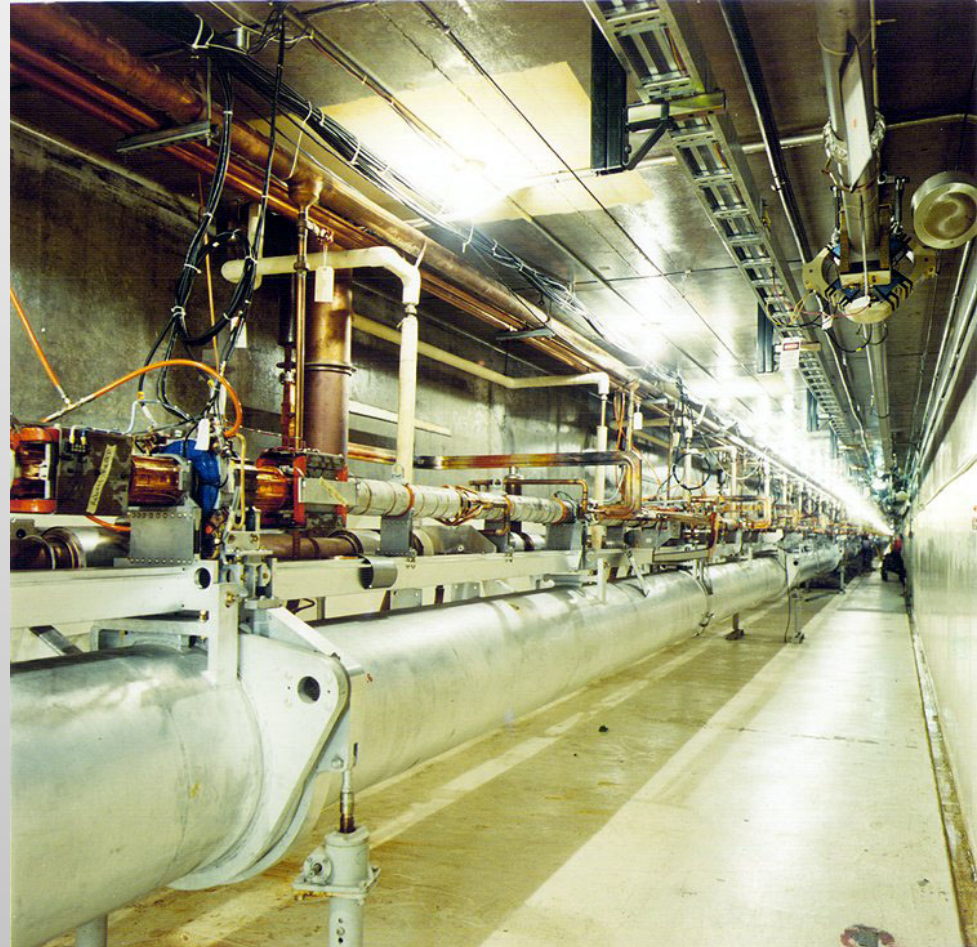




Kapitel 06

Linearbeschleuniger



ACC_01

PEP-II Accelerator at Slac

8-19-97



6.1 Elektronen-LINAC

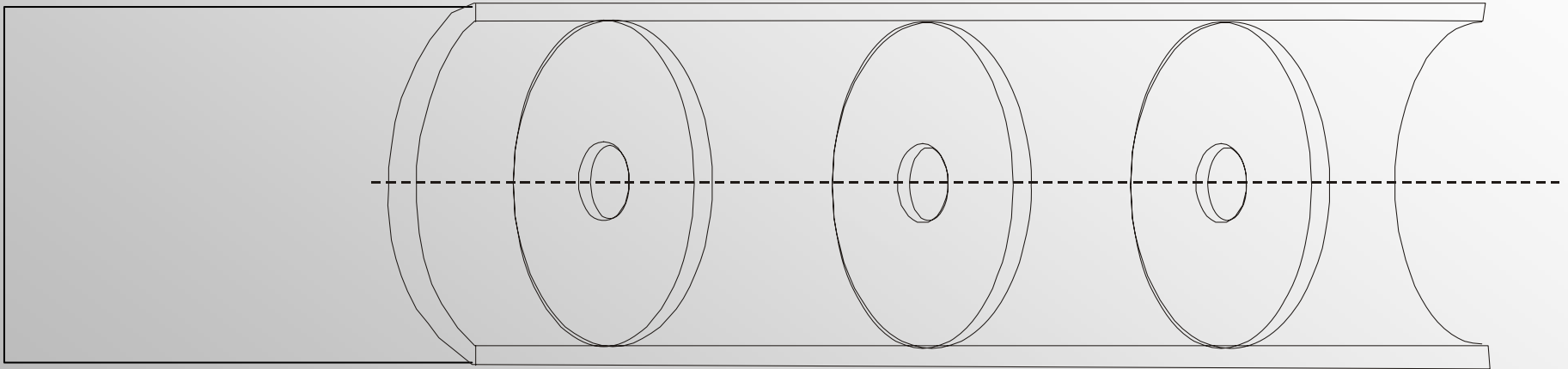
- LINAC mit kontinuierlicher Beschleunigung
 - Wanderwellen Linac – Teilchen „sieht“ immer Beschleunigungsfeld.
- Nur für Elektronen
 - Teilchen laufen mit der Welle mit
 - Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle muss gleich Teilchengeschwindigkeit sein.
 - Elektronen erreichen sehr schnell $v=c$.
- Spezielle Beschleunigerstruktur um Phasengeschwindigkeit der Welle zu kontrollieren
 - Runzelröhre „Iris-loaded wave guide“



Elektronenlinac

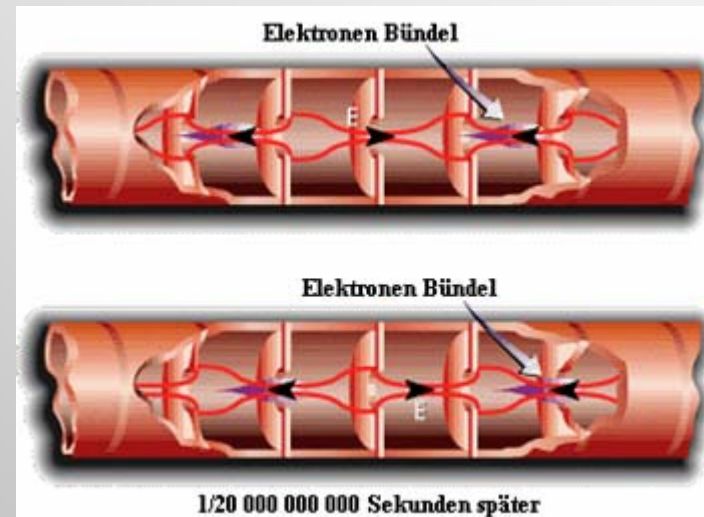
- 2 grundsätzliche Bedingungen
 - Das elektrische Feld muss eine **axiale Komponente** in die Fortpflanzungsrichtung (z) der Welle haben
 - E_z muss immer das **gleiche Vorzeichen** wie das **beschleunigte Teilchen** haben
- **erste Bedingung** impliziert, dass nur TM-Wellen für Teilchenbeschleuniger geeignet sind TM₀₁₀:
 - Longitudinales E-Feld, maximal im Zentrum null an Wand
 - Azimuthales B-Feld, null im Zentrum, maximal an Wand
- **zweite Bedingung** besagt, dass die **Phasengeschwindigkeit der Welle** und die **Geschwindigkeit des Teilchens ungefähr gleich** (nicht streng im mathematischen Sinne) sein sollten $v_p \approx v_T$

iris-loaded waveguide



- Teilchenenergie gegeben durch

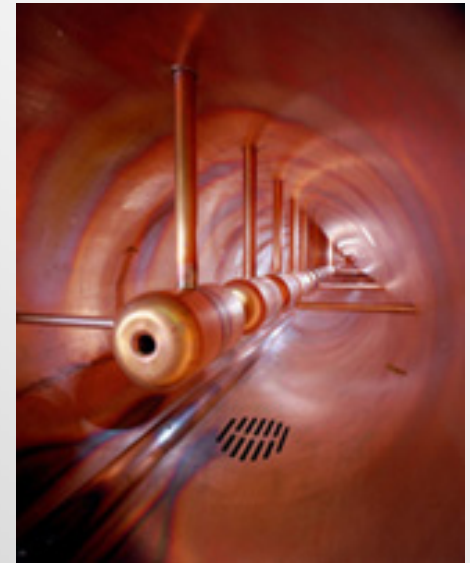
$$W = e \int_0^l E_{z0}(z) \sin \varphi(z) dz$$





Technische Konstruktion eines Elektronen LINACs

- **Injektor-System**
- **HF-System**
- **diverse Zusatzsysteme:**
 - Magnet zur Fokussierung
 - Vakuumpumpen
 - Kühlung
 - Abschirmung
- Alle heute gebauten LINACs sind für den **Pulsbetrieb** ausgerichtet.





Technische Konstruktion

■ Injektor-System:

- Elektronenstrahl gut kollimiert
- Energieverteilung sollte möglichst homogen
- Bestandteile: Beschleuniger (oft ein elektrostatischer Beschleuniger, z. B. ein **Van de Graaff Beschleuniger**), einer Elektronenquelle und einem evakuierten Rohr, über das der Strahl, durch Magnete fokussiert und abgelenkt, zum LINAC geführt wird.

■ HF-System:

- verschiedenen Segmente (unterschiedliche Phasengeschwindigkeit) des LINACs werden von **einer einzigen HF-Quelle gespeist**. Bei jedem Segment wird die Phase des **Signals angepasst** (damit die Phase für das synchrone Elektron in jedem Abschnitt dieselbe ist) und das Signal anschließend über ein **Klystron** verstärkt.
- Typische HF: 3 GHz



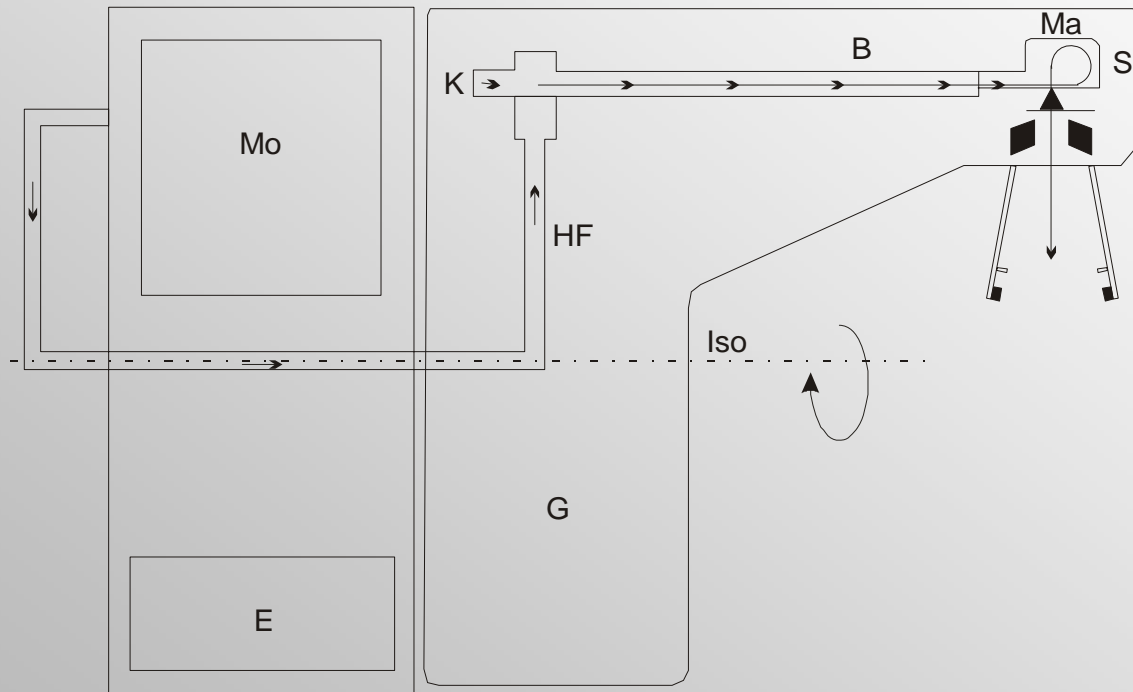
Technische Probleme

- Wellenleiterkonstruktion genau und präzise
- Fluktuationen der Energie des Beschleunigerstrahls werden durch **Fluktuationen in der HF-Leistung** oder in der **Frequenz** ausgelöst.
- Änderungen im Wellenleiter durch **Temperaturänderungen** während des Betriebs
- **Fehler beim Bau** die zu Änderungen der Phasenlage in verschiedenen Segmenten führen beeinflussen direkt die Endenergie:

$$W = e \int_0^l E_{z0}(z) \sin \varphi(z) dz$$

- → Änderung von W ↔ φ

Der Elektronen LINAC in der Medizin



- Prinzipieller Aufbau von einem Elektronenlinearbeschleuniger in der Medizin.
- Mo Modulator, E Energieversorgung, HF Hochfrequenz, K Elektronenkanone, B Beschleunigungsrohr, Ma Umlenkmagnet, S Strahlerkopf, Iso Isozentrumsachse (Drehachse der Bestrahlungsanlage), G Gantry (Beschleunigerarm)

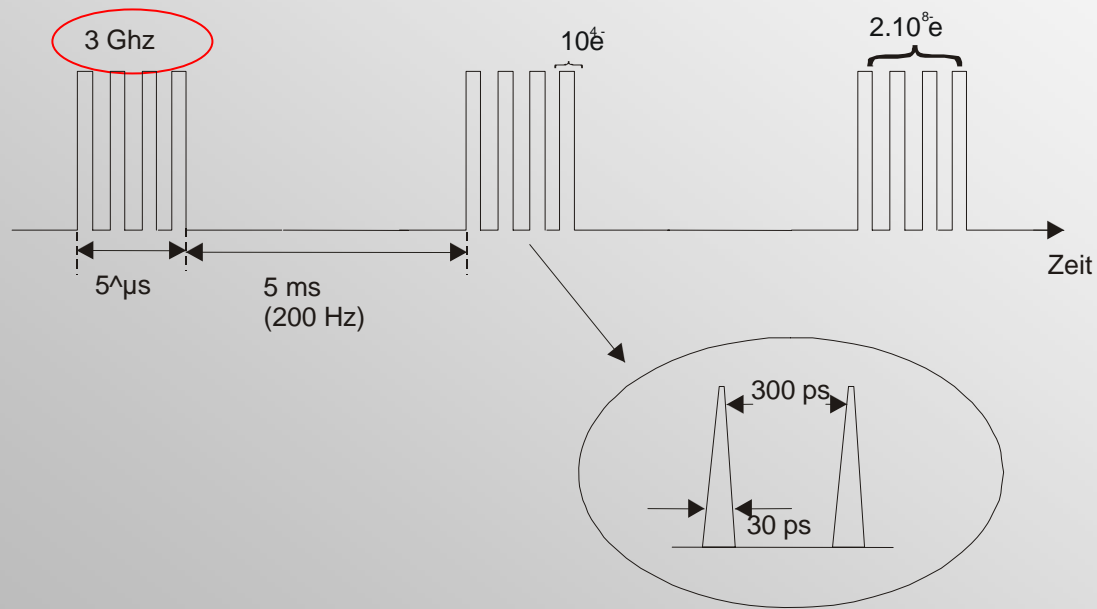


Basisdaten für medizinische Beschleuniger

- Elektronenbeschleunigung auf kinetische Energien zwischen 4 – 25 MeV
- → Wo-Target → Photonen
- Medizinische Linacs werden nach ihren Frequenzbändern eingeteilt in:
 - L-Band (1 GHz)
 - S-Band (~ 3 GHz) → Kompromiss zwischen benötigter Energie und räumlichen Dimensionen



Typische Impulsfolge von medizinischen Elektronenlinearbeschleuniger



Makropulse und Mikroimpulse



Makropulse und Mikroimpulse

- Makropulse (Dauer $5 \mu\text{s}$) setzen sich aus etwa 2×10^4 Mikroimpulsen zusammen (Dauer je 30 ps), die im zeitlichen Abstand von 300 ps (entsprechend der Frequenz von 3 GHz) aufeinander folgen.
- Mikroimpulse sind kürzer als eine halbe Schwingungsdauer der GHz-Schwingung, da Elektronen wegen der Phasenfokussierung nur während eines schmalen Zeitintervalls unmittelbar nach dem Wellenmaximum beschleunigt werden.

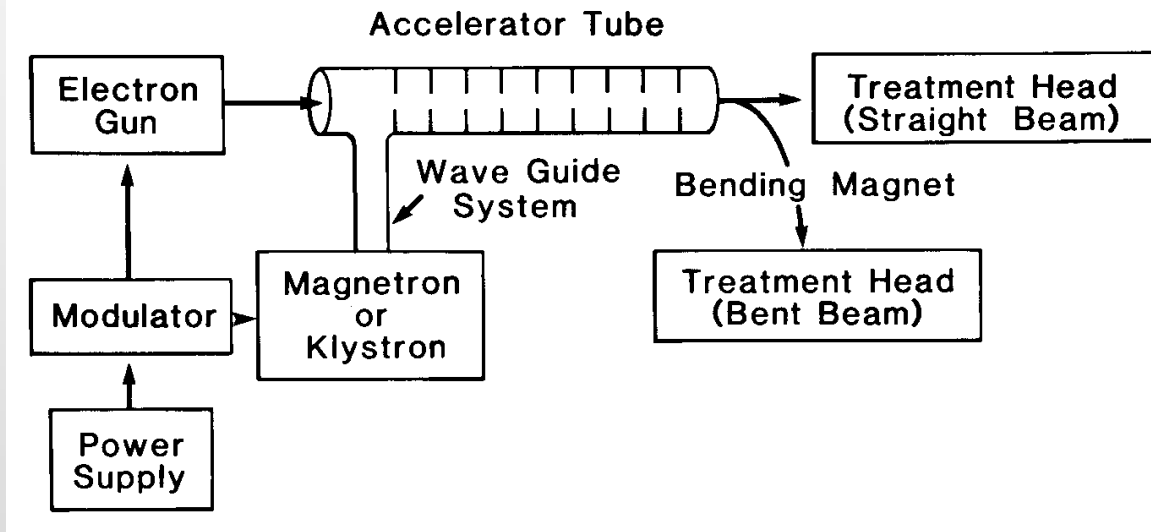


Zahl der Elektronen & Pulsfrequenz

- Jeder Mikropuls enthält ca. 10^4 , ein Makropuls also 2×10^8 Elektronen
- Die Pulsfrequenz der Makropulse beträgt typischerweise 200 Hz (100 – 400 Hz)
- Pulsbreite und Pausenzeit sind nicht maßstäblich gezeichnet, die angegebenen Elektronenzahlen pro Puls sind typische Werte eines Beschleunigers im Elektronenbetrieb



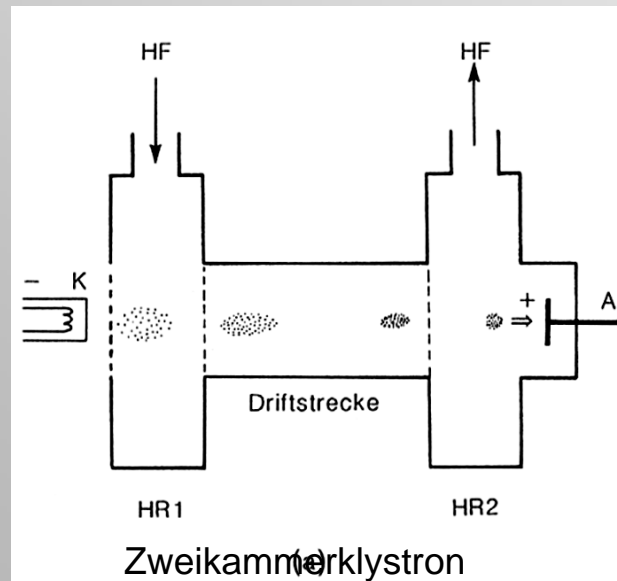
Bauteile Med-LINAC



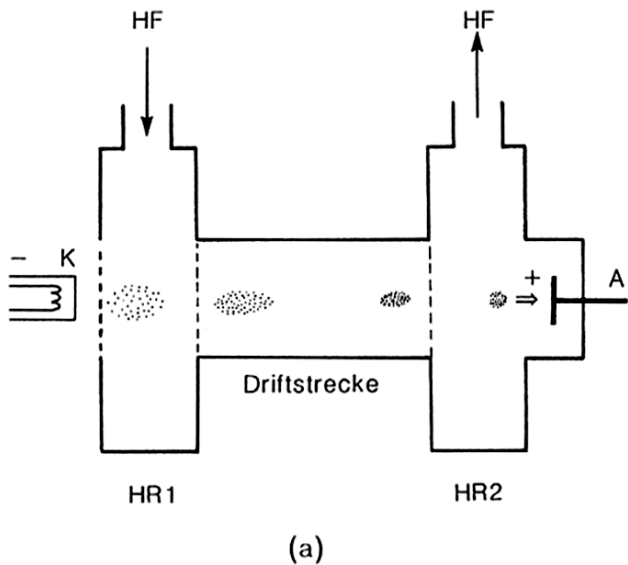
- Modulator mit Quelle zur Hochfrequenzerzeugung, sowie Steuerelektronik und elektrische Versorgung
- Hochfrequenz wird über ein Hohlwellenleitersystem von der Hochfrequenzquelle in das Beschleunigungsrohr (Gantrykopf) transportiert
- Beschleunigungseinheit:
 - Elektronenquelle („gun“)
 - Beschleunigungsrohr
 - Kühlung, Vakuumpumpen, ...
- Strahlerkopf → Strahlführungssystem (geschirmt Pb, Wo; kg!)

Hochfrequenzquelle

- Verwendete Hochfrequenz: Mikrowelle im Radarbereich: 3 GHz
- Erzeugt in **Klystrons oder Magnetrons** (beides Spezialausführungen von Laufzeitröhren, in denen die Laufzeit der Elektronen durch die Röhre bestimmt wird)



Zweikammerklystron



- Zwischen Kathode und Anode: **2 Resonanzräume**
 - seitliche Einspeisung der Hochfrequenzschwingung in der Nähe der Kathode (zusätzliche Beschleunigung) führt zu **Geschwindigkeitsmodulation der Elektronen**.
 - Aufgrund der Driftstrecke zum 2. Resonanzräumen bilden sich **Elektronenpakete** aus („**dichtemoduliert**“)
 - aus Elektronengleichstrom somit **ein mit Hochfrequenz gepulster Strom**
 - in 2. Resonanzkammer wird dem HF Strom (Elektronenbündel) die Energie entzogen .

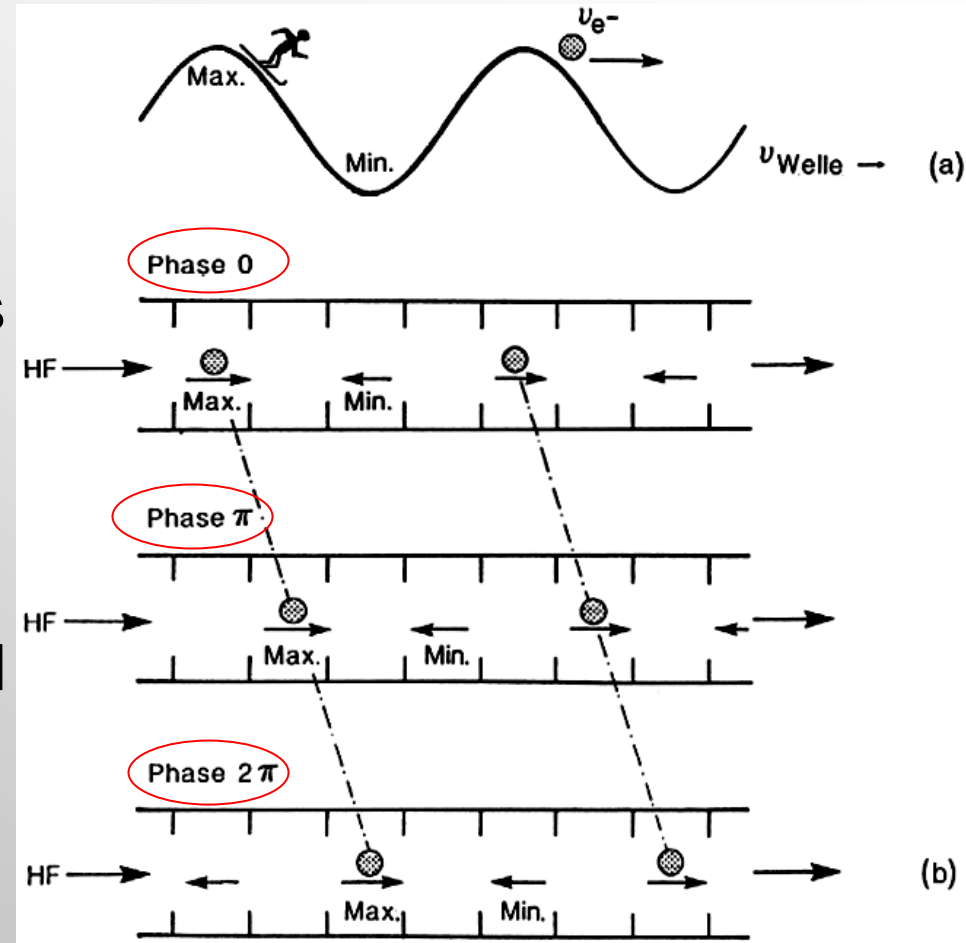


Beschleunigungseinheit: Elektronenkanone (gun)

- **Thermische Elektronenquelle** (Glühkathode, meist Wolfram)
- Ausbildung einer **Elektronenwolke** vor Glühwendel
- **Anlegen einer Spannung** zw. Kathode und Lochanode
- Eventuell Zwischenelektroden zur Strahlfokussierung
- **LINAC-Betrieb = Impulsbetrieb** ($\nu = 100\text{-}400\text{ Hz}$), auch für Quelle.

Wanderwellenprinzip = travelling wave

- Metallischer, die Hochfrequenz gut leitender Hohlzylinder (ca. 1 – 2,5 m Länge), innen Loch-Blendensystem, welches das gesamte Rohr in 5-10 cm große Resonanzräume teilt
- Hochfrequente elomag. Schwingung wird am Ende des Rohres eingespeist und breitet sich als longitudinale Welle entlang des Rohres mit einer Geschwindigkeit (Phasengeschwindigkeit) abhängig von der Blendenöffnung aus.

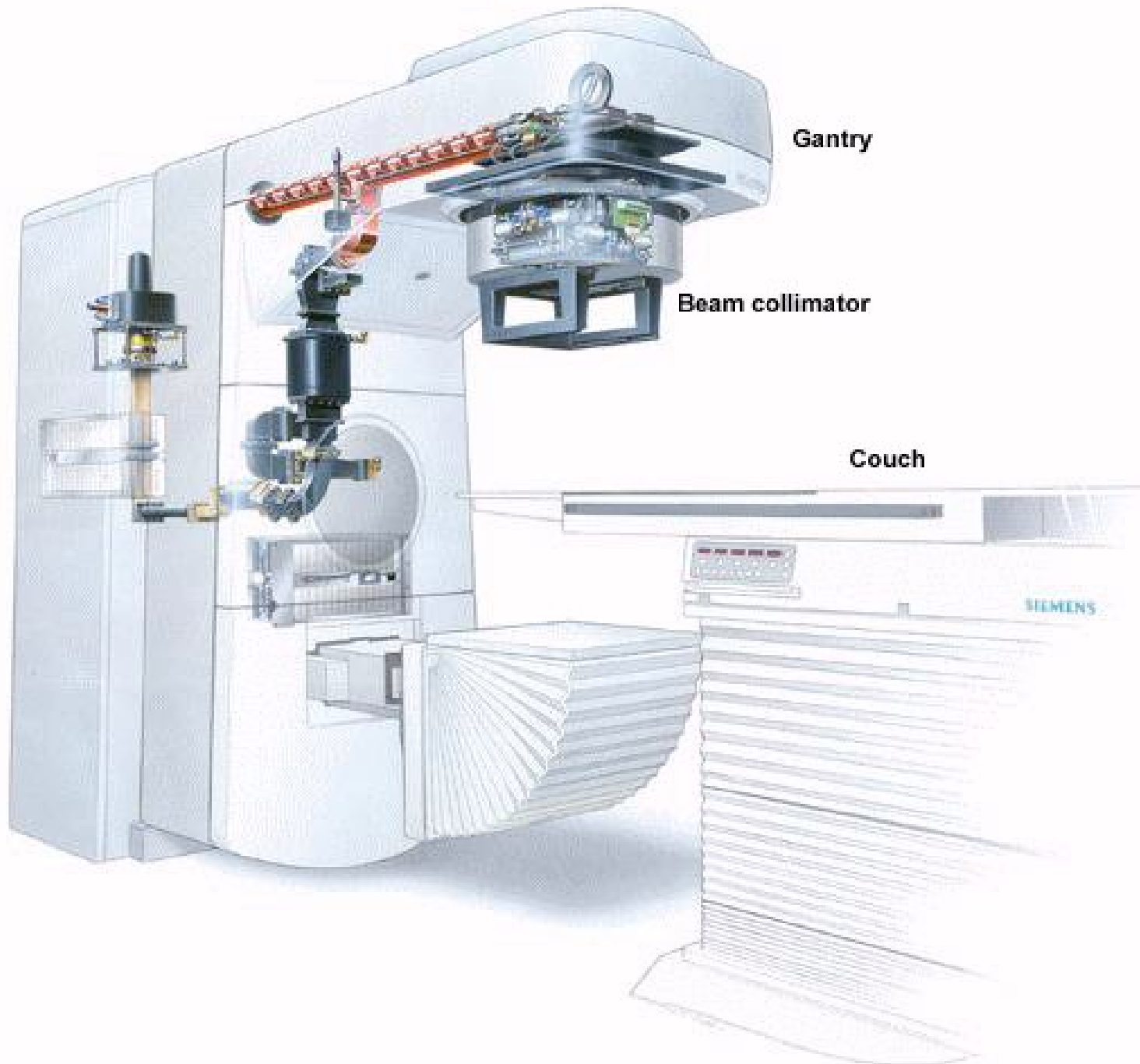


(a) Wellenreitermodell
 (b): Wellenbilder im Wanderwellenbeschleuniger
 (Die Pfeile stellen die Feldvektoren der longitudinalen elektrischen Feldkomponente dar, die Punkte gebündelte Elektronenpakete.)



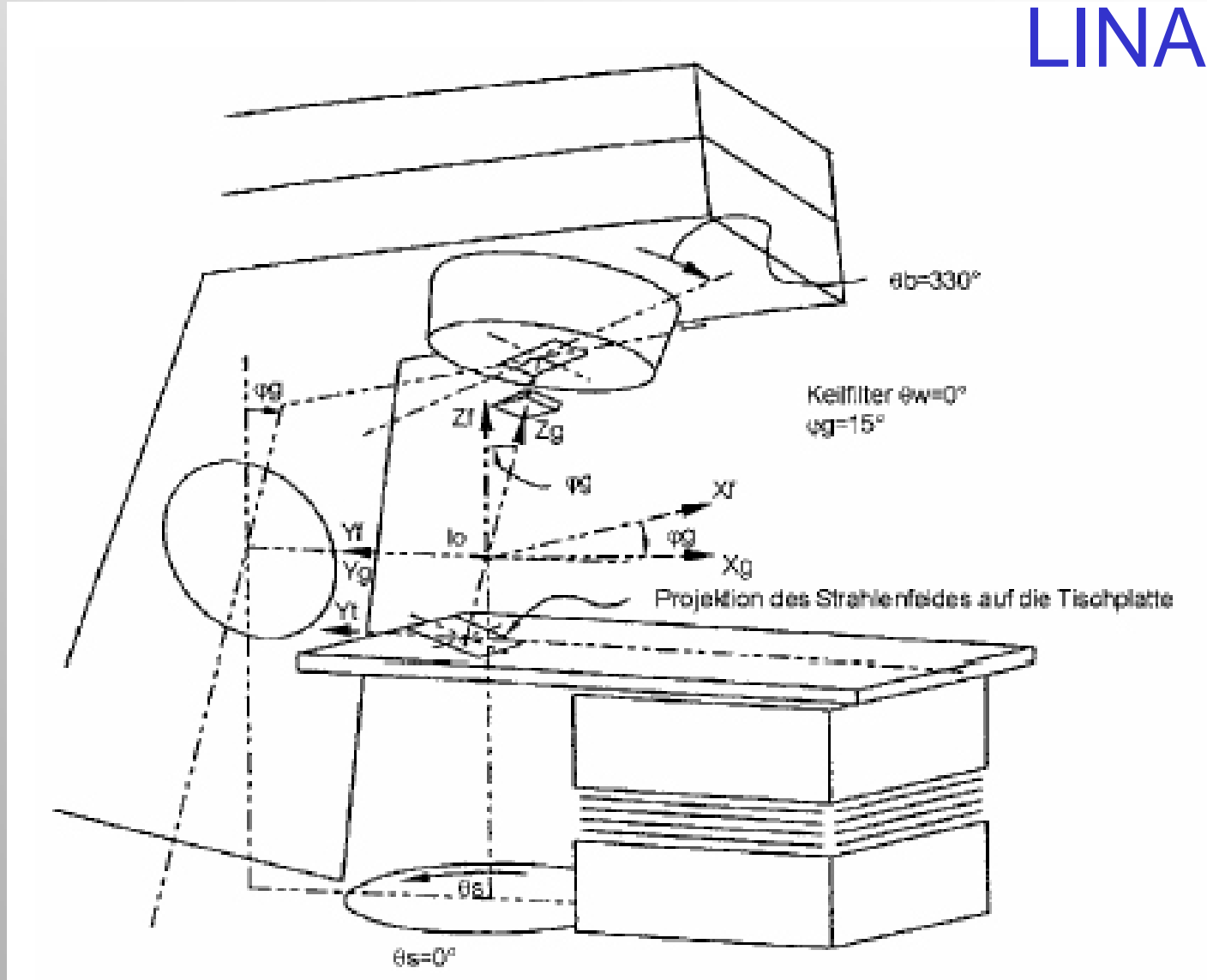
Phasenfokussierung

- Elektronen auf der Flanke (knapp vor dem Maximum) werden auf der ganzen Länge der Beschleunigungstrecke beschleunigt (laufen mit Hochfrequenzwelle mit) = siehe Wellenreiterprinzip
- „Vorlaufende“ Elektronen (mit zu früher Phase) erhalten geringe Beschleunigung und werden eingeholt und erfahren einen Geschwindigkeitszuwachs (wenn $v < c$)
- → Ausbildung von räumlich kompakten Elektronenpaketen, welche zahlreich auftreten, anschließend moduliert werden und somit einen kontinuierlichen Elektronenstrom bilden (ca. 3GHz)
- Dump oder Rückführung am Ende des Beschleunigungsrohres für Wanderwelle (Problem der Phasenkorrektur)

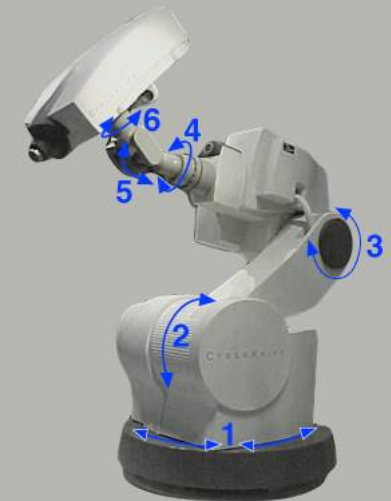
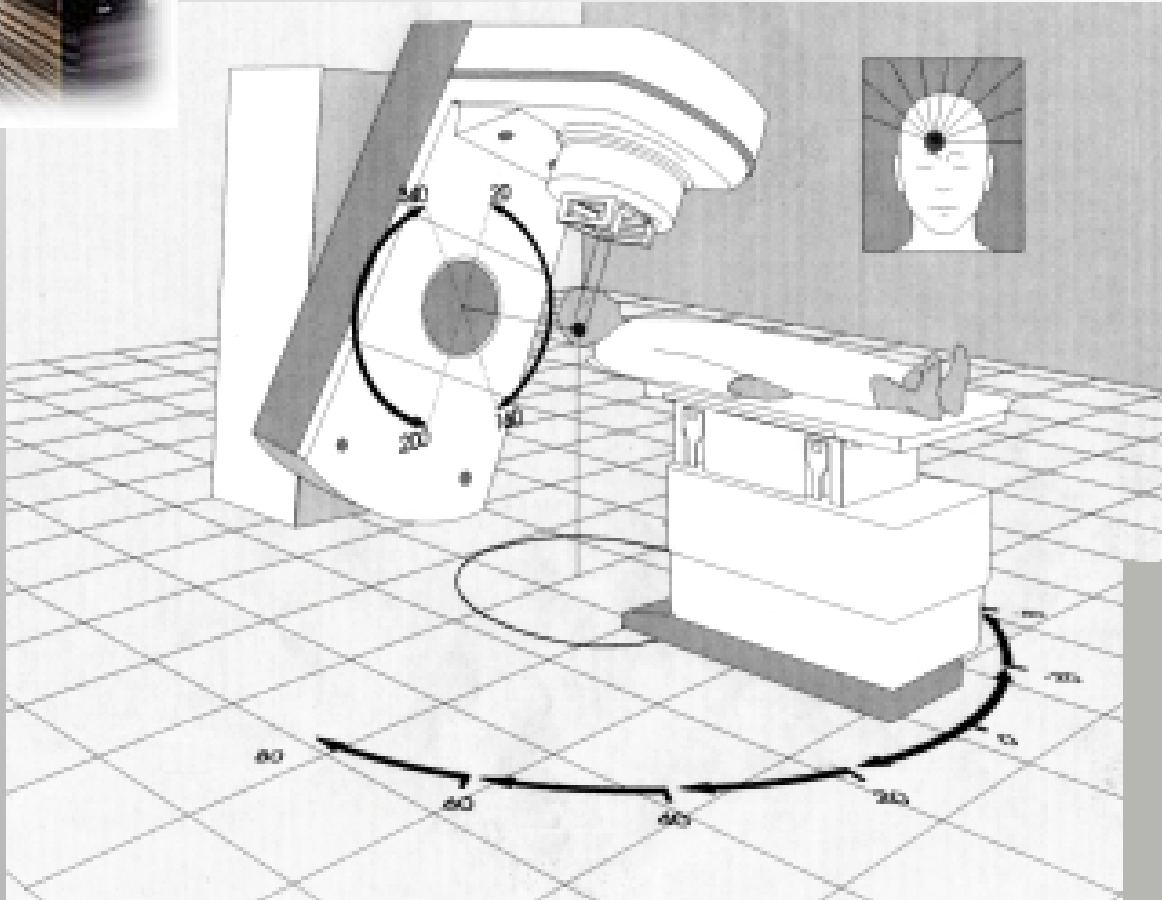




Isozentrische Bestrahlung mittels LINAC



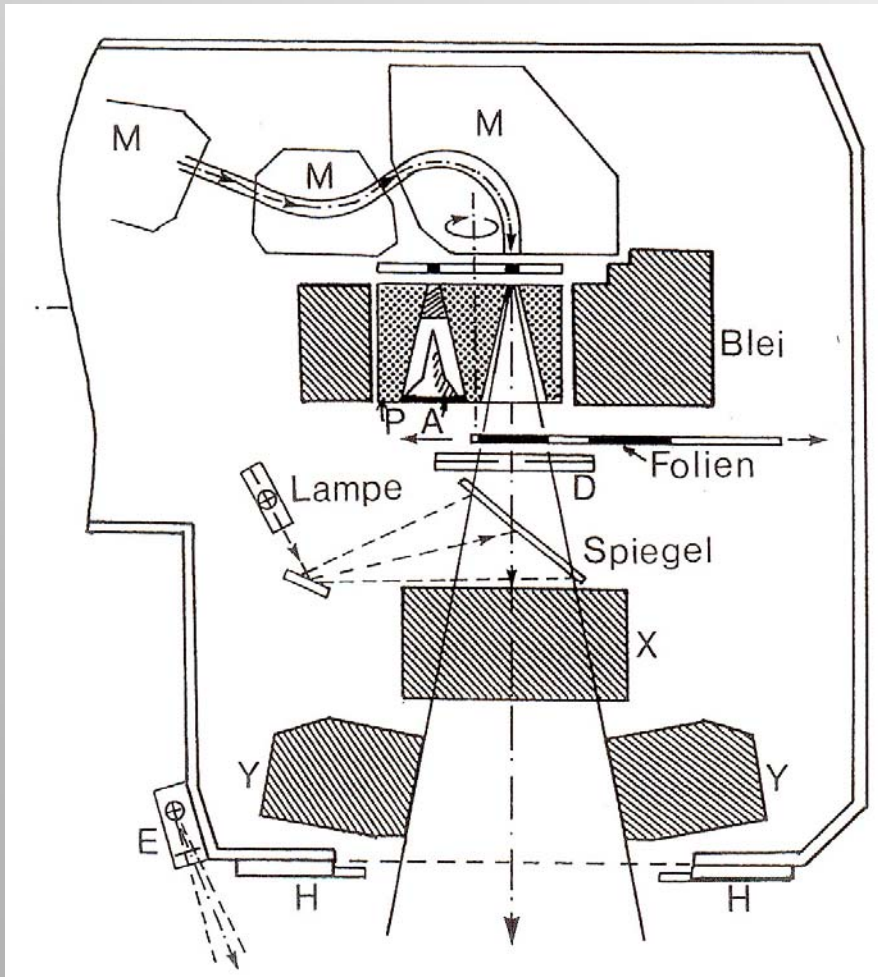
Medizinischer Linac - Isozentrum



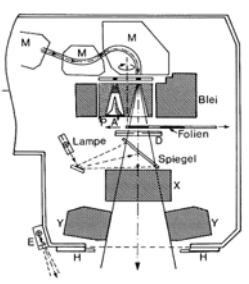
Cyberknife



Strahlerkopf eines medizinischen Elektronen-Linearbeschleunigers



M: Slalom-Magnete für die Strahlumlenkung,
D: Doppeldosismonitor,
P: Primärkollimator,
A: Photonenausgleichskörper mit vorgeschaltetem Beamhardener und Elektronenfänger,
Folien: Ausgleichsfolien für Elektronen,
E: Entfernungsmesser,
H: Halter für Tubus und Filter,
X,Y: Kollimatorblenden,
Lampe und Spiegel: Lichtvisier



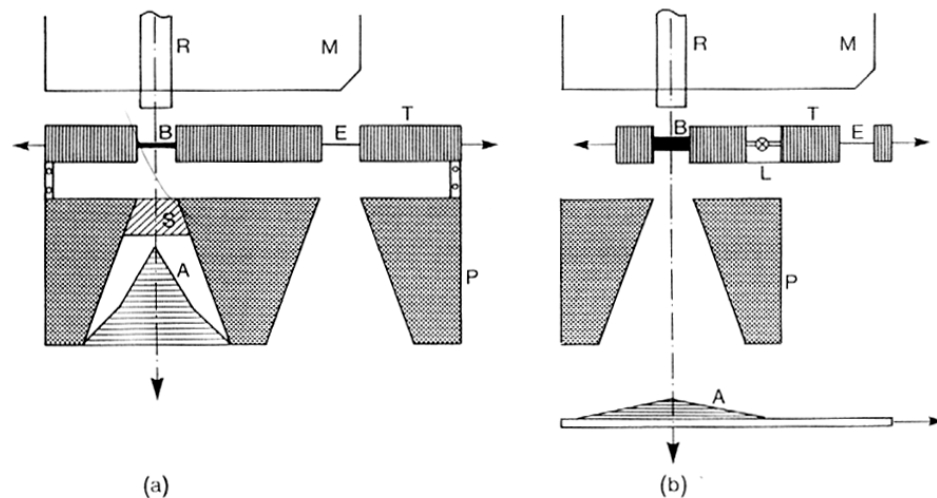
Strahlerkopf

- Elektronen
- Photonen: Bremstarget (z.B. Wolfram oder in Schichtbauweise, hohes Z)



Anordnung von Bremstargets für die Bremsstrahlungserzeugung im Strahlerkopf von Linearbeschleunigern

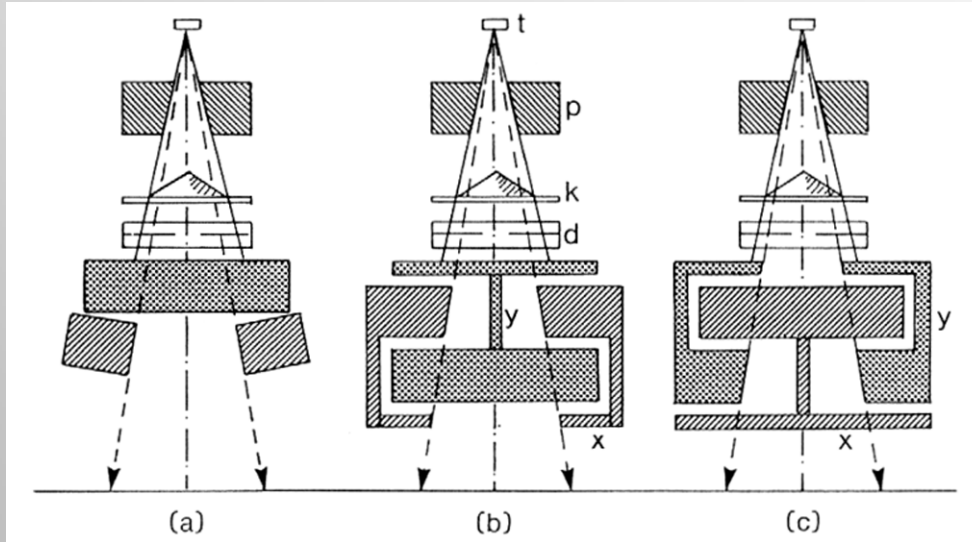
(R: Strahlrohr, M: Umlenkmagnet, B: Bremstarget aus Wolfram, E: Primärstreufolie für den Elektronenbetrieb, T: Targethalterung mit Anschluss an eine Wasserkühlung, P: Primärkollimator, A: Ausgleichskörper für den Photonenbetrieb, L: Lichtvisierlampe, S: Elektronenfänger)



(a): dünnes Bremstarget

(b): dickes Bremstarget (d=4 mm Wolfram) KP/MB

Kollimatorsysteme

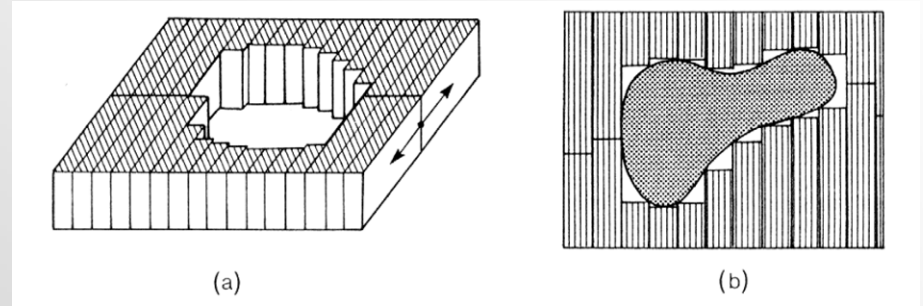


Verschiedene Ausführungen von konventionellen Photokollimatoren

t: Bremstarget,
 p: Primärkollimator,
 k: Ausgleichkörper,
 d: Doppelmonitor,
 x,y: Halbblenden

- Primäre und Sekundäre **Kollimatoren** (getrennte Halbblenden, die sich auf **Kreisbahnen** bewegen)
- **Divergenz** (Berücksichtigung der Strahlaufweitung)
- Materialien:
 - **Blei oder Wolfram** (tw. an der fokusnahen Seite mit Al oder Elementen niedriger Ordnungszahl belegt zur Reduktion der Streustrahlung)

Keil, Block oder Multi Leaf Kollimatoren (MLC), Bolus



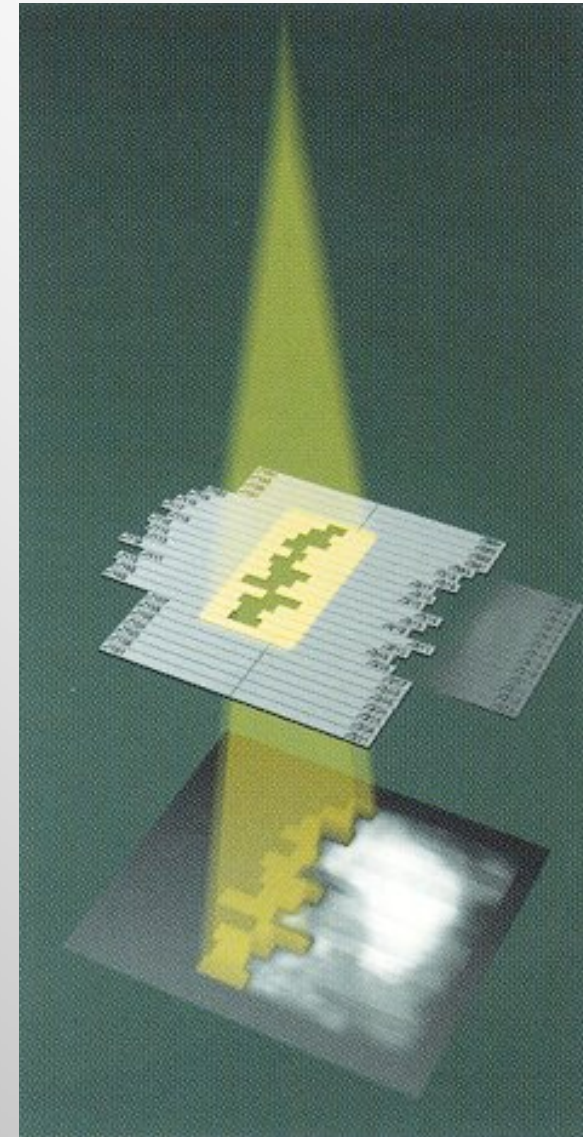
(a) Prinzip des Lamellenkollimators
 (b) Anpassung der Lamellenpositionen an das Zielvolumen

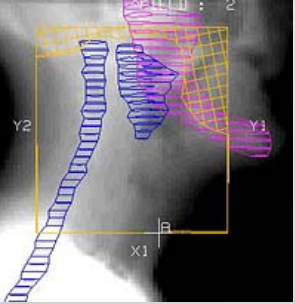
- Keil: zum Ausgleich von überlappenden Feldern
- Block: meist aus Blei-Zinn-Legierung, leakage < 1%
- MLC: lamellenförmige, einzeln verstellbare Blenden, leakage ca. 3%
- Bolus: Ausgleichskörper am Patienten



Teletherapie mit Linac

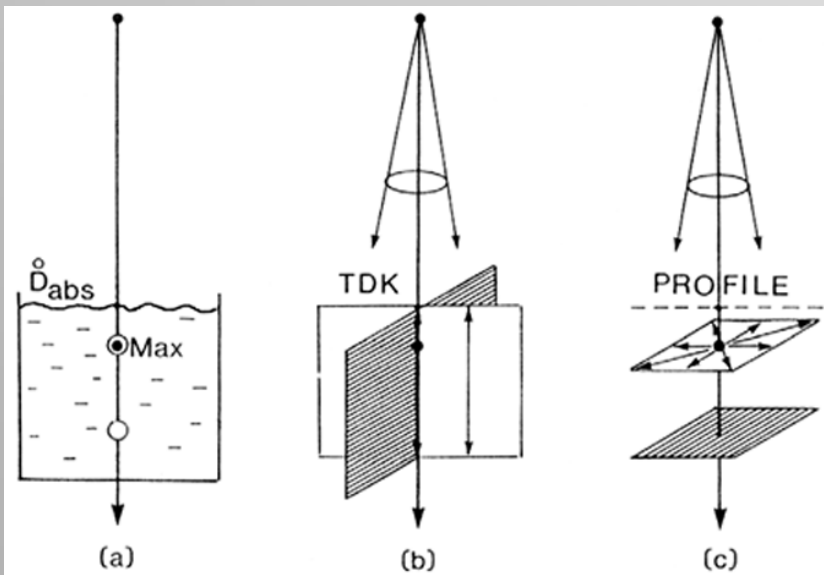
- LINAC (Linear Accelerator)
 - Elektronen, Photonen





Dosisverteilung

- Räumliche Verteilung der Energiedosis der Elektronen- und Photonenstrahlung in Materie
 - Abhängig von: Dichte, Zusammensetzung, Absorber, Strahlenart, Strahlenqualität, Blenden, Keile, Filter, Blöcke, Ausgleichskörper, ...
 - Bestimmung der Dosisverteilung in der Bestrahlungsplanung

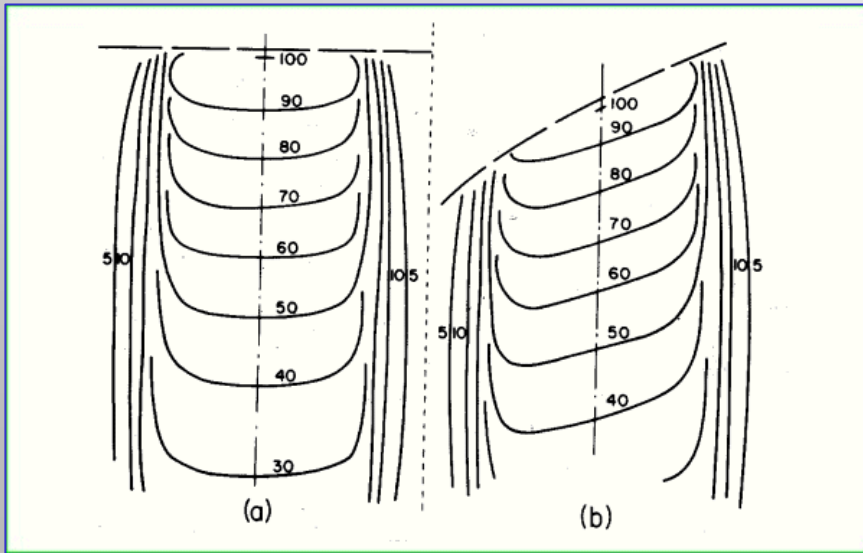
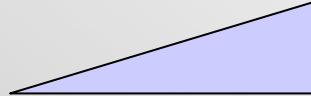


*Darstellung 3-dim perkutaner
Photonen-Dosisverteilungen
durch*

*(a) absolute Dosisleistung an
Referenzpunkten*

(b) Tiefendosiskurven

*(c) Dosisquerprofile in
verschiedenen Phantomtiefen*

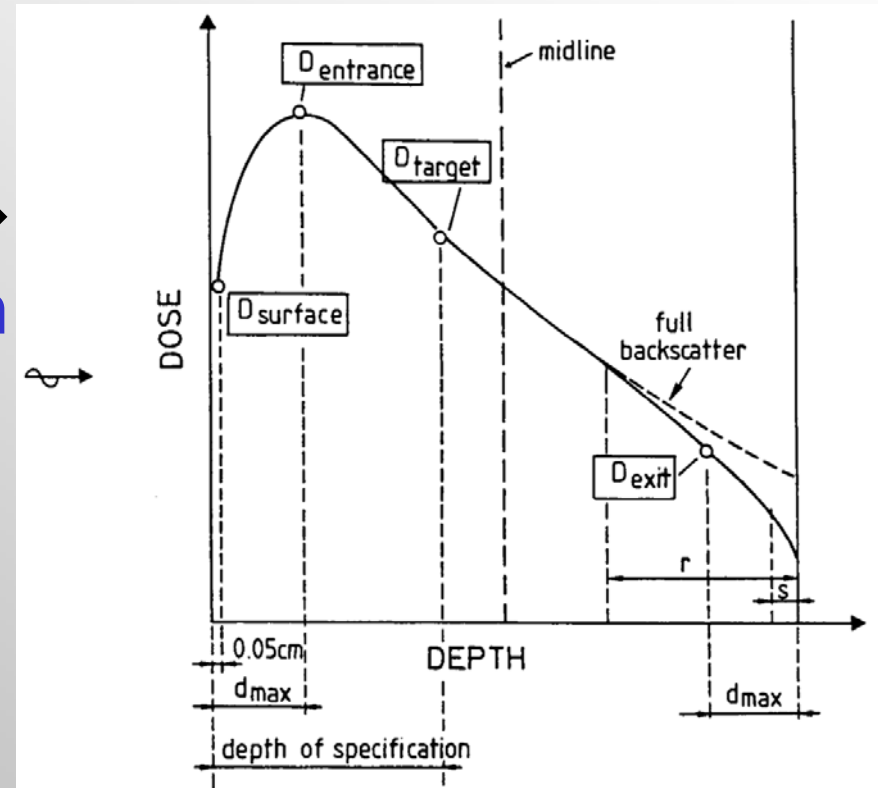


ohne und mit Keil



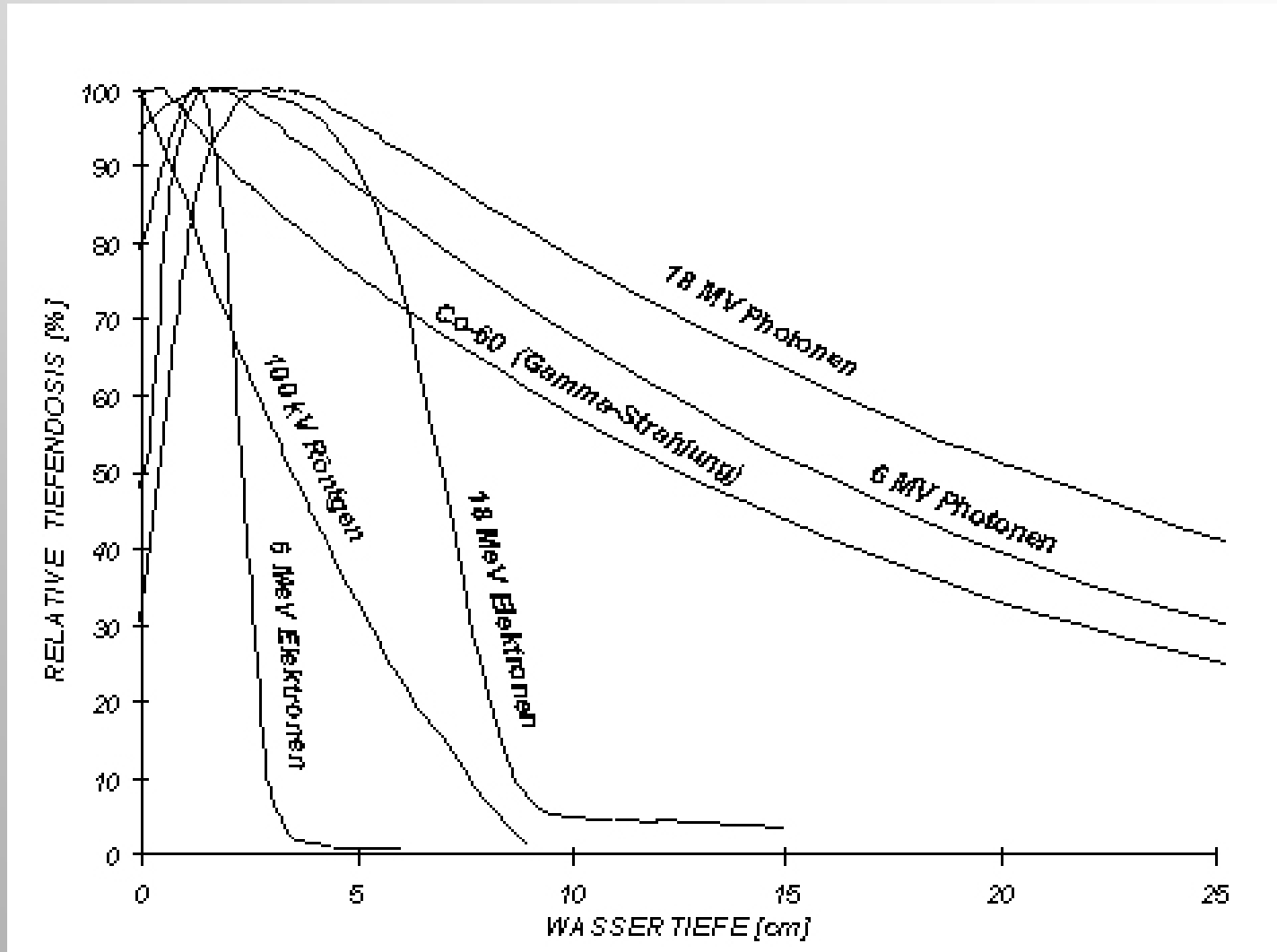
Tiefendosisverteilung

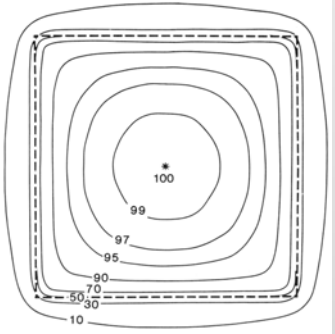
- Dosisverteilung entlang der Achse des Nutzstrahlbündels
(Angabe tw. Auch in % → PDD = Percentage Depth Dose)
- Abhängig von Dichte und OZ des Mediums, Strahlenqualität und Energie



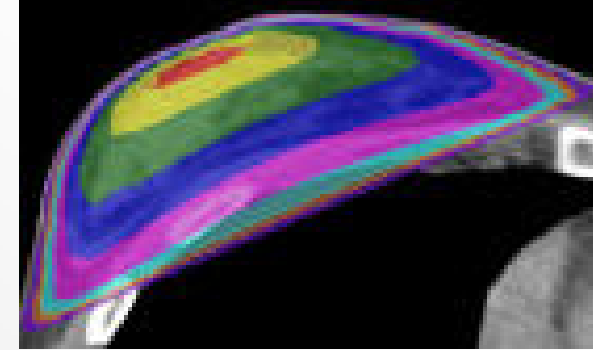


Tiefendosisverteilung

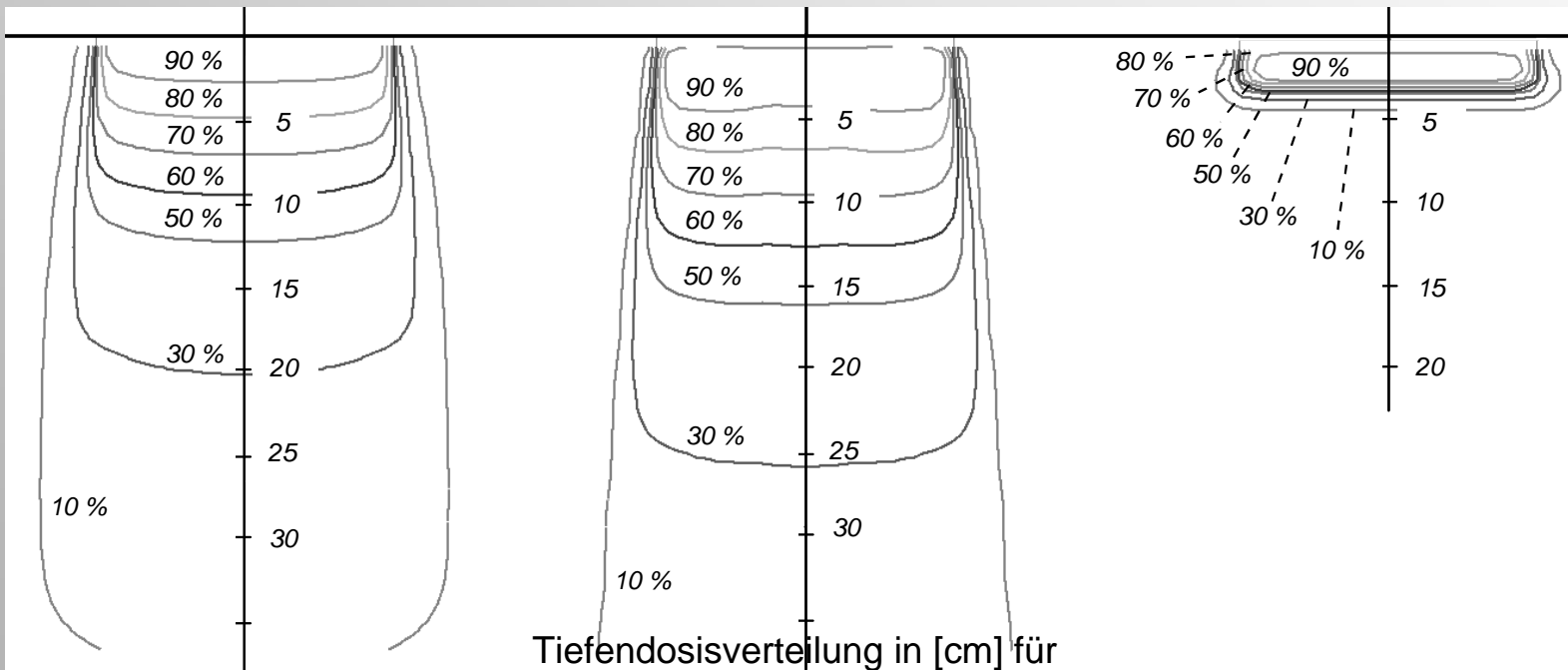




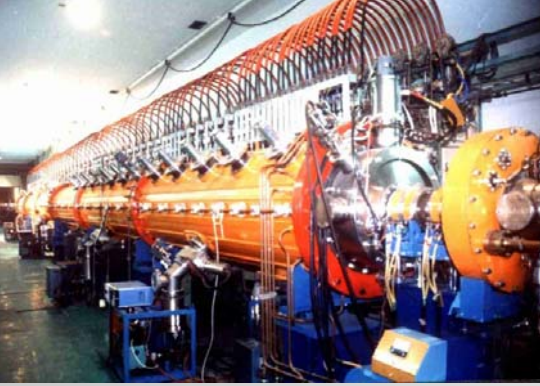
Isodosendarstellung



- Kurven die Punkte gleicher Dosis verbinden
 - Absolut
 - Relativ (%)



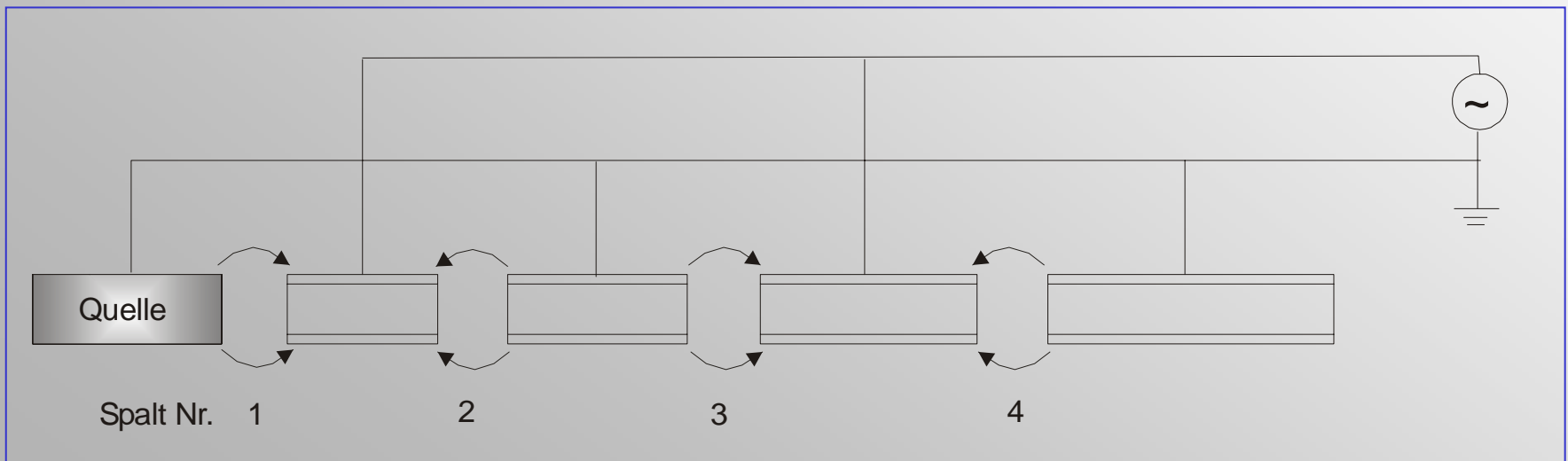
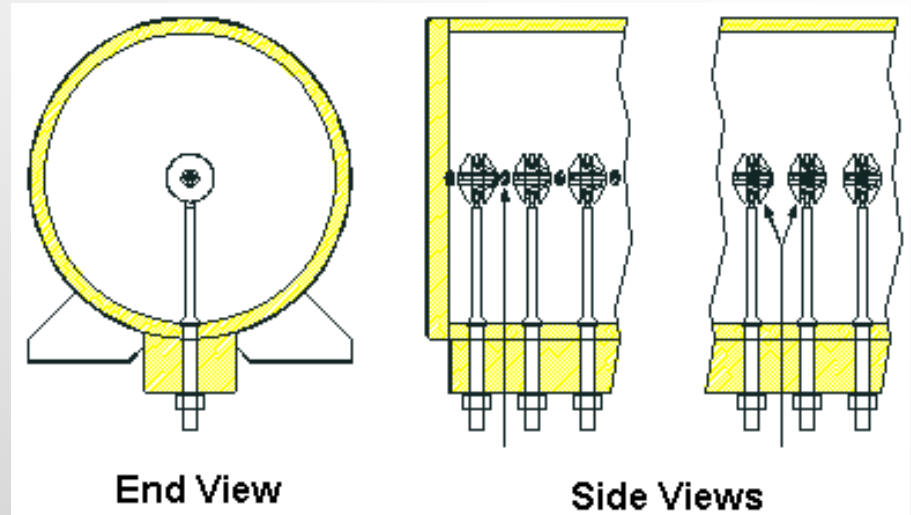
Gammastrahlung (Co-60), Photonenstrahlung (X 6 MV) und Elektronenstrahlung (e⁻ 9 MeV).

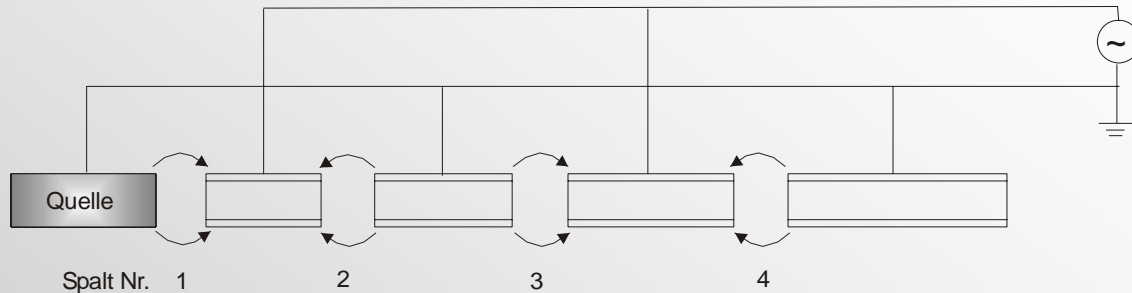


6.2 Der Protonen-LINAC

- Protonen haben 2000 x größere Masse als Elektronen
- Geschwindigkeit von Protonen: nicht im ultrarelativistischen Bereich und stark energieabhängig
- Prinzip des Elektronenlinac würde sehr kleine Phasengeschwindigkeit verlangen
- Technisch ausgeschlossen, da die Energiedissipation in der Struktur sehr hoch wäre („Reibungswärme beim Abbremsen der Welle“).
- → daher „mechanische Lösung“ **drift-tubes:** Abschirmung des nicht nutzbaren Feldteiles.

Drift-tube LINAC





- Die Länge der Tubes muss so gebaut werden, dass die synchronisierten Teilchen in einer halben Periode das Oszillationsfeld durchqueren
- Das geschieht, wenn λ die Vakuum-Wellenlänge und L_n die Länge der n -ten Tube ist. Es ergibt sich die folgende Relation:

$$L_n = \frac{\beta_n \lambda}{2} = \frac{1}{2} \frac{v_n}{c} c\tau$$



- Die Maschine wird deshalb manchmal „**half beta lambda**“-**LINAC** genannt.
- In einer **anderen Lösung** hat das Feld dieselbe Phase wie der Spalt. **Nun muss das Teilchen die Tube in einer ganzen Periode des Oszillationsfeldes durchqueren** und anstatt obiger Gleichung erhält man

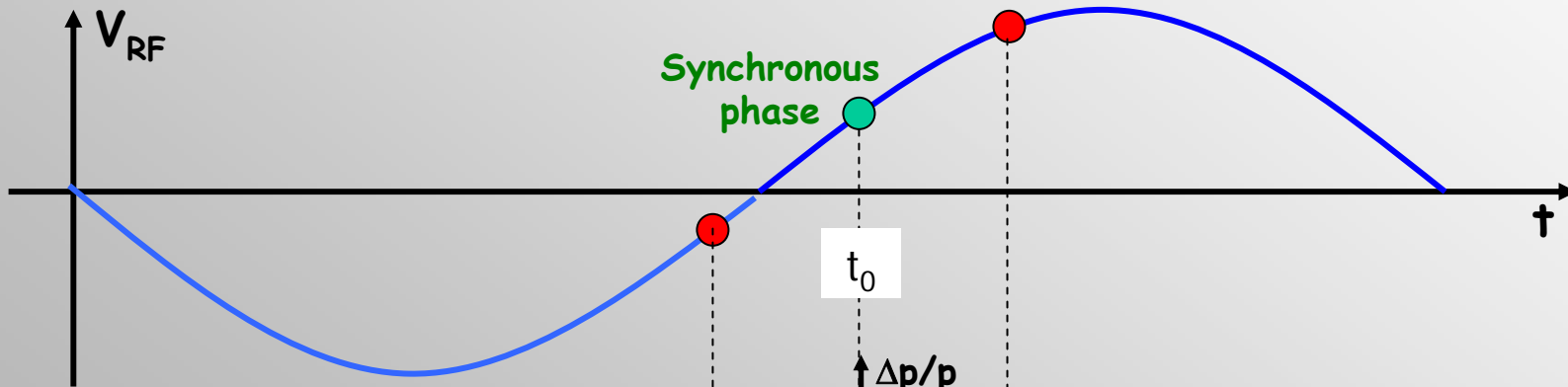
$$L_n = \beta_n \lambda = \frac{v_n}{c} c\tau$$

- → „**beta lambda**“ **LINAC**

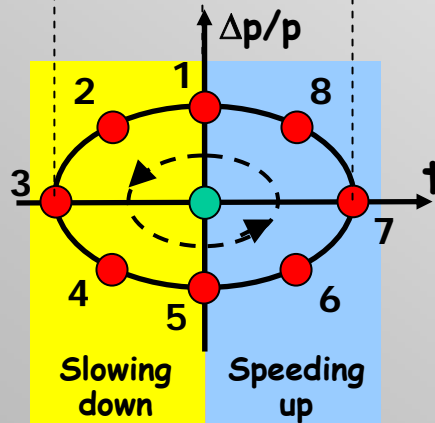


Longitudinal motion – synchrotron oscillations

- Proton/ion linacs and small synchrotrons operate below transition
 - Particle with **higher momentum is faster and has shorter transit of revolution time**) (in contrast to electron machines and HE p machines).
 - The **ideal particle** should arrive always at the same RF phase at the cavity after each tube passage/revolution (synchronous particle).

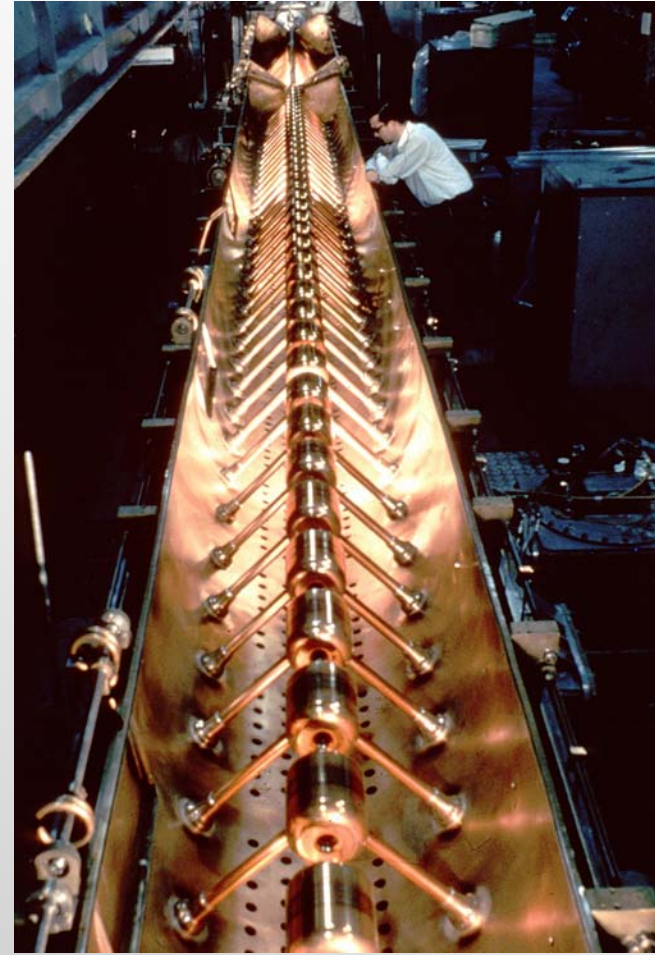
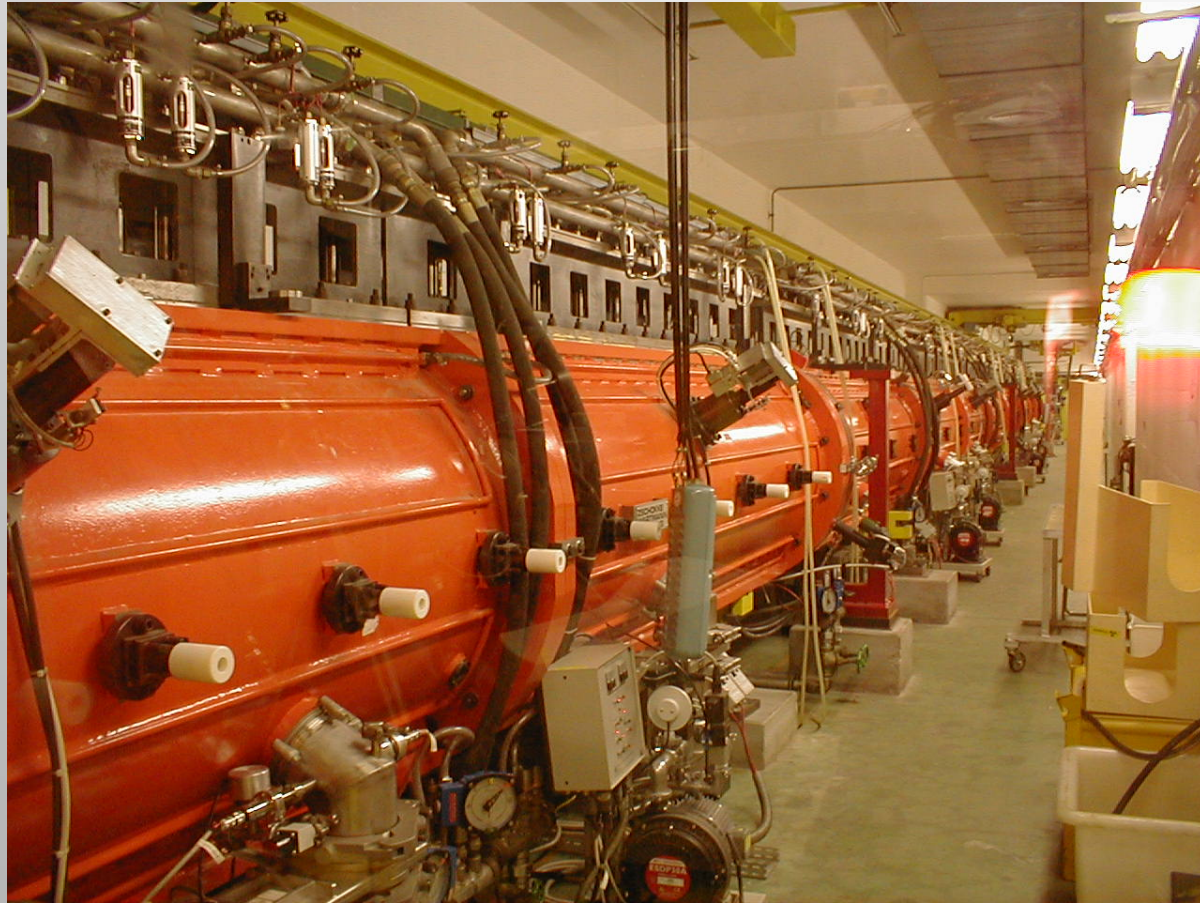


- On time, $\Delta p > 0$, $V = V_0$, faster
- Early, $\Delta p > 0$, $V < V_0$, faster
- Early, $\Delta p = 0$, $V < V_0$, equal
- Early, $\Delta p < 0$, $V < V_0$, slower
- On time, $\Delta p < 0$, $V = V_0$, slower



- On time, $\Delta p < 0$, $V = V_0$, slower
- Late, $\Delta p < 0$, $V > V_0$, slower
- Late, $\Delta p = 0$, $V > V_0$, equal
- Late, $\Delta p > 0$, $V > V_0$, faster
- On time, $\Delta p > 0$, $V = V_0$, faster





■ CERN Linac2 tanks.

CERN Linac1 Drift tubes