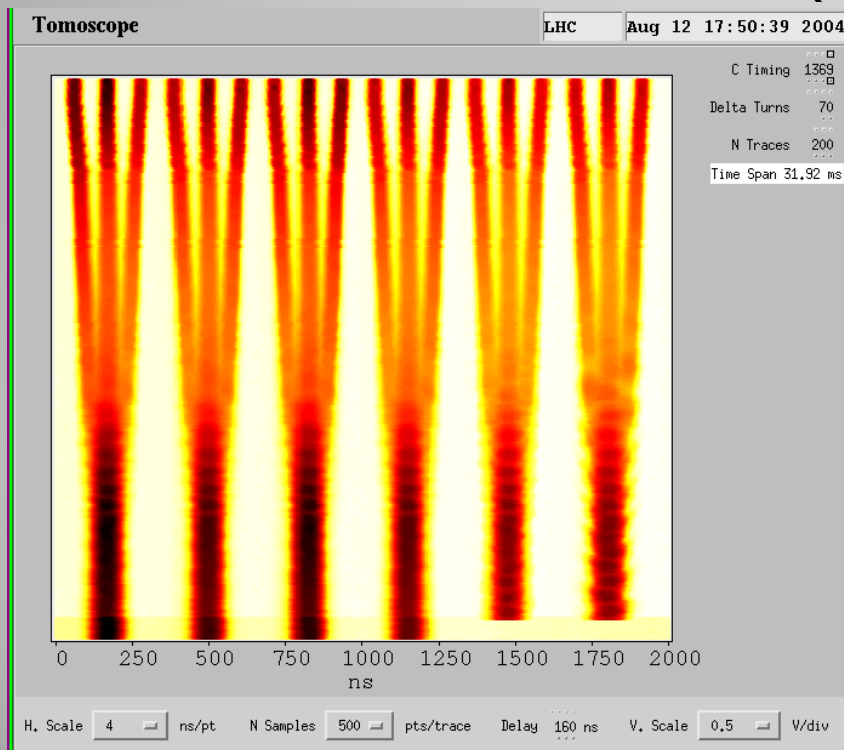
9. Juli 2009

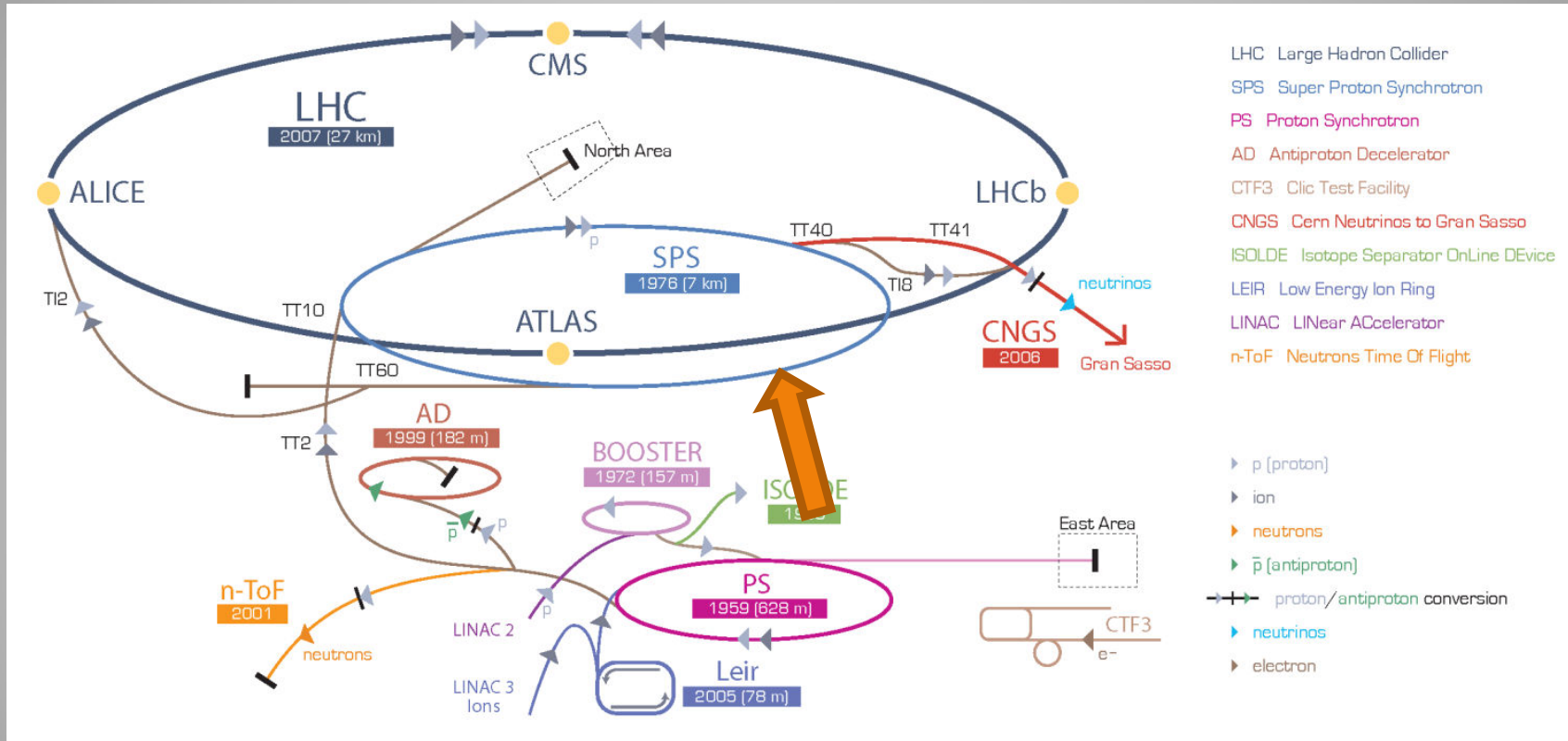
DPG Schule "Beschleuniger- und Hochenergiephysik" Bad Honnef

36

Longitudinale Strahl-“Gymnastik“ im PS

- Injektion von Booster auf $h=7$, 3-fach Teilung der Pakete mit den Harmonischen 7, 14, 21 (linkes Bild).
- Beschleunigung auf $h=21$.
- Bei $p=26$ GeV/c weitere 4-fach Teilung der Pakete mit Harmonischen 21 und 84 (rechtes Bild):





Von 25 bis 450 GeV – das SPS

Umfang: 6.911 km (11 x PS)

SPS Tunnel

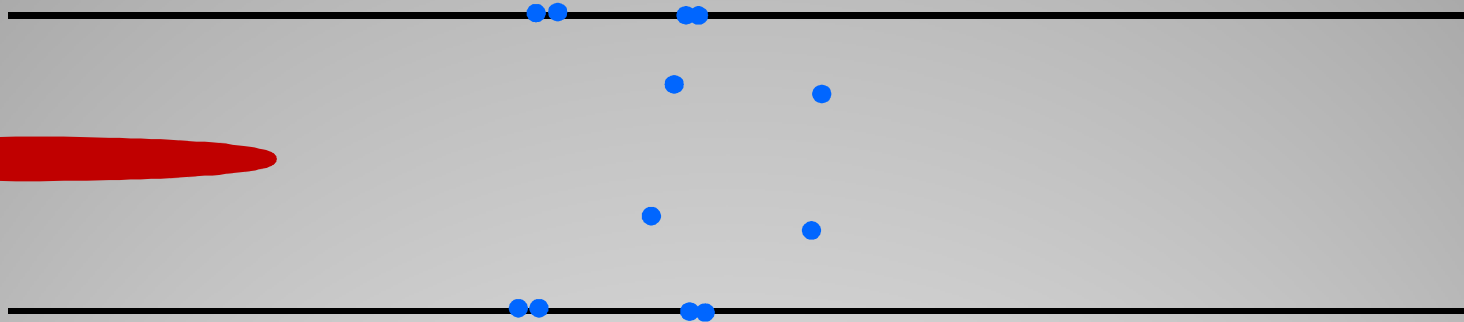


9. Juli 2009

DPG Schule "Beschleuniger- und Hochenergiephysik" Bad Honnef

39

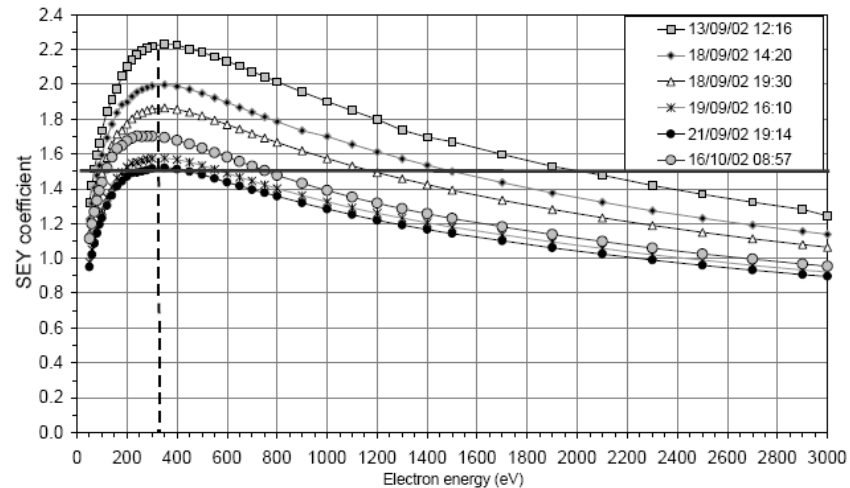
"e-cloud" – Elektronenwolke



- Ein passierendes Protonenpaket (rot) zieht in der Strahlkammer vorhandene Elektronen (blau) an und beschleunigt sie auf die gegenüberliegende Strahlkammeroberfläche zu.
- Dort werden Sekundär-Elektronen emittiert, in Abhängigkeit vom SEY und der kinetischen Energie mehr als auftreffende Primärelektronen.
- Wir nehmen zur Anschauung einen SEY=2 an.
- Bei der Passage des nächsten Protonenpakets wiederholt sich der Effekt, aber die Elektronendichte wächst. Sie erreicht einen Gleichgewichtszustand, wenn Neuemissionen durch das Potential der Elektronenwolke selbst gebremst werden.
- Wenn der Abstand der Pakete ähnlich der Flugzeit der Elektronen ist, kommt es zu einem Resonanzeffekt (ähnlich *multipacting*).
- Die Wechselwirkung mit den Protonenpaketen lenkt diese ab und kann – in Abhängigkeit von der Intensität – zu Strahlverlust führen.

Sekundär-Emission (SEY)

- Typischer Verlauf des SEY:



- Um den *e-cloud* Effekt zu reduzieren, kann man
 - den Abstand der Protonenpakete verändern,
 - die Strahlkammer konditionieren, z.B. durch gezielten Strahlbeschuß (*scrubbing*, siehe Bild),
 - die Strahlkammer innen beschichten (Ti, TiN, NEG, C, ...),
 - longitudinale Furchen oder raue Oberflächen in der Strahlkammer anbringen,
 - mit zusätzlichen elektrischen (*clearing electrode*) oder magnetischen Feldern die Elektronen-Resonanzbedingung unterdrücken.

SPS Kavitäten



SPS 200 MHz Hochfrequenzsystem

"SIEMENS"

1.4 MW

20 Hochleistungs-Tetroden



"PHILIPS"

1.6 MW

68 Hochleistungs-Tetroden

Schutz der Maschine (1)

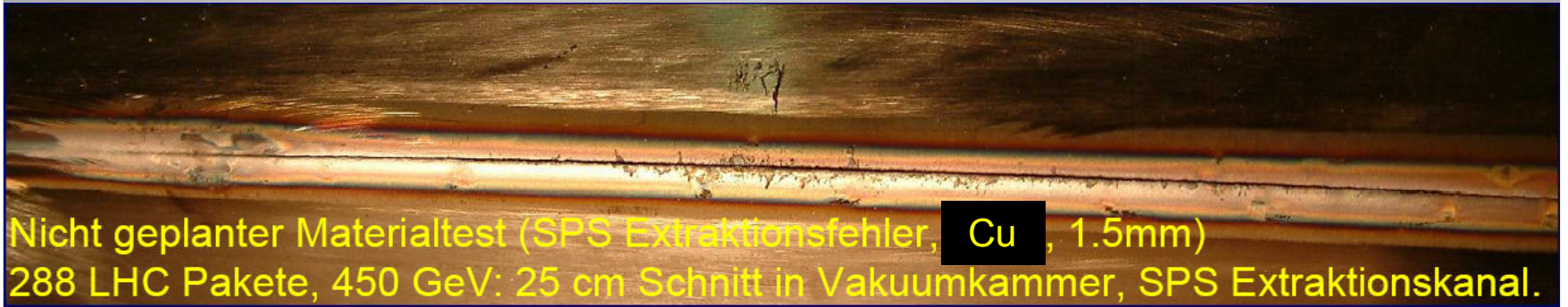
- Impakt (geplant) eines 450 GeV Strahles auf eine 2 mm Stahlplatte, 72 LHC Pakete, 450 GeV:



Strahlenergie: $1.1 \cdot 10^{11} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 72 \cdot 450 \cdot 10^9 \text{ VAs} = 0.57 \text{ MJ}$

Schutz der Maschine (2)

- Impakt (ungeplant) eines 450 GeV Strahles auf den Rand der Strahlkammer:



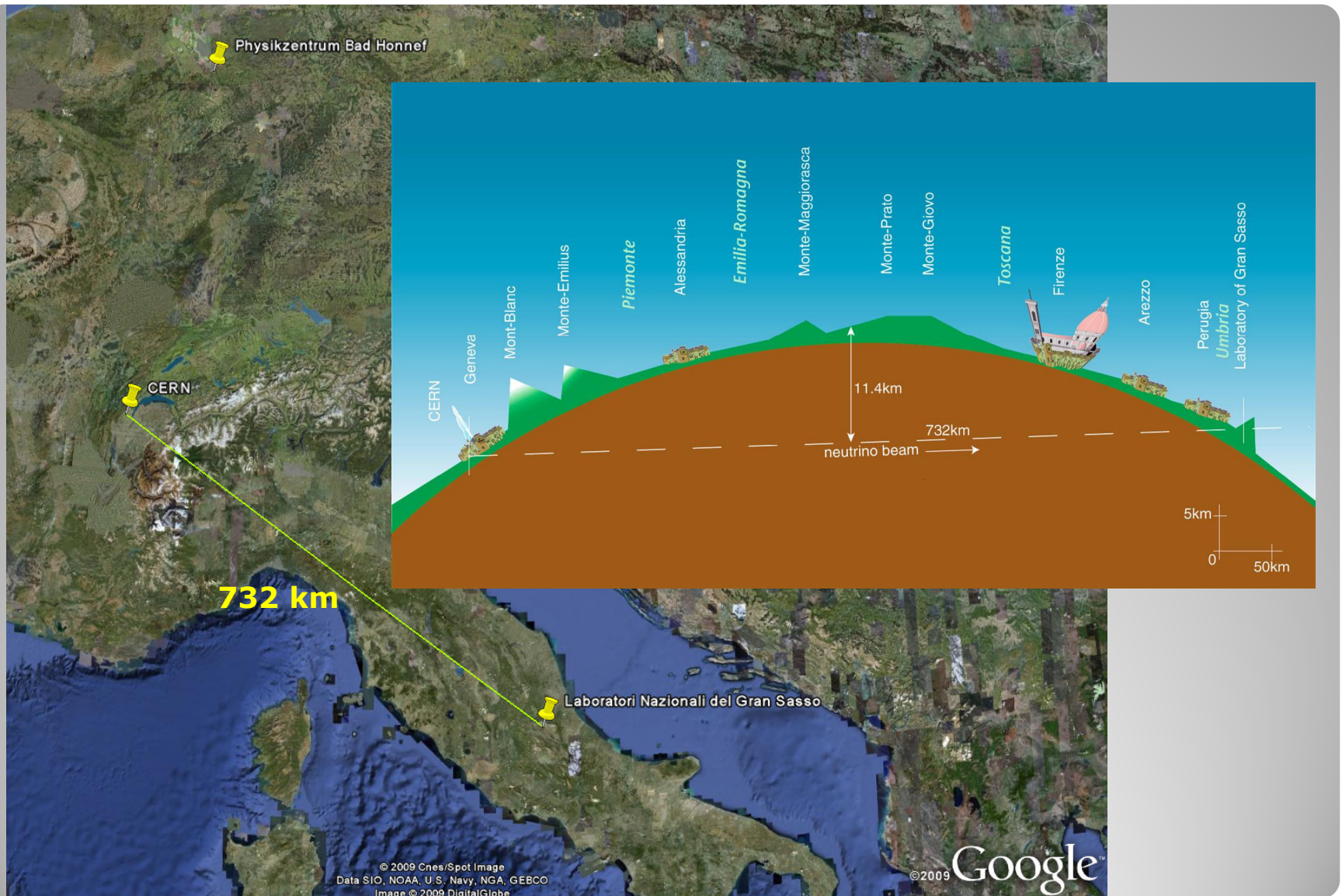
Strahlenergie: $1.1 \cdot 10^{11} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 288 \cdot 450 \cdot 10^9 \text{ VAs} = 2.3 \text{ MJ}$

Extrapolation zum LHC: $1.1 \cdot 10^{11} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 2808 \cdot 7 \cdot 10^{12} \text{ VAs} = 346 \text{ MJ}$

... äquivalent zu 60 kg TNT

- Unkontrollierter Teilchenverlust führt zur Zerstörung des Beschleunigers.
- Spezielle Strahl- und Beschleunigerüberwachungssysteme sind ein Muß.

CNGS – CERN Neutrinos zum Gran Sasso



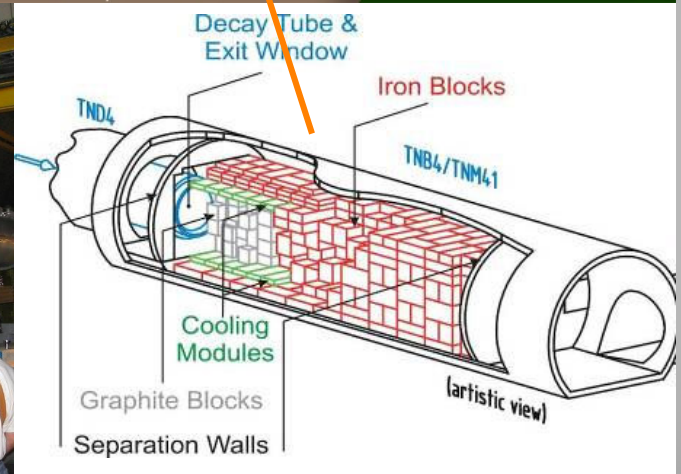
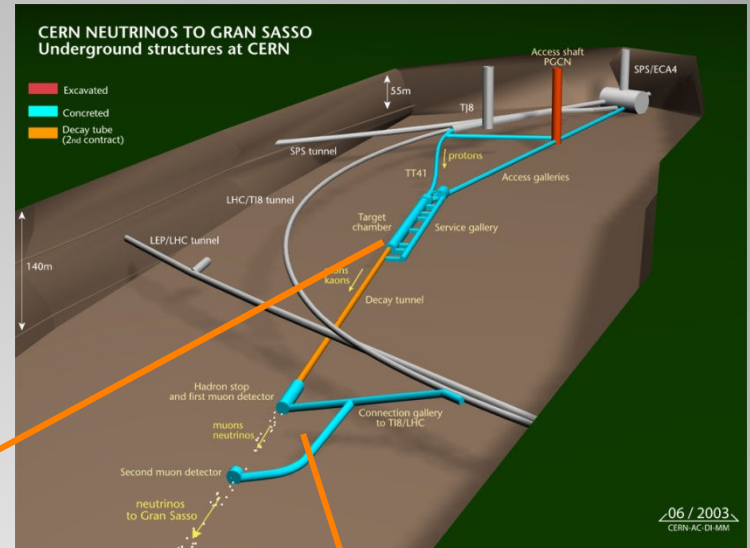
CNGS

• CERN Neutrinos nach Gran-Sasso

Strahlenergie:

$$4.8 \cdot 10^{13} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 400 \cdot 10^9 \text{ VAs} = 3.07 \text{ MJ}$$

... und die trifft alle 6 s auf das Target!
(würde CERN nur CNGS versorgen, wären das im Mittel 500 kW!)

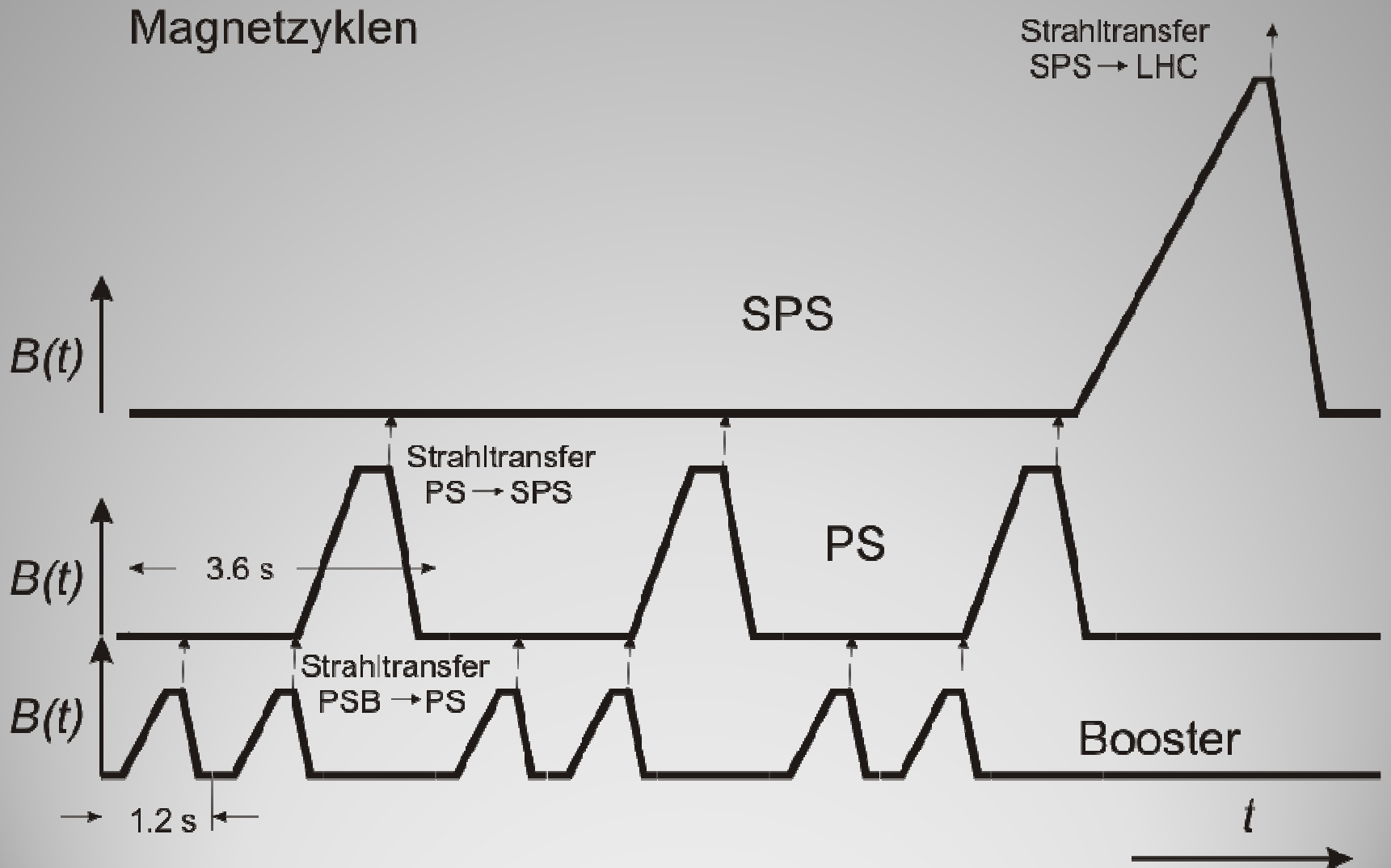




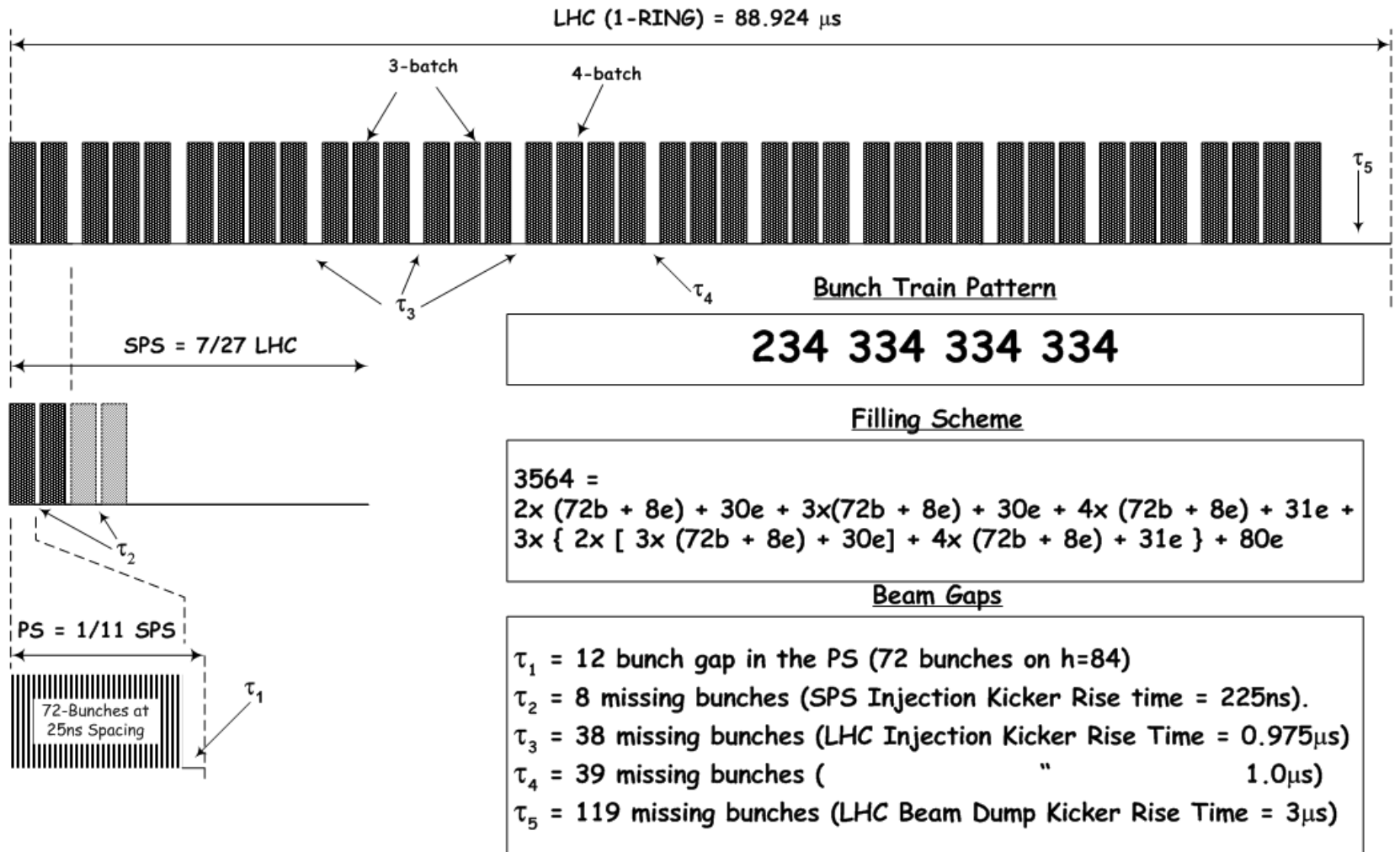
Das Zusammenspiel

Linac 2 → PSB → PS → SPS → LHC

Multi-batch Füllung



Das vollständige Injektionsschema



... und damit wären wir am Ende der LHC
Injektor-Kette ...

Fortsetzung: Der LHC

Vielen Dank für Ihr Interesse!