Teilchen-beschleuniger

Werner Joho

1. Klassifizierung der Beschleuniger
2. Zyklotrons
3. SLS
4. Varia

Zusätzliches Material von:
A.Wrulich, S.Lehmann, L.Rivkin, A.Streun

The Accelerator Facilities at PSI are up to world standards

Ringcyclotron 590 MeV protons

dedicated s.c. cyclotron

1.2 MW average Beam Power

high Intensity Muon Beams
$5 \cdot 10^8$ μ^+/s , 10^8 μ^+/s

Spallation Neutron Source 10^{14} n/s

Radiation Therapy with Spot Scanning and rotating Gantry

Swiss Light Source SLS

- extremely stable photon beams (< 0.5 μm)
- top-up and fast orbit feedback

Die Beschleuniger des PSI sind weltweit an der Spitze

Ringzyklotron 590 MeV Protonen

supraleitendes Zyklotron

1.2 MW mittlere Strahlleistung

hoch intensive Müonen Strahlen
$5 \cdot 10^8$ μ^+/s , 10^8 μ^-/s

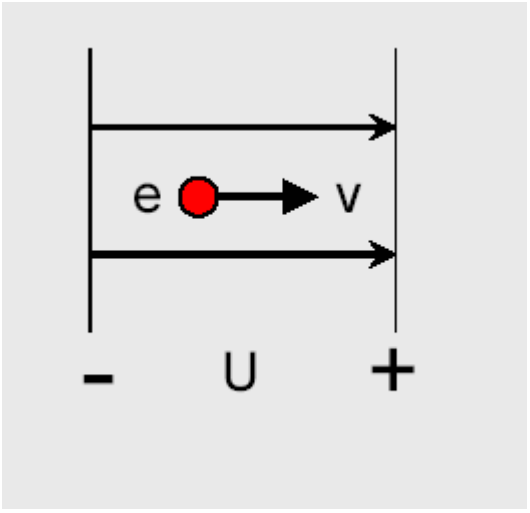
Spallations Neutronen-Quelle 10^{14} n/s

Strahlen-therapie mit „Spot Scanning“ und „rotating Gantry“

Swiss Light Source SLS

- extrem stabile Photonen Strahlen (< 0.5 μm)
- „top-up“ und „fast orbit feedback“

Direktbeschleunigung



Definition der kinetischen Energie eines Teilchens mit Ladung e:

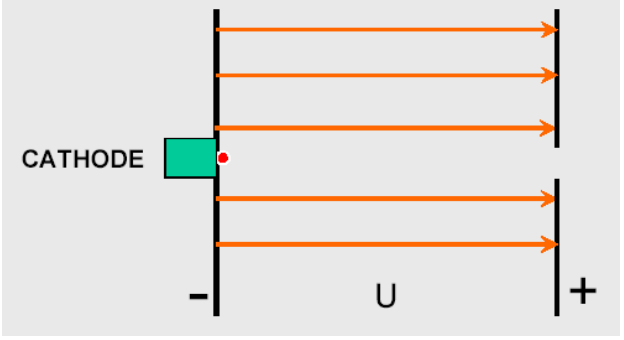
$E_{kin} = eU$ (Elektronvolt)

Nicht relativistisch:

$E_{kin} = ½ m v^2$

relativistisch:

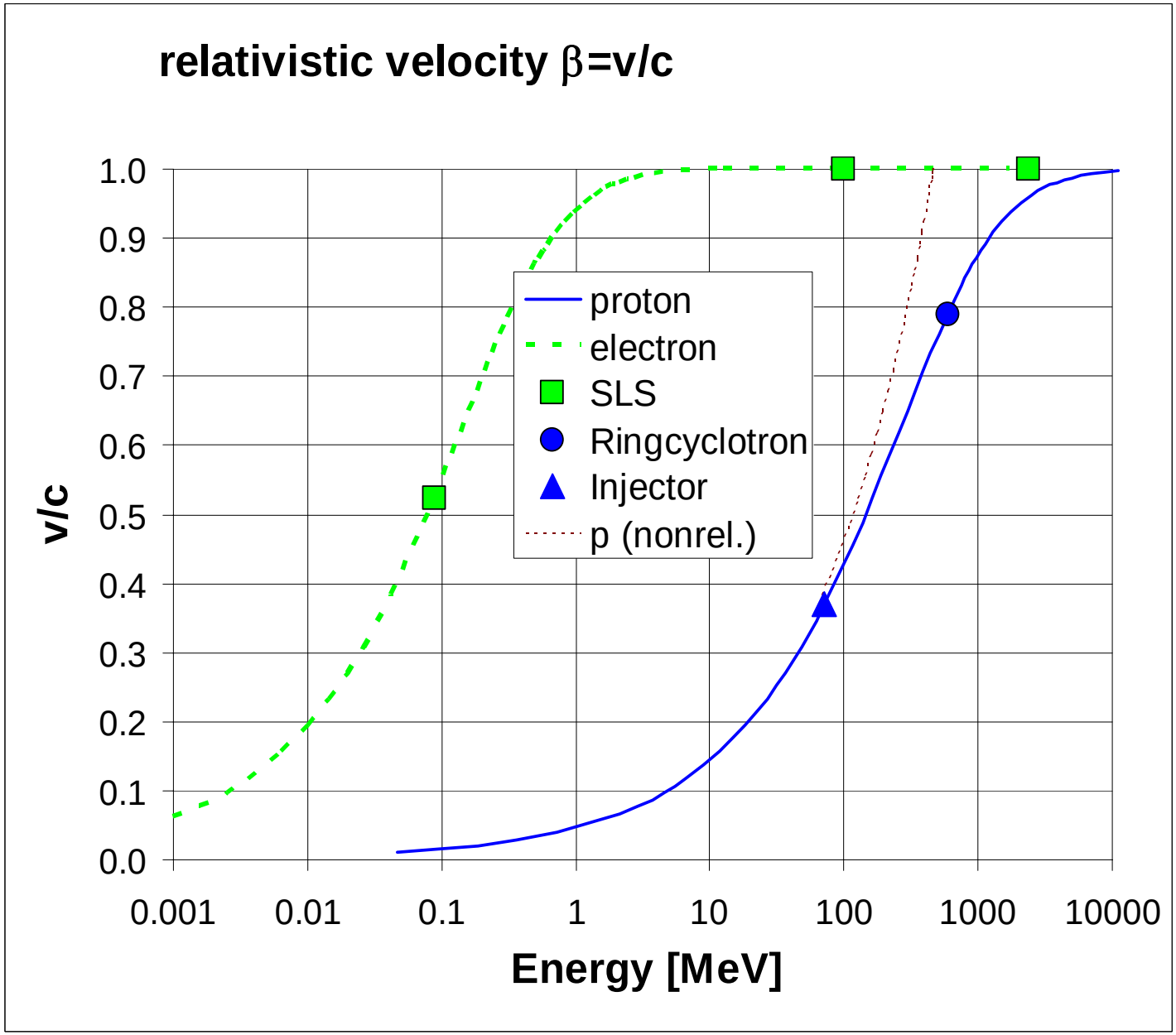
$E_{kin} = (\gamma\text{-}1) m c^2$

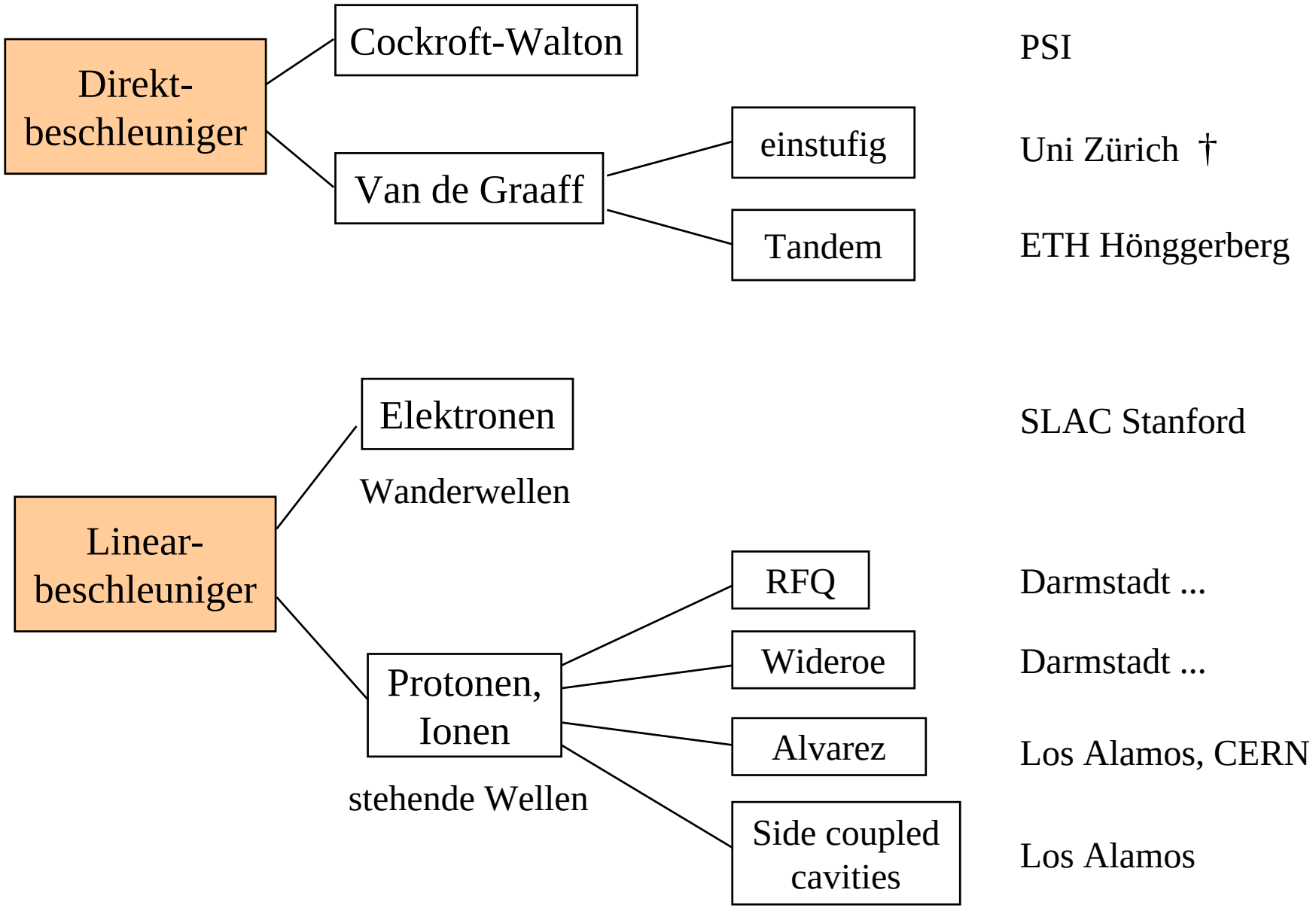


Elektronenkanone

z.B. bei SLS Linac

U=90kV, E_{kin} = 90 keV


relativistic velocity β=v/c
v/c
1.0
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
0.001
0.01
0.1
1
10
100
1000
10000
Energy [MeV]
proton
electron
SLS
Ringcyclotron
Injector
p (nonrel.)


Direkt-beschleuniger
Cockroft-Walton
PSI
Van de Graaff
einstufig
Uni Zürich †
Tandem
ETH Hönggerberg
Linear-beschleuniger
Elektronen
SLAC Stanford
Wanderwellen
Protonen, Ionen
RFQ
Darmstadt ...
Wideroe
Darmstadt ...
Alvarez
Los Alamos, CERN
stehende Wellen
Side coupled cavities
Los Alamos

Kreisbeschleuniger

Betatron †		gepulst , e
Mikrotron		CW , e
klassisches Zyklotron †		CW , Ionen
Isochron-zyklotron	H-Magnet oder separate Sektoren	CW , Ionen
Synchro-zyklotron † (+FFAG)		gepulst , Ionen
Synchrotron	Fokussierung schwach † oder stark	gepulst , e, Ionen

Speicherringe

$e^- - e^-$	Pionieranlagen Stanford, Frascati, Orsay
$e^+ - e^-$	LEP-CERN † 2 x 110 GeV PEP II, KEK 3.5/8.0 GeV
p - p	ISR-CERN † 2 x 30 GeV LHC-CERN 2 x 7 TeV
p – p*	SPS-CERN † 2 x 315 GeV
$p - e^-$	HERA Hamburg 820 GeV, 26 GeV

Verfügbare Energie im Schwerpunktsystem:

$$E(cm) = 2E \quad oder \quad 2\sqrt{E_1 E_2}, \quad statt \quad \sqrt{2m_2c^2}\sqrt{E_1}$$

Beschleuniger Revolutionen

1928 Wideroe, **Hochfrequenzfelder**, Linearbeschleuniger, Betatronprinzip

1931 Lawrence, **Zyklotron** („aristokratische“ Phasen!)

1932 Cockroft und Walton, 400 kV DC, **1.Kernreaktion** mit Beschleunigern

1938 Thomas, **Isochron Zyklotron**, höhere Energien möglich

1944 Veksler, McMillan, **Phasenfokussierung** (franz. Revolution, „demokrat.“ Phasen)

=> Synchrotron und hohe Energien

1947 erste Beobachtung von **Synchrotron Strahlung**

1952 Courant, Snyder, Livingston, **starke Fokussierung** (alternating gradient)

=> kompakte Magnete

1961 **Speicherringe** (Wideroe-Patent 1943!, O‘Neill 1958, Frascati)

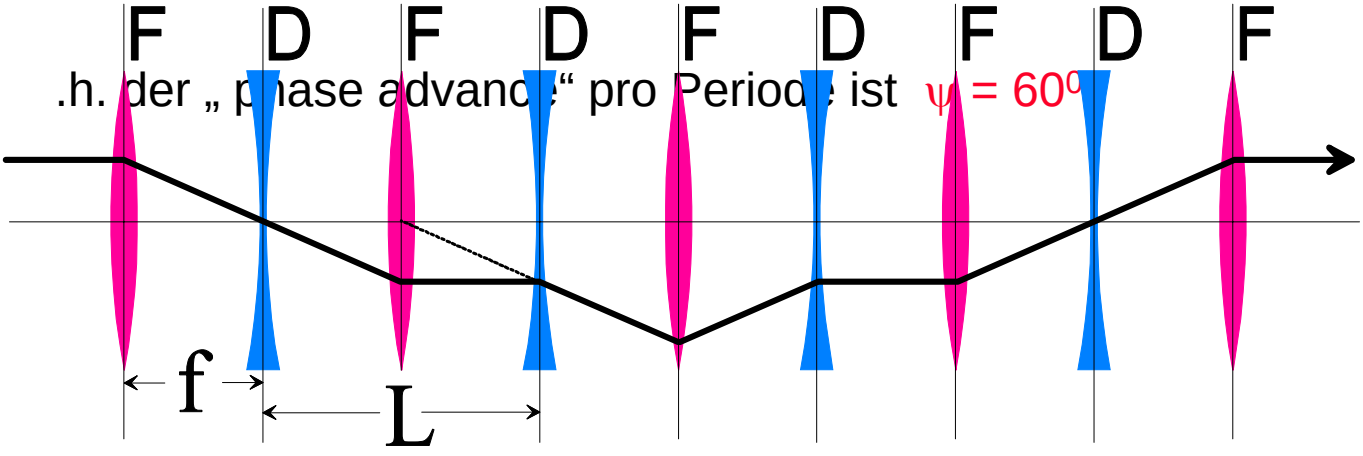
AG-Fokussierung

einfaches Beispiel von „Alternative Gradient“ Fokussierung:

=> FODO-lattice mit dünnen Linsen (Brennweite = ± f)

ür L = 2f => Konstruktion von Hand möglich !

s braucht 6 Perioden für eine volle 360^0-Oszillation



.h. der „ phase advance“ pro Period ist $\psi = 60^0$

die exakte Lösung mit Transfer Matrizen gibt:

$$\sin\frac{\psi}{2} = \frac{L}{4f}$$

für L = 2f => $\psi = 60^0$

Revolution 1952
AG-Fokussierung

Schwache Fokussierung

Extremes Beispiel:

10 GeV Proton-Synchrotron in Dubna, Russland

Kein Mut 1952 auf AG Fokussierung zu wechseln!

4 Monstermagnete, Querschnitt 8mx3m, 36‘000 Tonnen !

Vakuumkammer 2mx0.4m

1.Strahl 1957 (Weltrekord für 1 Jahr)

starke Fokussierung (AG)

25 GeV Proton-Synchrotron am CERN in Genf

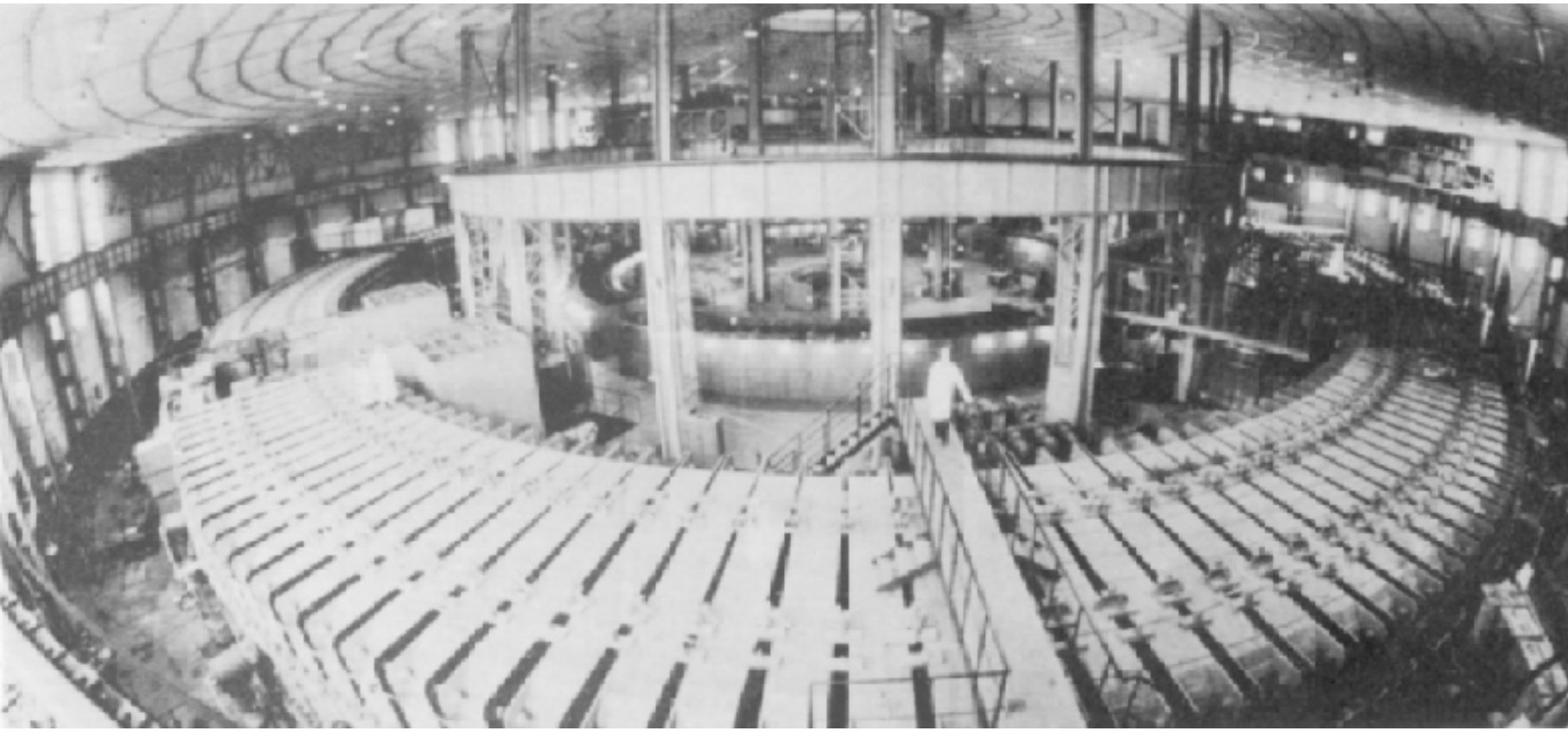
Mut zum Risiko

100 Magnete à 4.4m, Querschnitt 1mx1m, 3‘200 Tonnen

Vakuumkammer 150mmx70mm

1.Strahl 1958 (Weltrekord für 2 Jahre)

10 GeV Synchrotron in Dubna

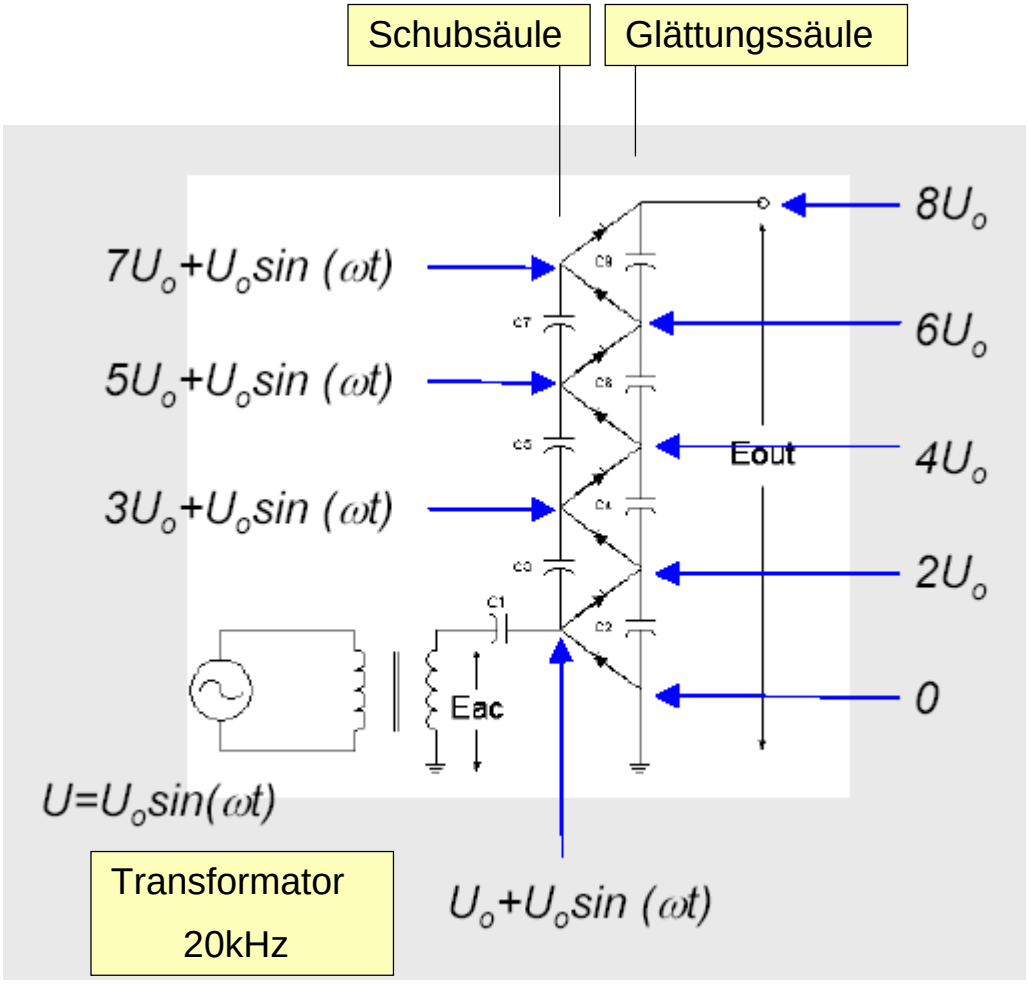


Cockcroft-Walton am PSI

810 kV + 60kV an Protonenquelle

I = 10 mA (max. = 20 mA)

Kaskaden Generator
(Greinacher-schaltung)



Gleicher Trick wie bei

Archimedes Spirale !

Cockcroft-Walton DC Beschleuniger 1932

In Luft ca. 1 MV, im Drucktank ca. 4 MV

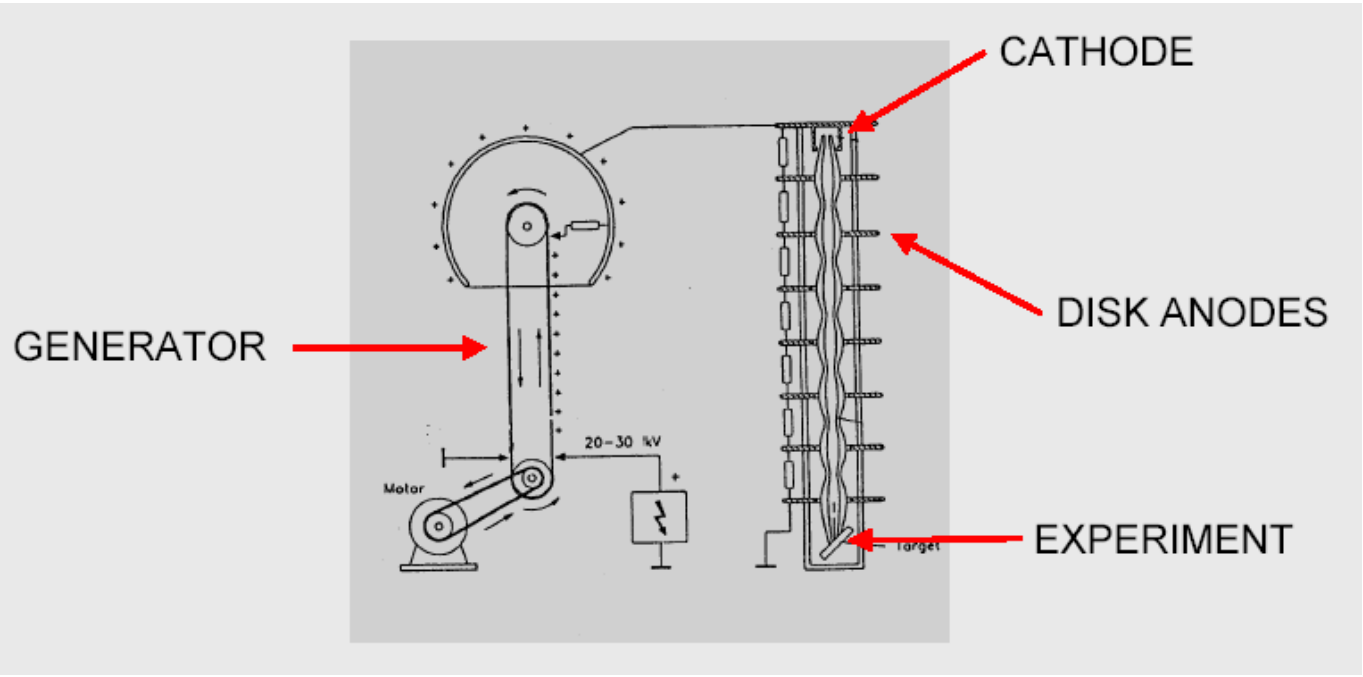
Tesla Transformer

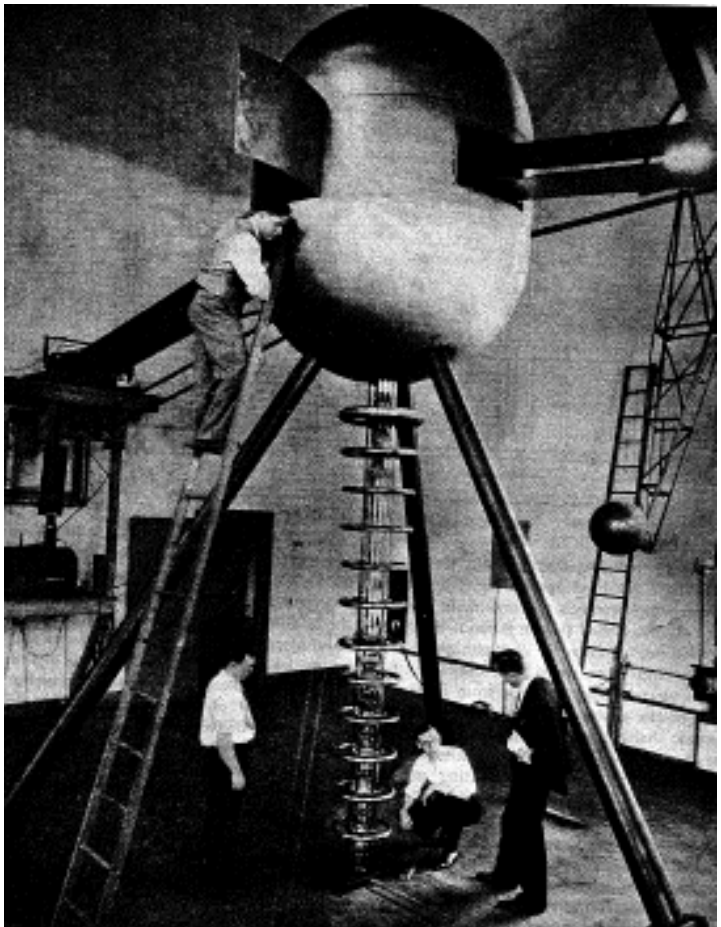
lightning on demand, G.E.Leigh, SanFrancisco www.lod.org

22 kV, 5.5 A, 130 kW

„ Der Zuschauer wird in der rohen Gewalt der Natur gebadet!“

Van de Graaff Beschleuniger



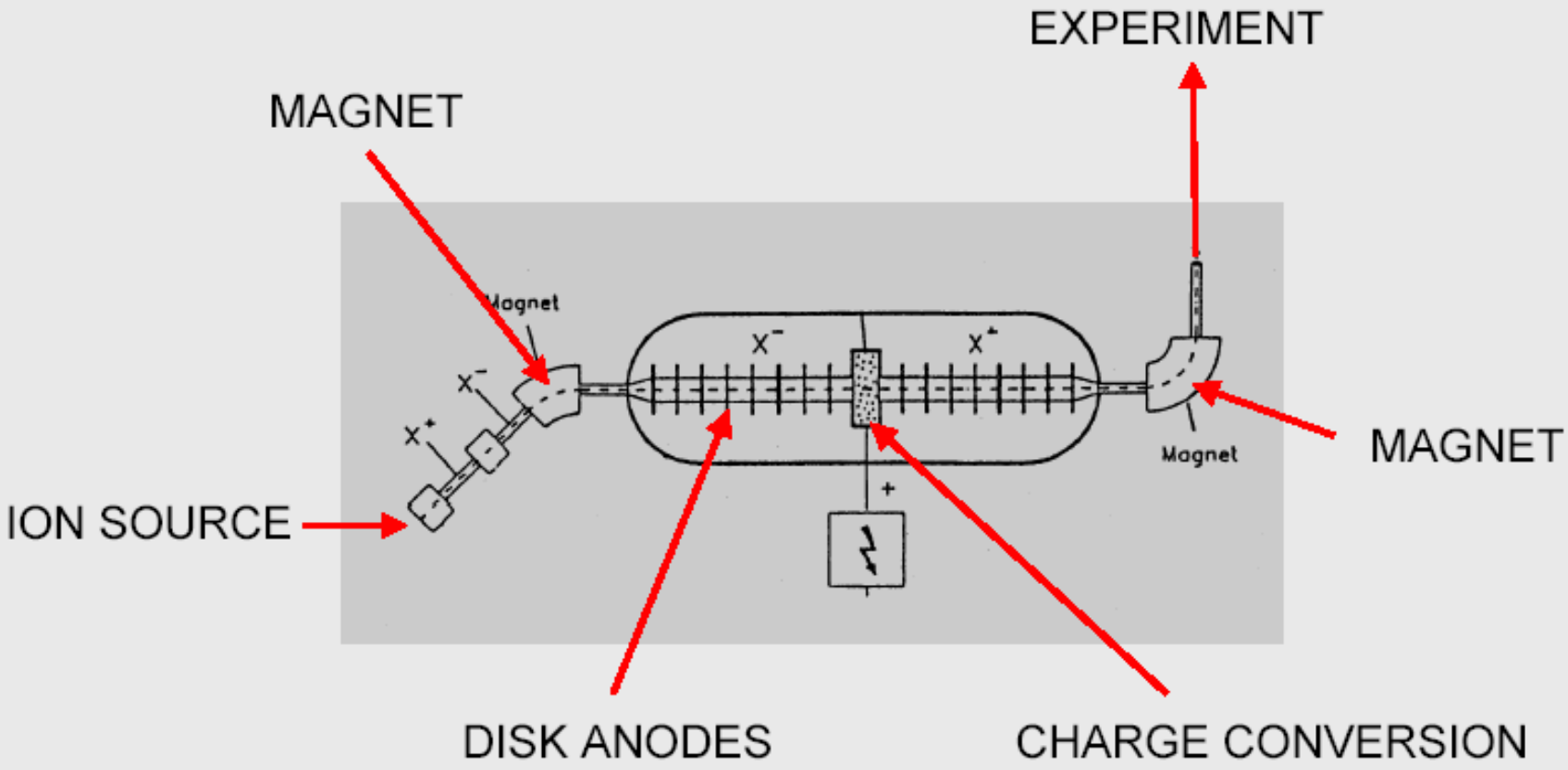


Washington

1933

1.2 MV

TANDEM ACCELERATOR
CONCEPTUAL LAYOUT



Tandem Beschleuniger

Weizmann Institut, Israel

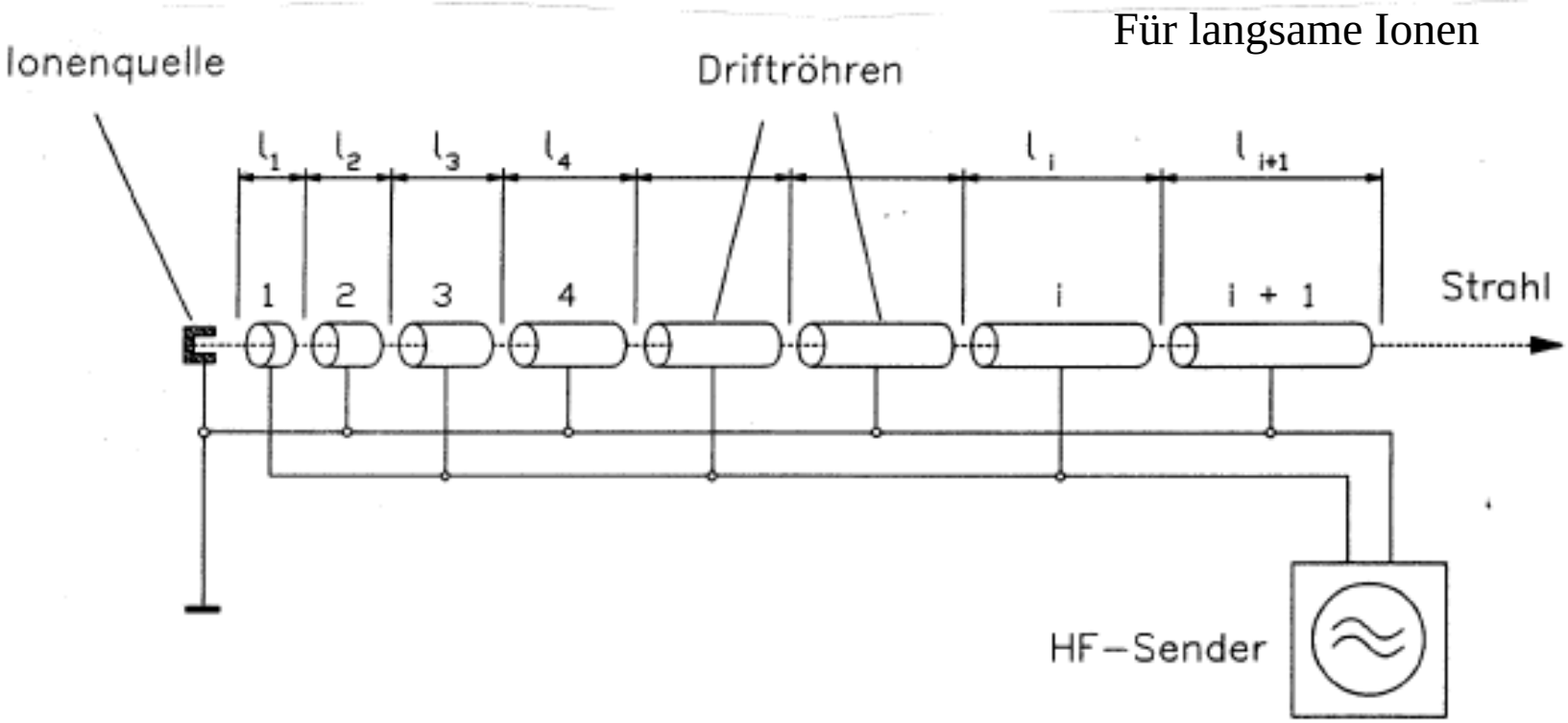
PELLETRON TANDEM

at Oakridge NL

E=25.5 MeV

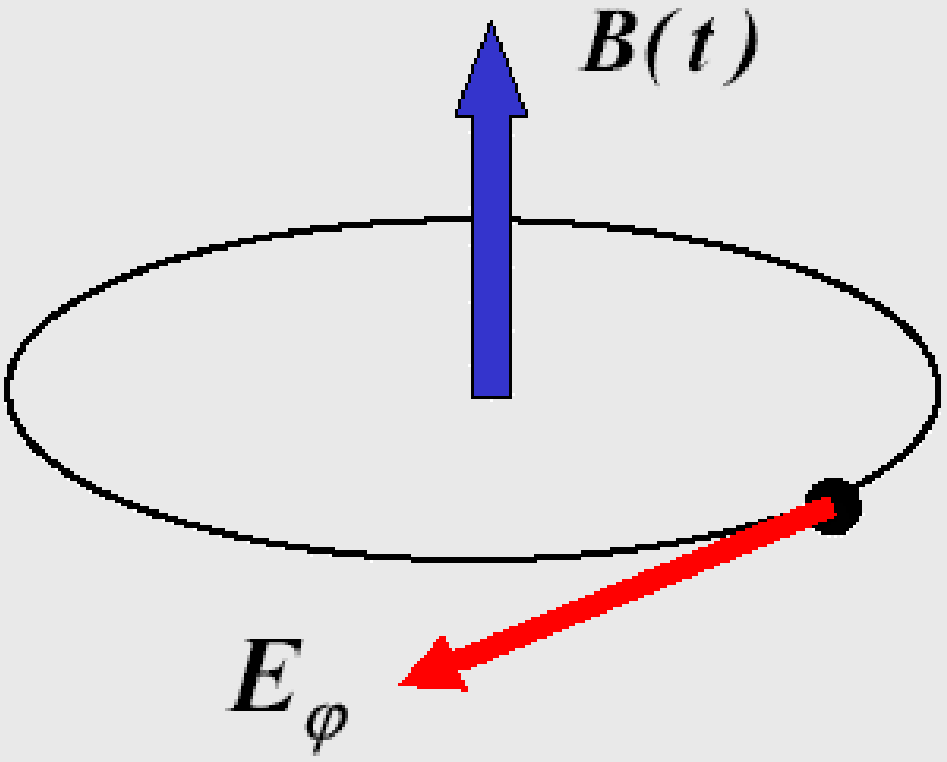
Wideroe-Linac 1928

Für langsame Ionen



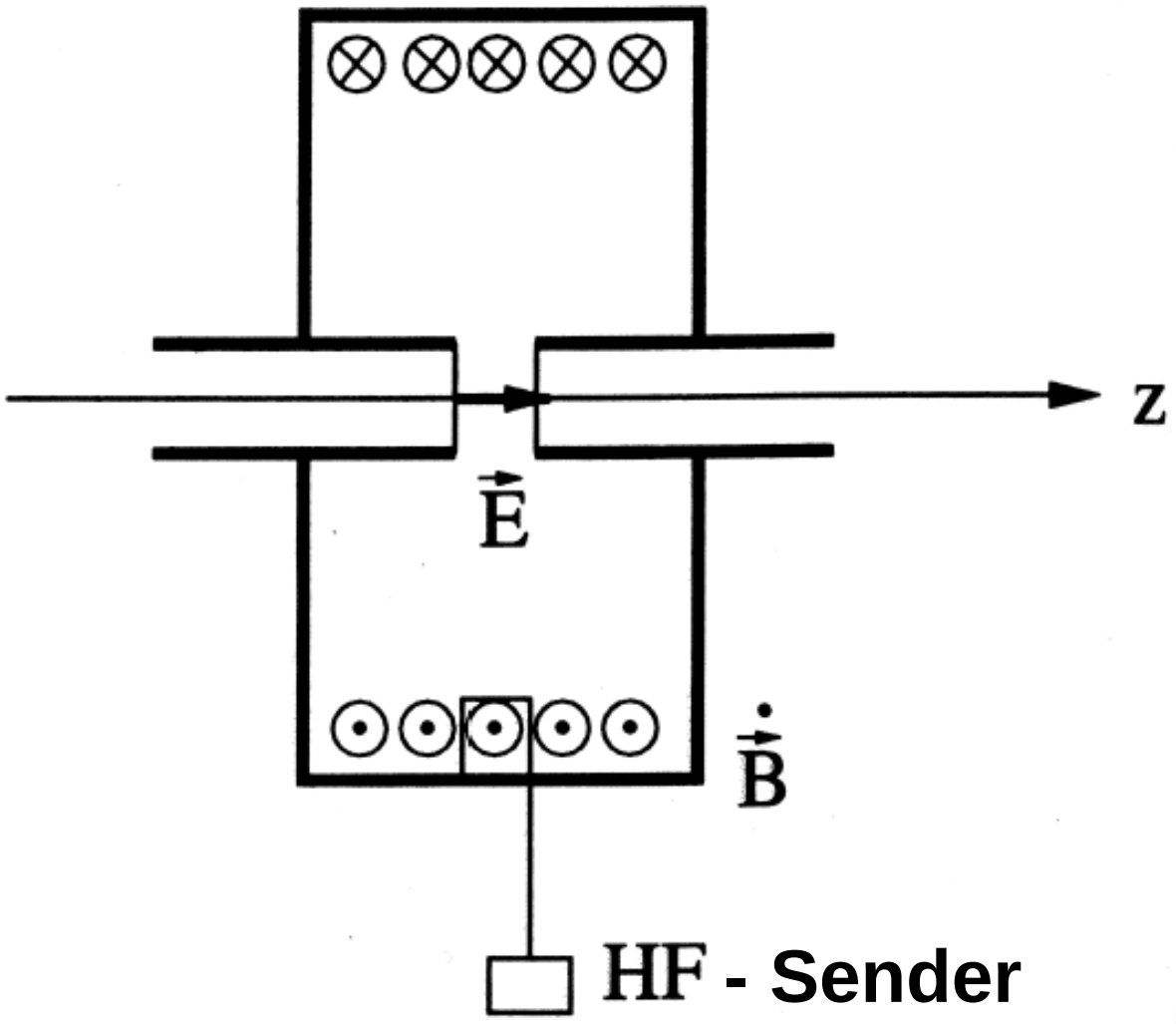
Trick: wie beim Wettrennen
zwischen Hase und Igel !

Induktionsgesetz von Faraday



$$\oint \vec{E} d\vec{r} = -\frac{d}{dt} \iint_A \vec{B} d\vec{a}$$

HF Kavität



Maxwell:

$$rot\ \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Das Magnetfeld sorgt für die Beschleunigung ! (Wideroe)

HF-Resonator

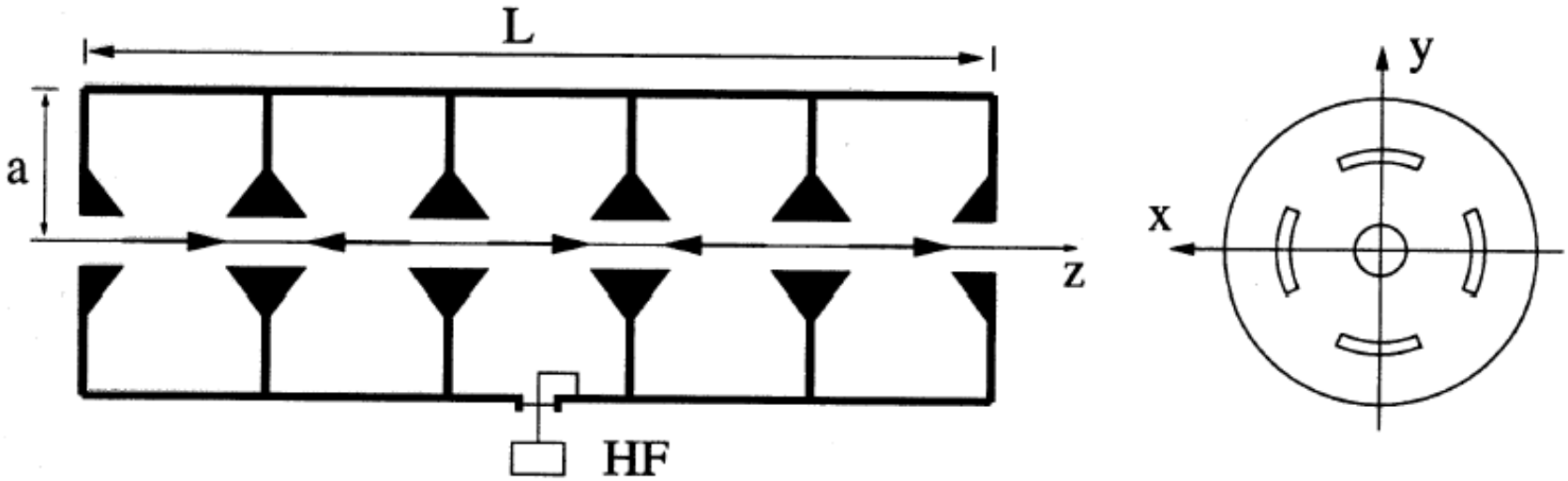
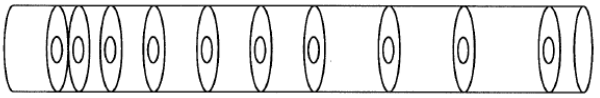


Abb. 3.17. Schema eines fünfzelligen Resonators mit seitlichen Koppelschlitzen. Der Resonator wird im π-Mode betrieben. Mit $a = 0,21$ m und $L = 1,5$ m liegt die Resonanzfrequenz bei 500 MHz

Hochfrequenzwellen in Linacs

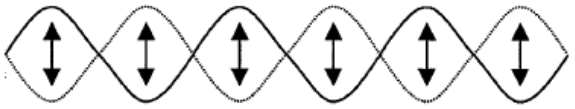
Wanderwelle

Iris-struktur



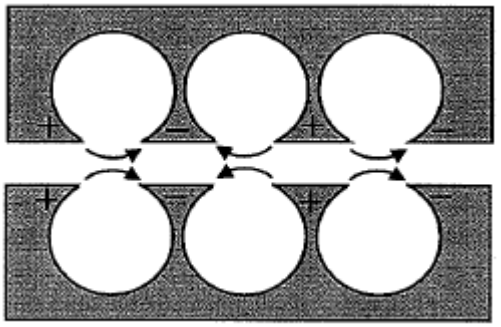
Elektronen, v≈c

stehende Welle



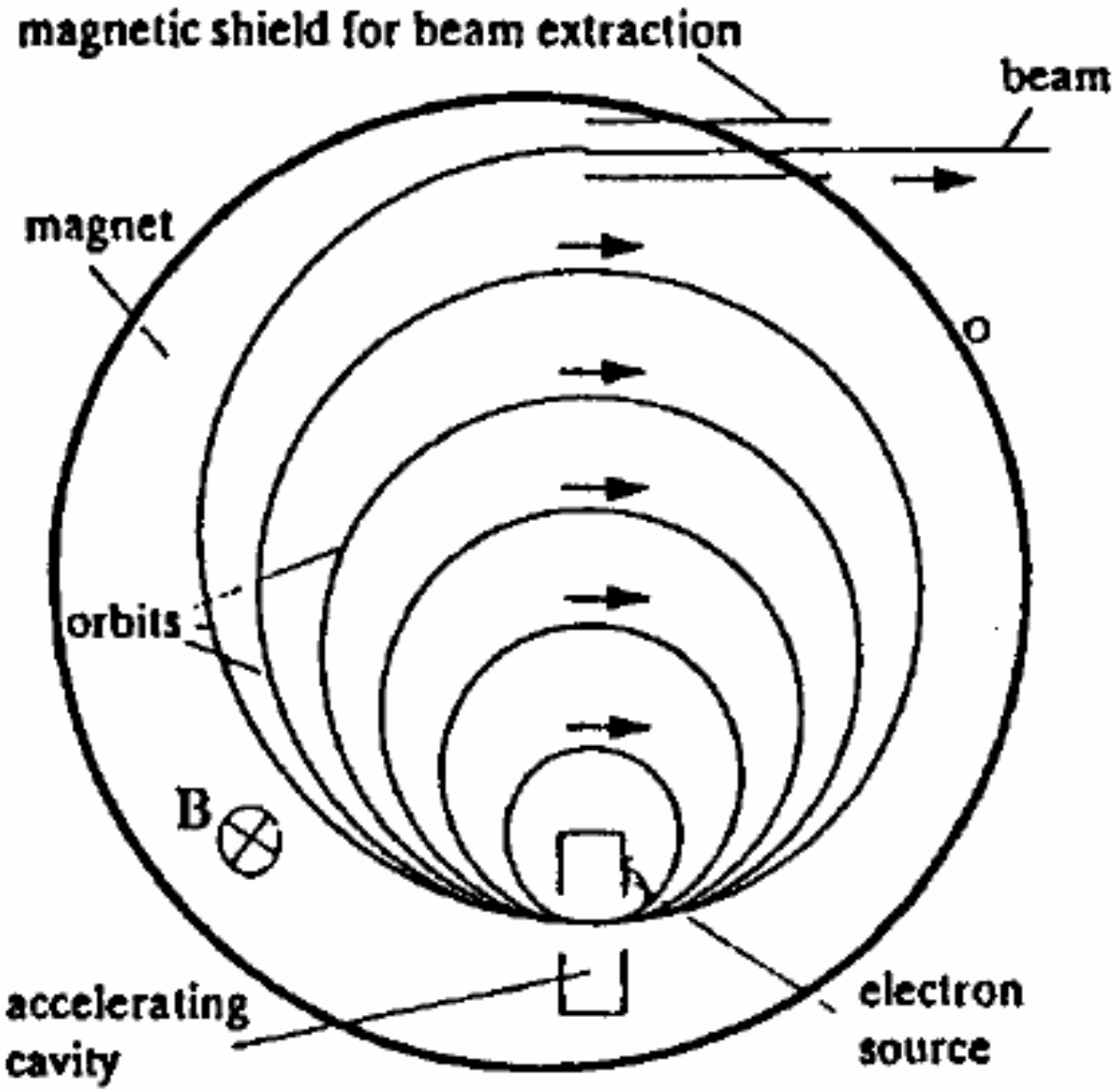
Gekoppelte Kavitäten,

Drift Röhren, etc.

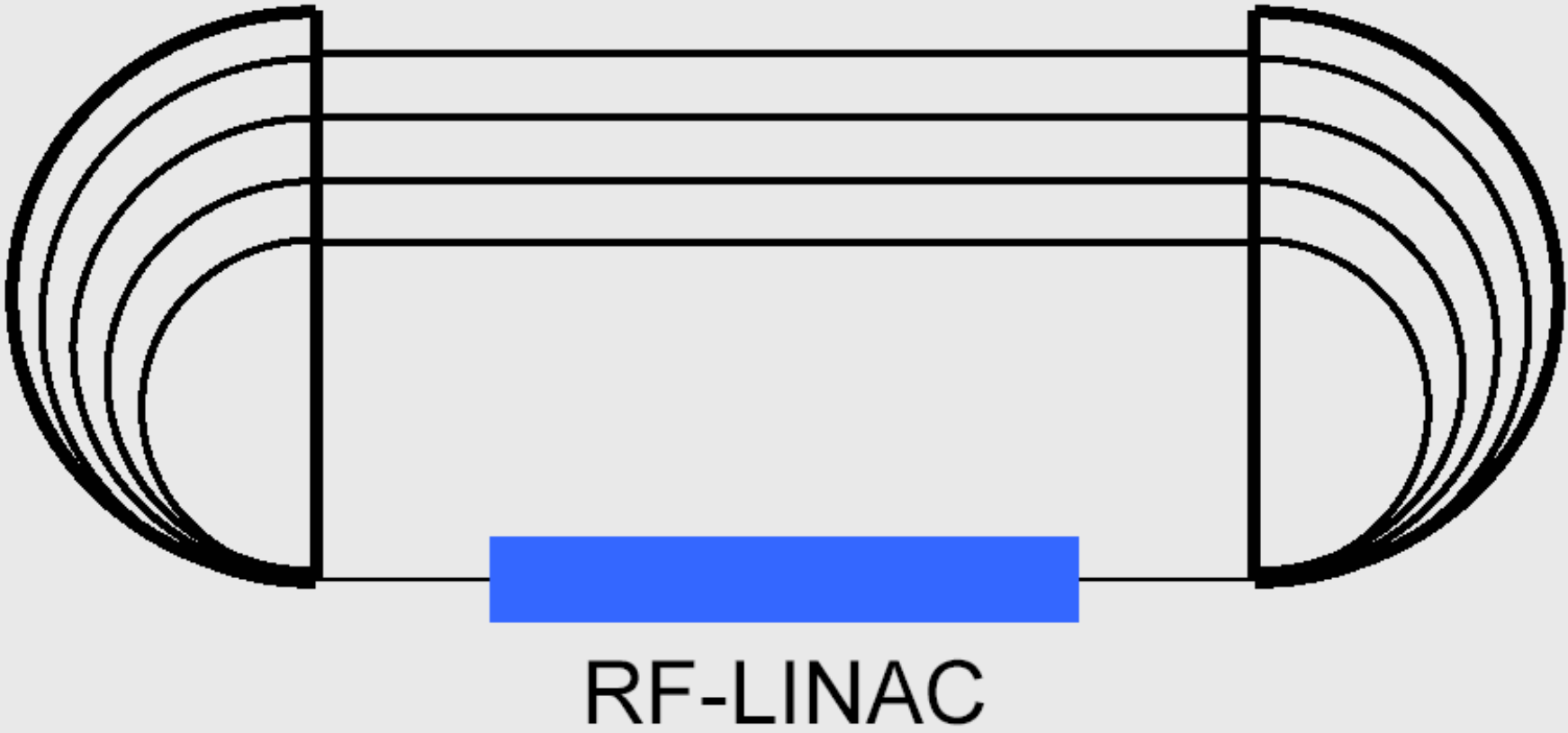


Ionen

Mikrotron

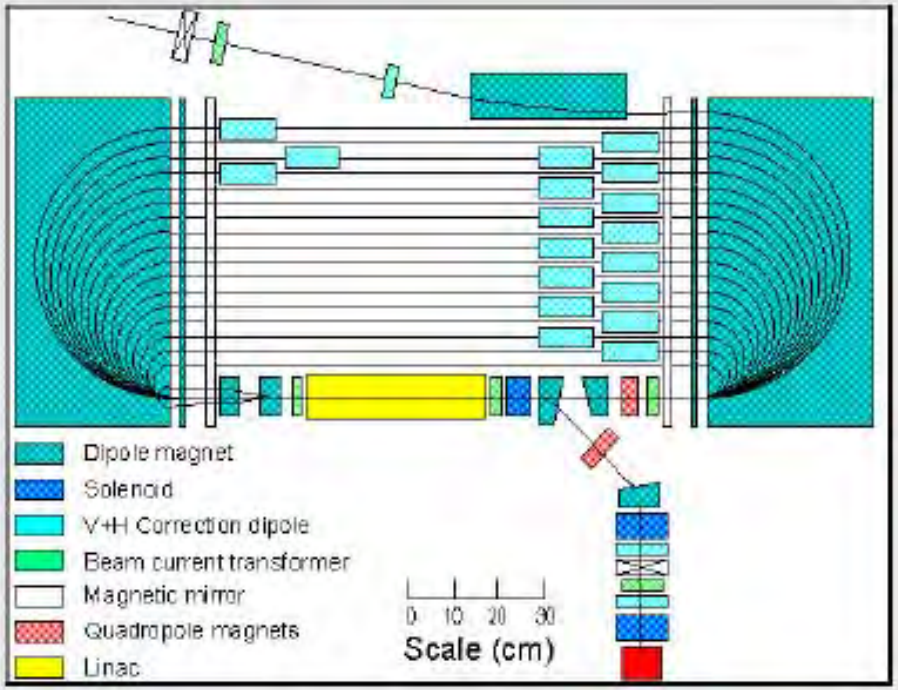

magnetic shield for beam extraction
beam
magnet
orbits
B
accelerating cavity
electron source

Racetrack Mikrotron



ASTRID Microtron
Lund, Sweden

Maximum energy	100 MeV
Number of turns	19
Energy gain/turn	5.3 MeV
Pulse current	10 mA
RF frequency	2.9986 GHz
Pulse width	1 μs
Max rep freq	10 Hz
Energy spread	0.1 MeV
Emittance	0.1 μm
Dipole field	1.13 T



Kreisbeschleuniger

	Magnetfeld		Bahn Radius	Frequenz RF-system	Teilchen	Strahl
	zeitlich	radial				
Betatron	zunehmend	abnehmend	konstant	---	e	gepulst
Mikrotron	konstant	konstant	zunehmend	konstant	e	cw
klassisches Zyklotron	konstant	abnehmend	zunehmend	konstant	p, Ionen	cw
Isochron Zyklotron	konstant	zunehmend	zunehmend	konstant	p, Ionen	cw
Synchro-Zyklotron	konstant	abnehmend	zunehmend	abnehmend	p, Ionen	gepulst
klassisches Synchrotron	zunehmend	abnehmend	konstant	zunehmend	e, p, Ionen	gepulst
AG-Synchrotron	zunehmend	alternierend oder Quads	konstant	zunehmend	e, p, Ionen	gepulst
Speicher Ring	konstant	alternierend oder Quads	konstant	konstant	e, p, Ionen	cw

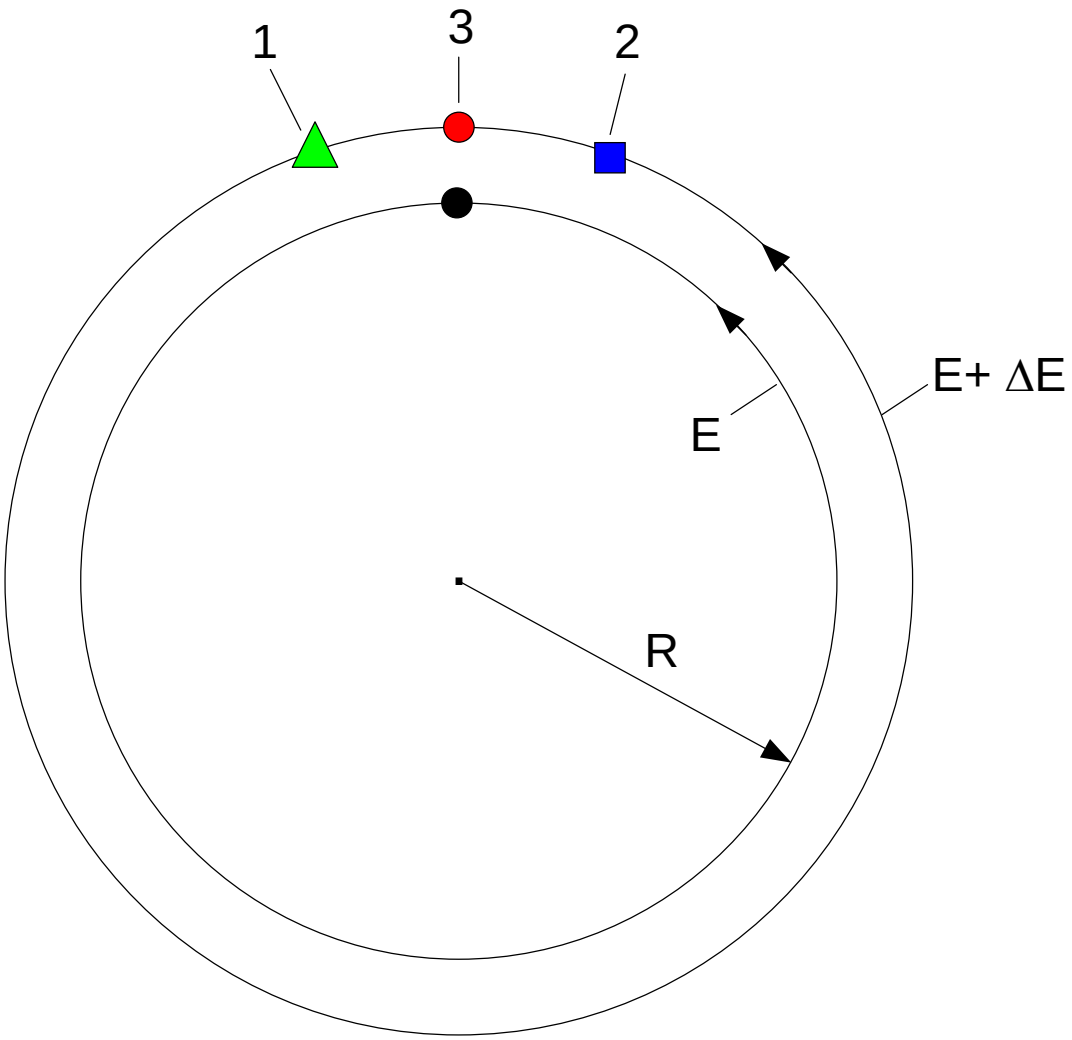
cw = “continuous wave”, kontinuierlicher Strahl,

Zeitstruktur ist gegeben durch Hochfrequenz

gepulster Strahl: analog zu Lift => ermöglicht hohe Energien

cw Strahl: analog zu Rolltreppe => ermöglicht hohe Intensitäten

Phasenstabilität (1945)



Umlaufsfrequenz $\omega = \frac{\nu}{R}, \quad \frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{\Delta\nu}{\nu} - \frac{\Delta R}{R} = (\frac{1}{\gamma^2} - \frac{1}{\gamma_T^2})$

- 1 unterhalb „transition“, tiefe Energien, Δv dominiert
- 2 oberhalb „transition“, hohe Energien, ΔR dominiert
- 3 isochron, Kompensation von Δv und ΔR