



# Erzeugung von Elektronenfeldern für die perkutane Strahlentherapie

**Dr. R. Mini**

## Anforderungen an Bestrahlungsanlagen

Emittierte Strahlung

- Durchdringungsfähigkeit
- Strahlenart
- Strahlenenergie
- Dosisleistung

Strahlführung

Strahlenkollimation

Strahlenfeld-Modulatoren

Strahlenüberwachung (Monitore)

Einstellhilfen

Einstellüberwachung



# Bestrahlungsanlagen für die perkutane Strahlentherapie

## Teilchen-Beschleuniger

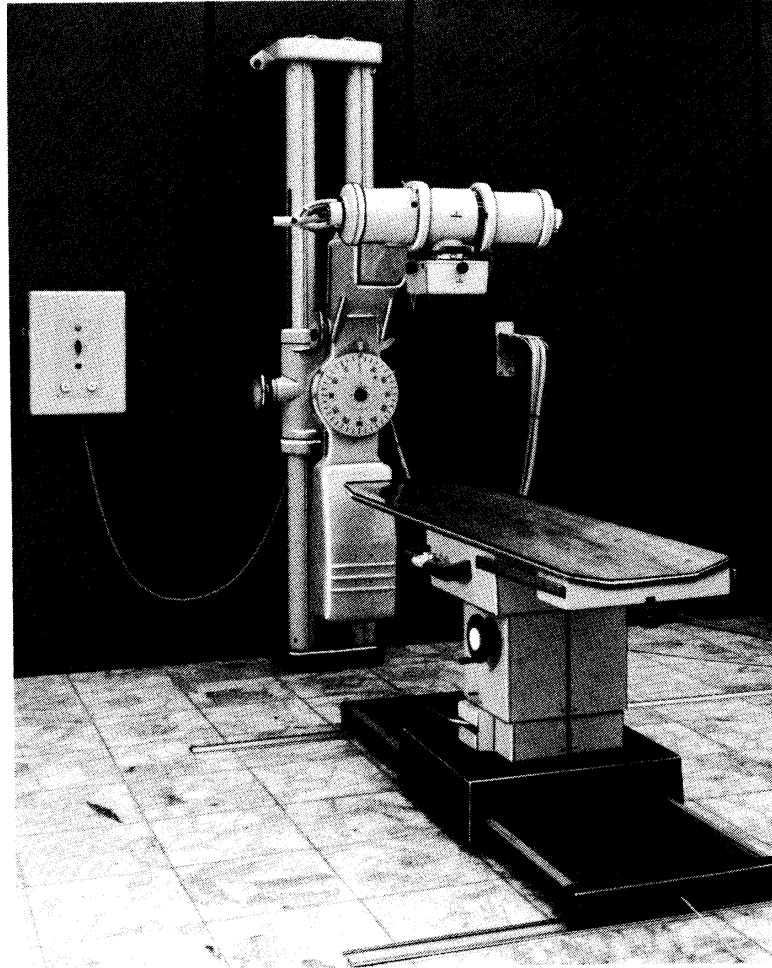
- Röntgengeräte
- Elektronen-Linearbeschleuniger (LINAC)
- Elektronen-Kreisbeschleuniger (Betatron, Mikrotron)
- Neutronen-Anlagen
- Protonen-Anlagen (Zyklotrone)
- Anlagen für schwere Ionen (Synchrotrone)

## Radioaktive Quellen

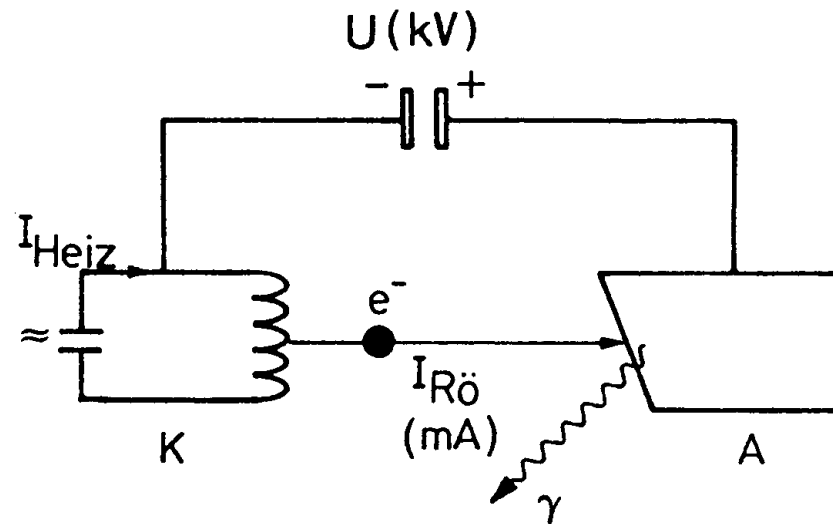
- Co-60- und Cs-137-Geräte



## Röntgenanlagen



## Beschleunigung der Elektronen in einem elektrischen Feld



## Röntgenanlagen



## Röntgenanlagen



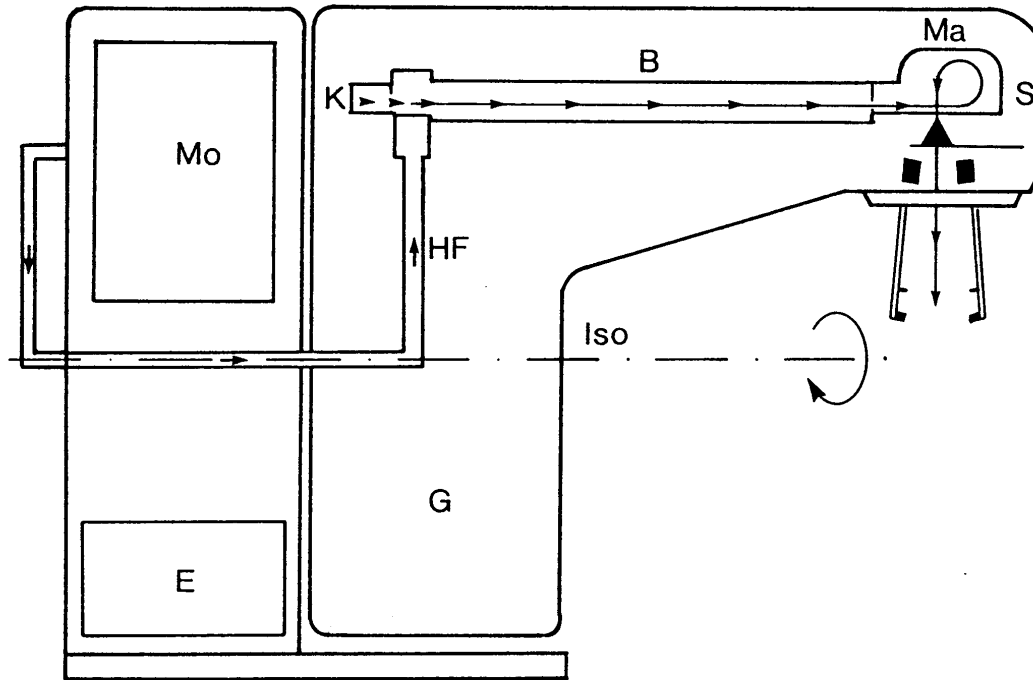


## Elektronen-Linearbeschleuniger





## Elektronenlinearbeschleuniger



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

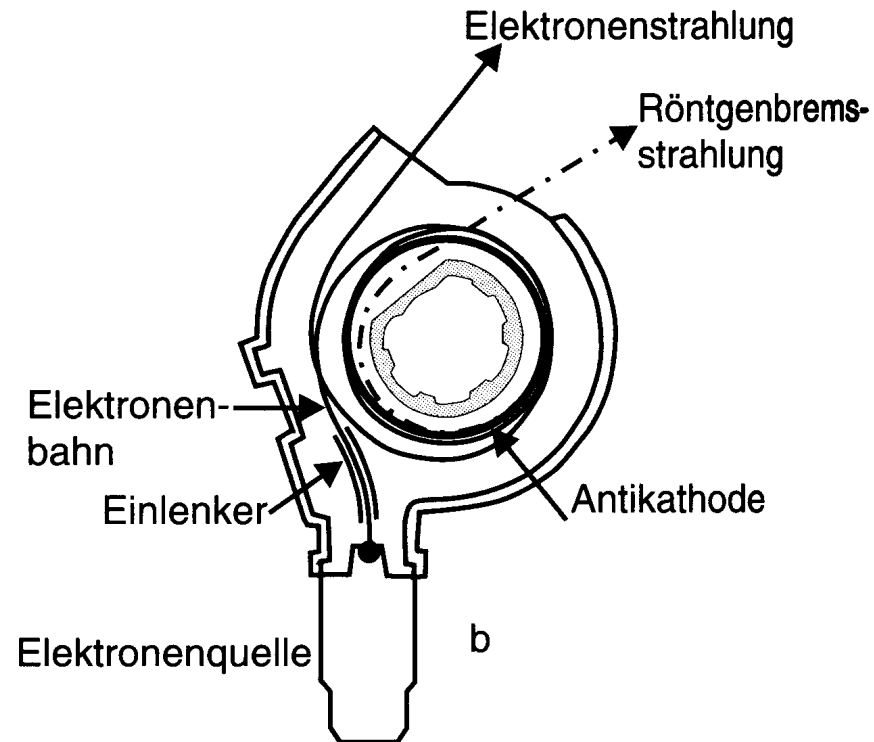
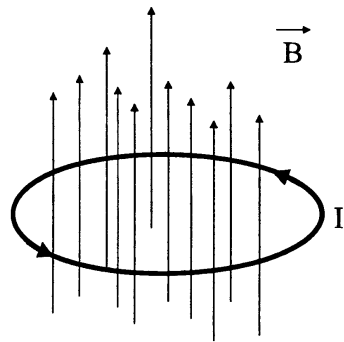
## Elektronen-Kreisbeschleuniger

-Betatrone

-Mikrotrone



## Betatrone



## Betatrone

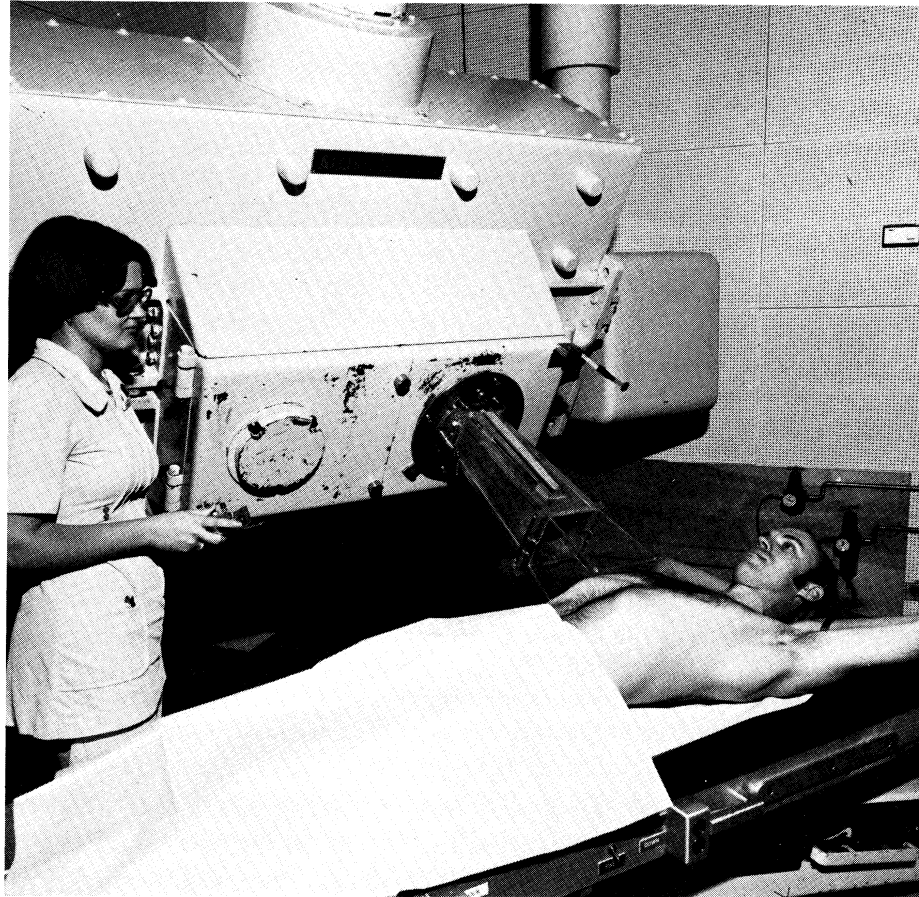


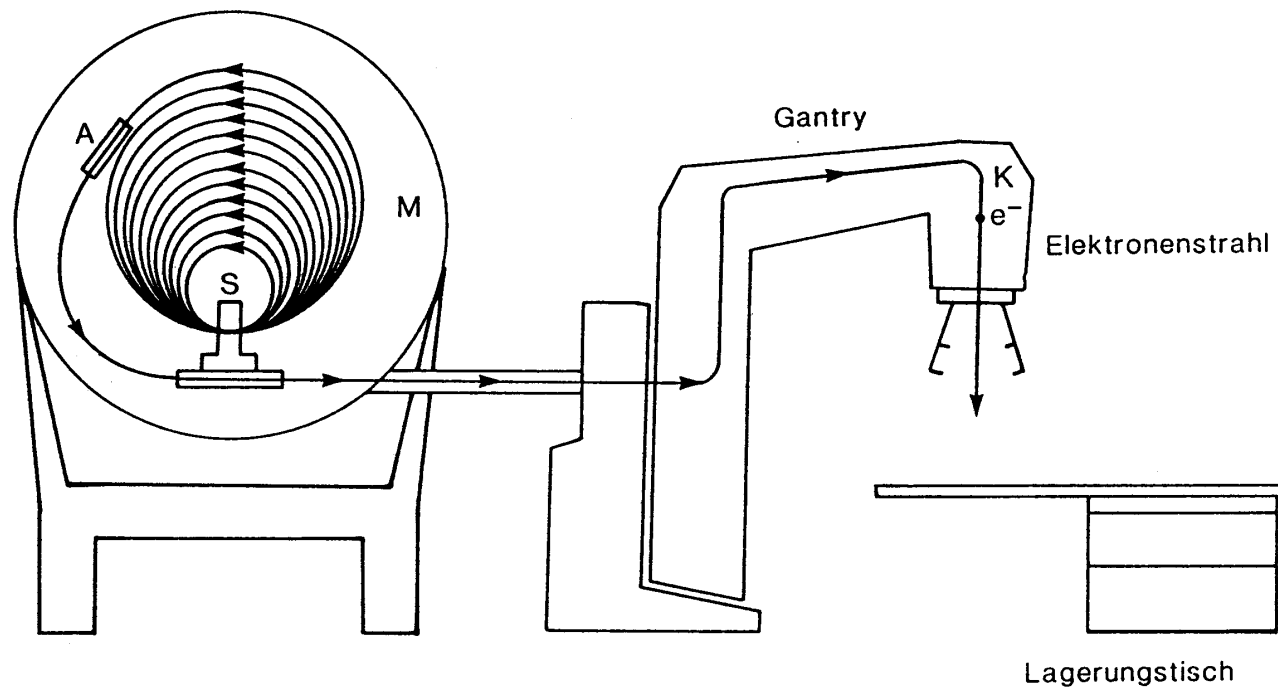
Figure . . . Photograph of Allis-Chalmers 25 MeV betatron installed in the Ontario Cancer Institute.

## Linac vs Betatrone

Bauliche Infrastruktur	L: kleiner B: grösser
Kosten	L: kleiner B: grösser
Strahlenenergie	L: Kleiner (bis 25 MeV) B: grösser (bis 50 MeV)
Dosisleistung	L: grösser B: kleiner
Isozentr. Expositionen	L: einfach B: Umlagerung notwendig

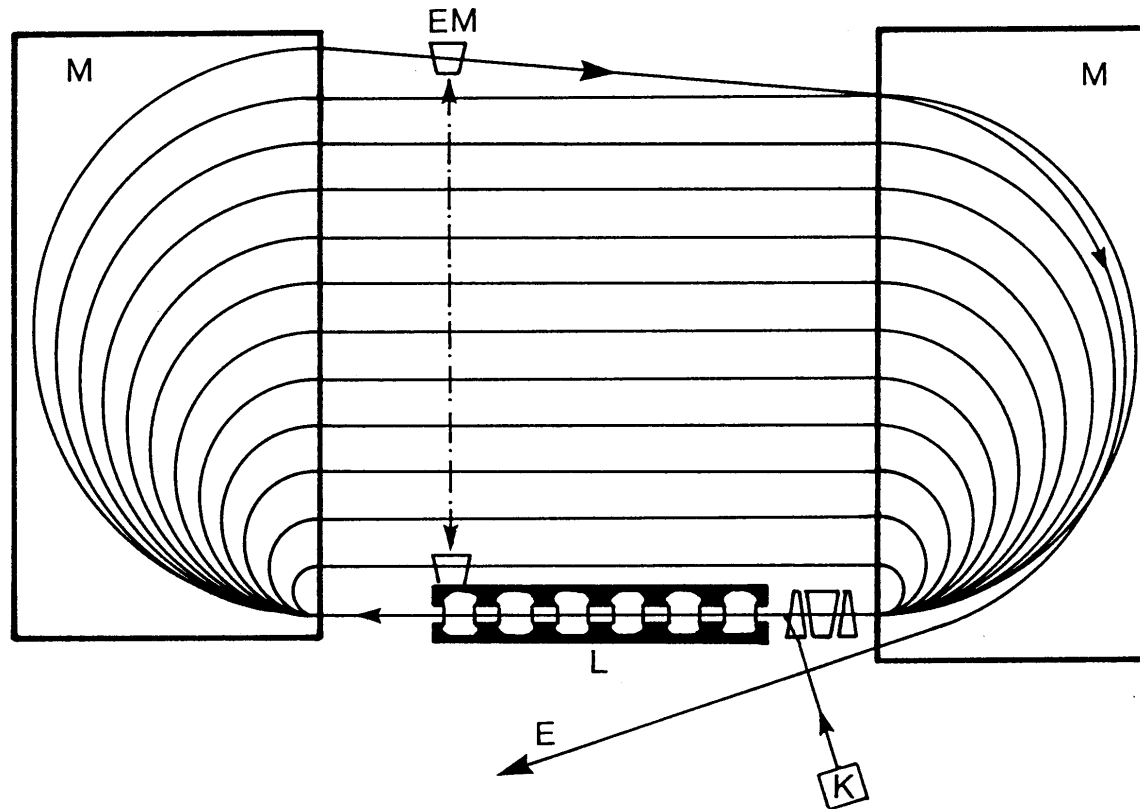


## Mikrotrone



Schematische Darstellung eines kommerziellen 22-MeV-Kreismikrotrons für medizinische Anwendungen (M: homogenes Magnetfeld, S: Beschleunigungsspalt, A: Auslenkungsstahlrohr zur lokalen Abschirmung des Magnetfeldes, K: Strahlerkopf).

## Race-Track-Mikrotrone



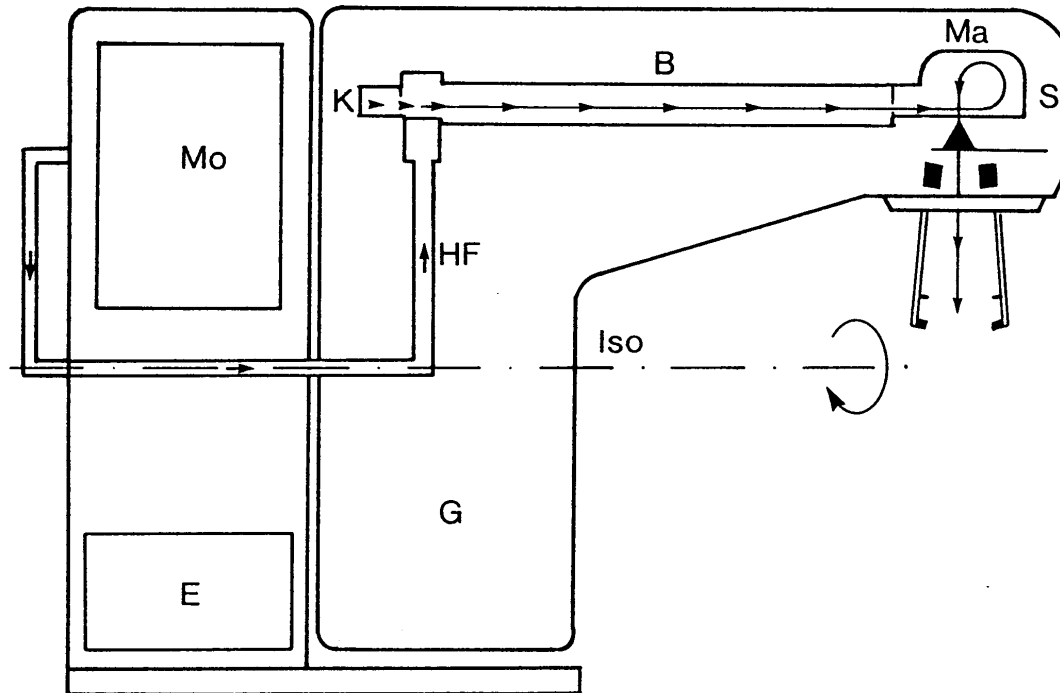
Aufbau eines Race-Track-Mikrotrons mit Linac-Sektion (M: Ulenkmagnete, EM: beweglicher Extraktionsmagnet, K: Elektronenkanone, L: Linacsektion, E: Elektronenstrahl).



## Aufbau eines Linearbeschleunigers



## Elektronenlinearbeschleuniger



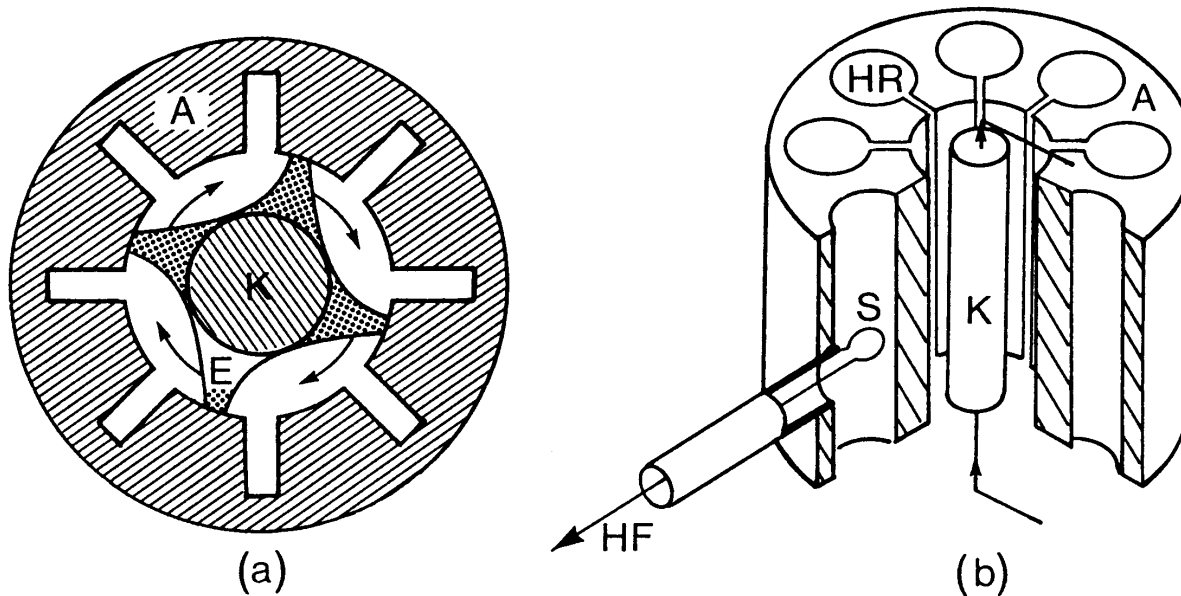
Prinzipieller Aufbau von Elektronenlinearbeschleunigern. Mo: Modulator, E: Energieversorgung, HF: Hochfrequenz, K: Elektronenkanone, B: Beschleunigungsrohr, Ma: Umlenkmagnet, S: Strahlerkopf, Iso: Isozentrumsachse (Drehachse der Bestrahlungsanlage), G: Gantry (Beschleunigerarm).

## HF-Modulator

- HF-Quelle
  - Magnetron
  - Klystron
- Hohlleitersystem für HF-Wellen

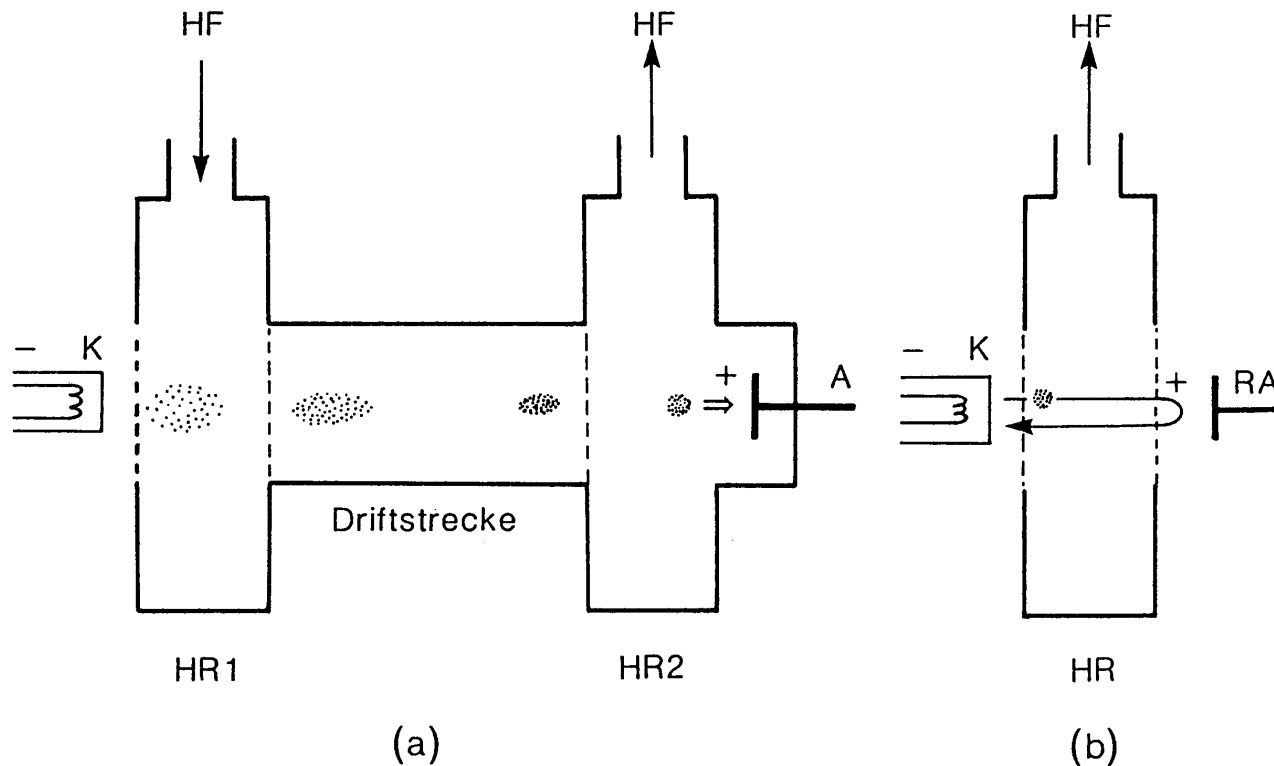


## Magnetron



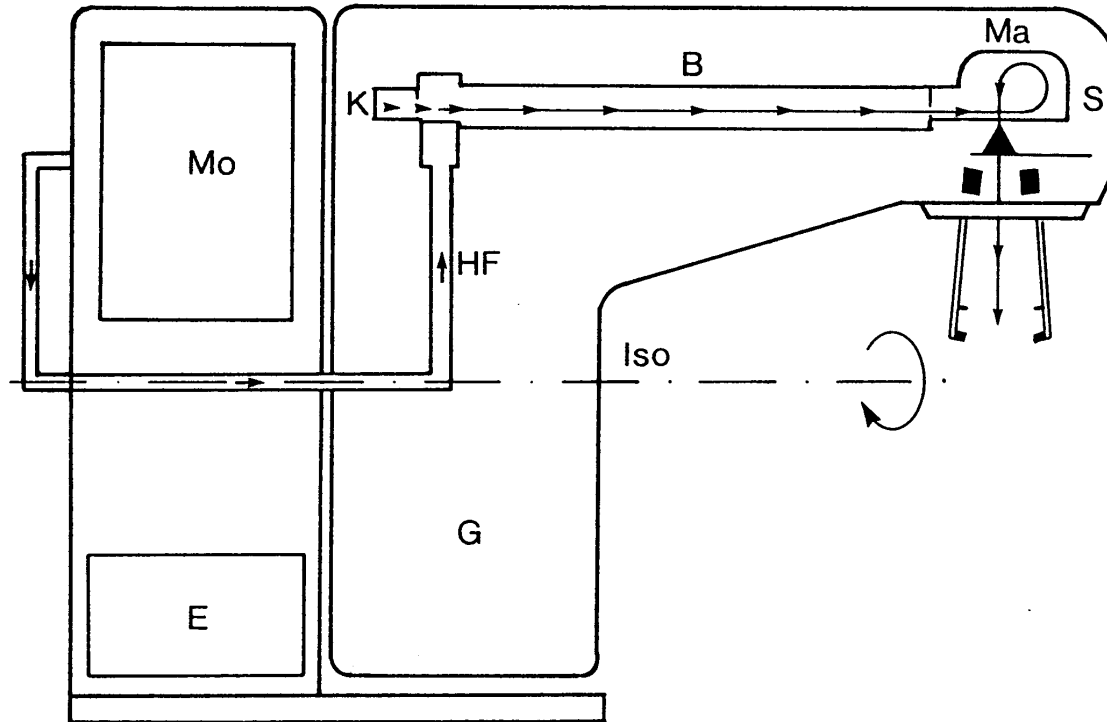
Prinzipieller Aufbau eines Magnetrons, (a): schematischer Aufriß, (b): technische Bauform (K: Kathode, A: Anode, HR: Resonanzräume, S: Antenne zur HF-Auskopplung, E: im Magnetfeld umlaufende Elektronenwolken, nach [Hinken]).

## Klystron



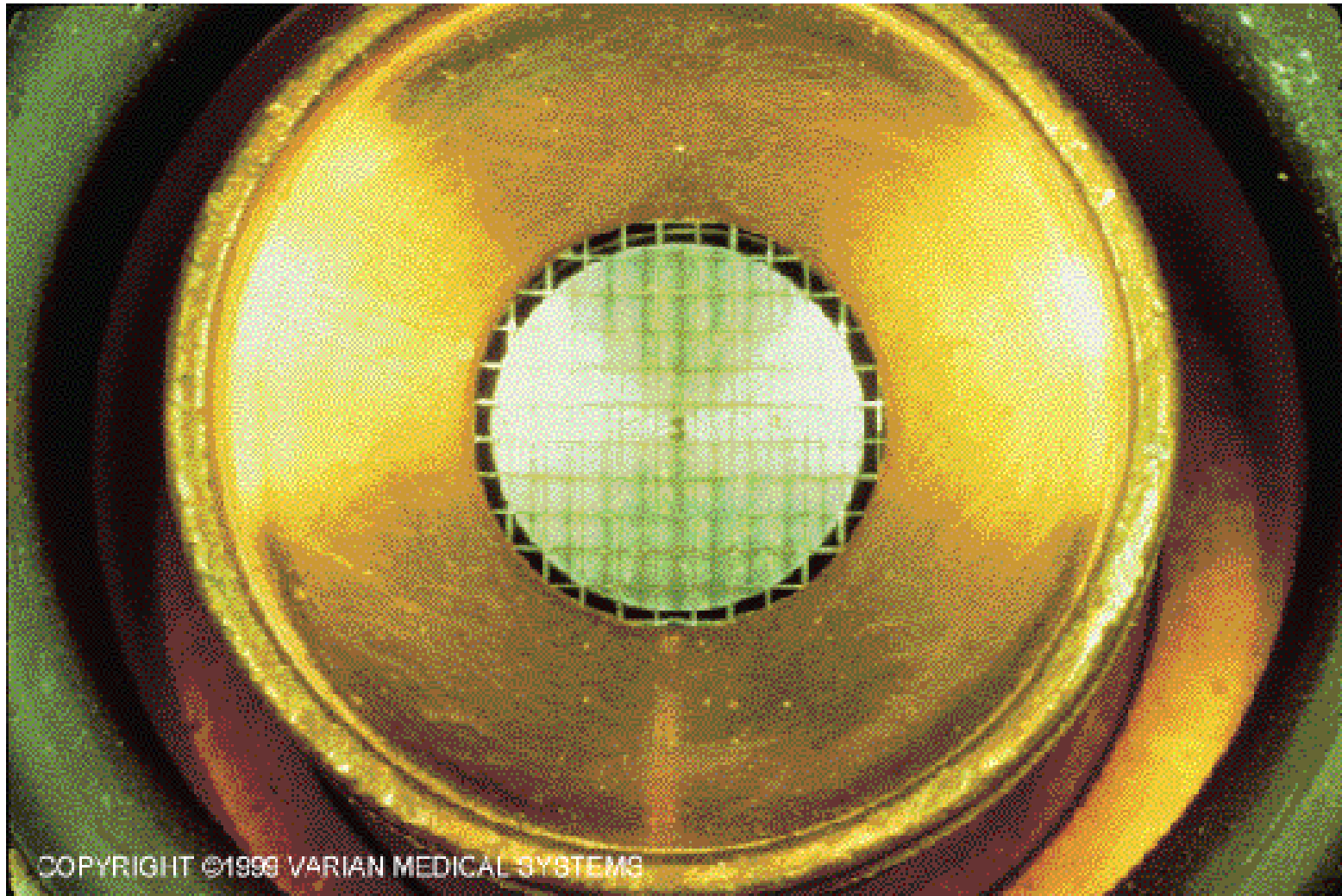
(a): Zweikammerklystron (K: Kathode, A: Anode, HR1 + HR2: Resonanzräume, HF: eingespeiste und ausgekoppelte Hochfrequenz), (b): Reflexklystron (K: Kathode, HR: Hohlraumresonator, RA: Reflektorelektrode, HF: Hochfrequenz-Auskopplung).

## Elektronenkanone



Prinzipieller Aufbau von Elektronenlinearbeschleunigern. Mo: Modulator, E: Energieversorgung, HF: Hochfrequenz, K: Elektronenkanone, B: Beschleunigungsrohr, Ma: Ulenkmagnet, S: Strahlerkopf, Iso: Isozentrumsachse (Drehachse der Bestrahlungsanlage), G: Gantry (Beschleunigerarm).

## Elektronenkanone





## Elektronenkanone

### 1. Elektronenquelle

- Thermische Elektronenquelle:  
(Elektronenaustrittsarbeit durch  
Zuführung thermischer Energie)
  - direkt geheizter Wolframwendel
  - indirekt geheizter Wolframwendel
- „kalte“ Elektronenquellen  
(Bariumsulfatbeschichtete Flächenkathoden;  
Elektronenextraktion allein durch Anlegen  
einer Hochspannung)

Kalte Gitterkathoden erzeugen zeitlich scharf  
abgegrenzte Elektronenimpulse



## Elektronenkanone

### 2. Elektronenextraktion

- Spannungsdifferenz Kathode - Gitteranode
- Elektronenfokussierung mit Wehneltzylinder;  
(Elektronenausbeute)

Merke: - Extraktionsspannung  $U=15-50$  kV  
- Elektronenausbeute ca. 30%



## Elektronenkanone

### 3. Betrieb

Nur Impulsbetrieb (Kühlung, el. Versorgung)

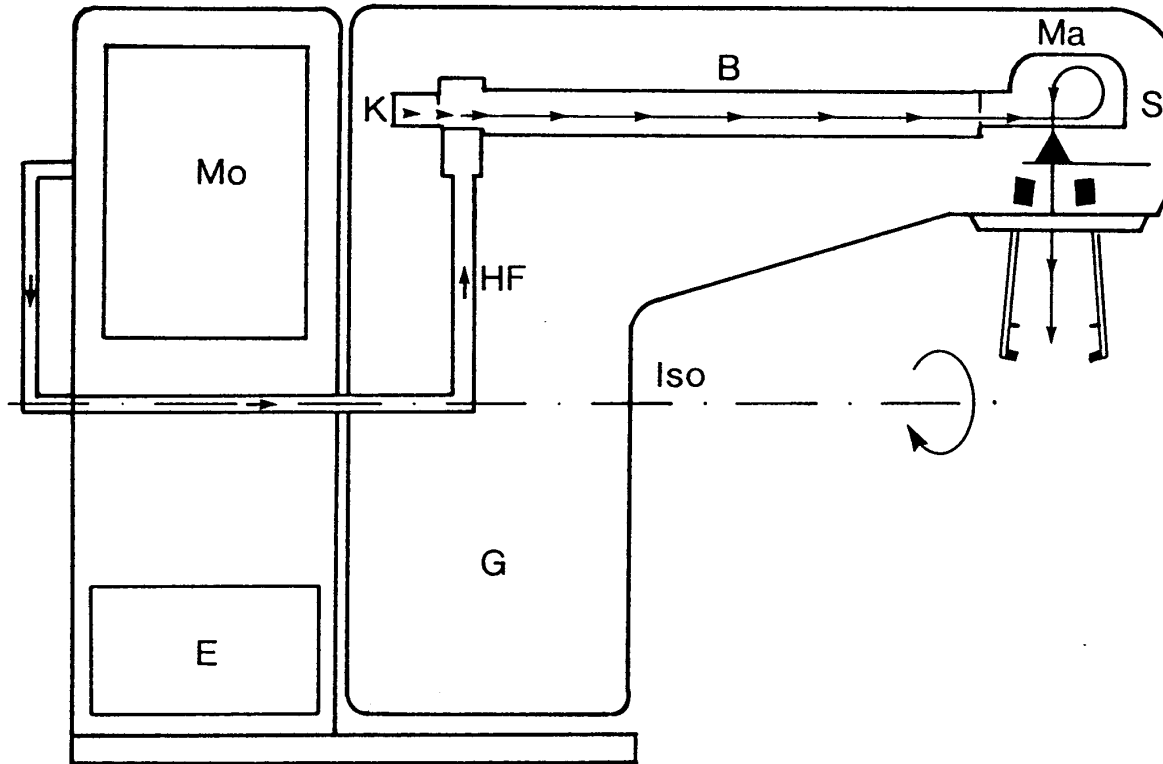
Typische Merkmale: Impulsdauer  $t(I) = \mu s$

Impulsfrequenz 100-400 Hz

Bei jeder Strahlerzeugung wird im Beschleunigungsrohr eine HF-Welle aufgebaut (Beamloading); erst danach wird die Elektronenkanone zur Emission von Elektronen angeregt. Die Steuerung bzw Synchronisation der HF-Impulse und der Elektronenemission erfolgt durch die Steuerelektronik des Modulators



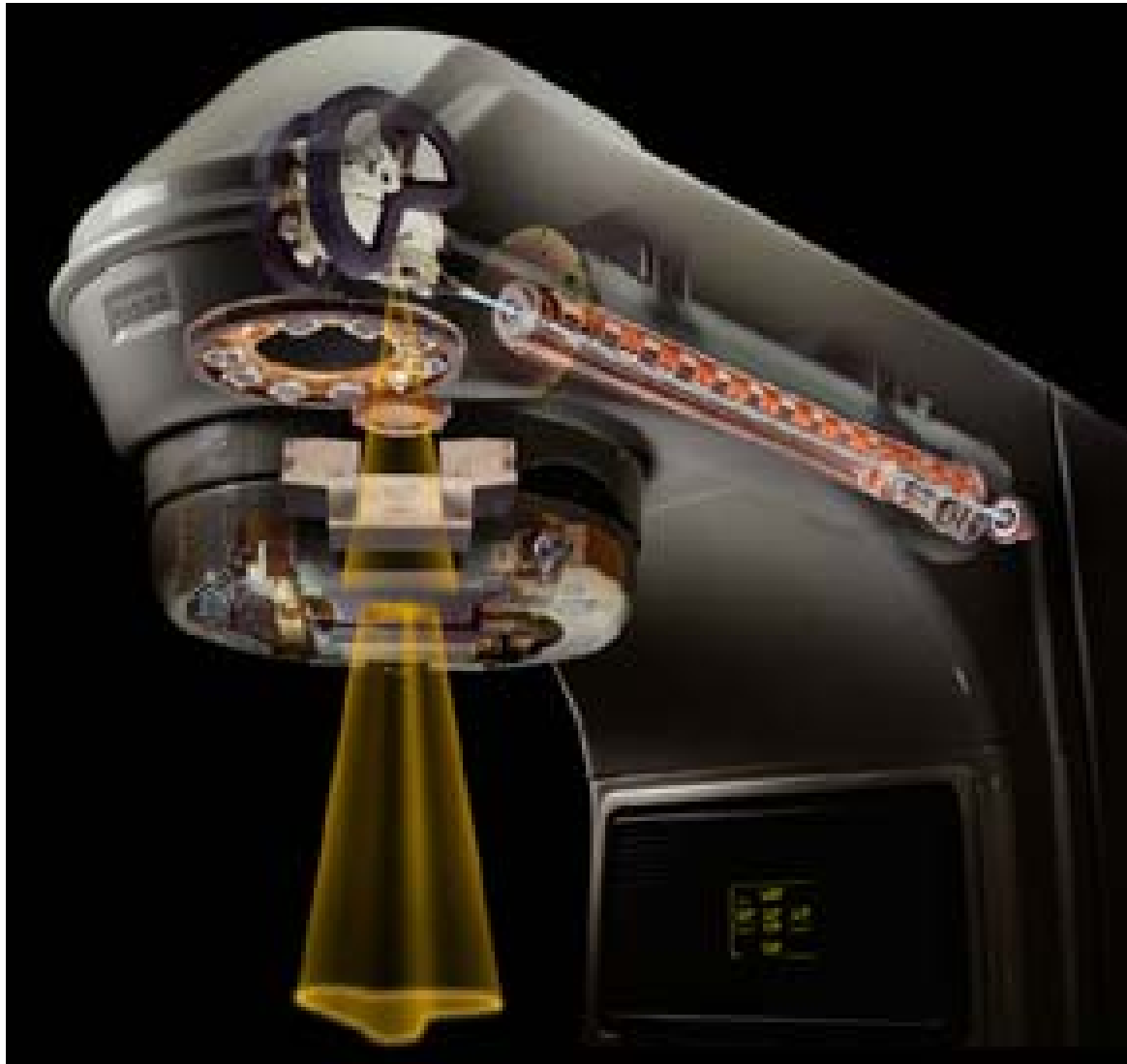
## Elektronenbeschleunigung



Prinzipieller Aufbau von Elektronenlinearbeschleunigern. Mo: Modulator, E: Energieversorgung, HF: Hochfrequenz, K: Elektronenkanone, B: Beschleunigungsrohr, Ma: Ulenkmagnet, S: Strahlerkopf, Iso: Isozentrumsachse (Drehachse der Bestrahlungsanlage), G: Gantry (Beschleunigerarm).

AMS

## Erzeugung eines Elektronenstrahles



# Beschleunigung der Elektronen

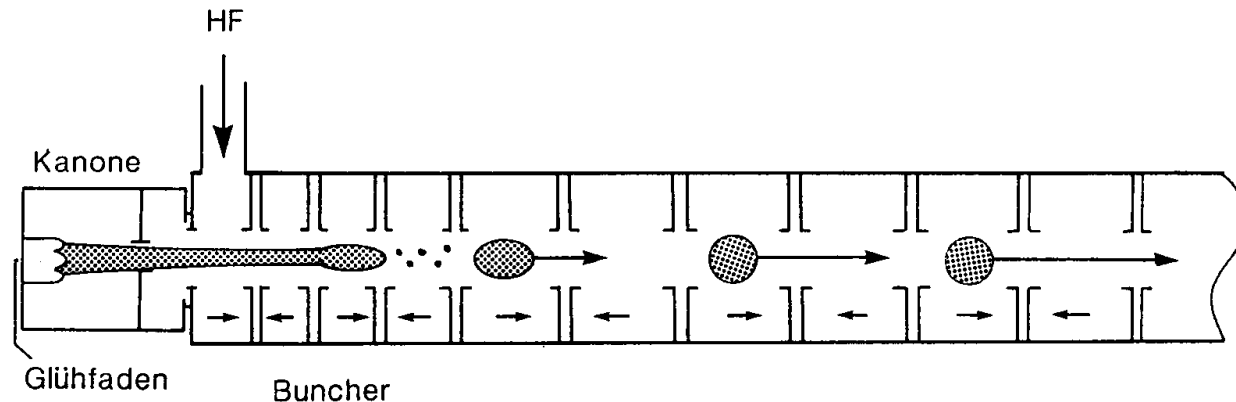
## 1. Beschleunigungsrohr

- metallischer, gut leitender Hohlzylinder (1-3m lang, je nach gew. max. e-Energie)
- Unterteilung mit Lochblenden in einzelne Resonanzräume (5-10cm lang)
- Ausbreitungsgeschwindigkeit der HF-Welle hängt von der Geometrie der Rohreinteilung (Blendenöffnung, Resonanzräume) ab.
- Elektronenbeschleunigung durch elektrische Feldkomponente in Ausbreitungsrichtung



# Beschleunigung der Elektronen

## 2. Wanderwellenprinzip



Prinzip des Elektronen-Bunchings im Wanderwellenbeschleuniger (Details s. Text).

Merke: Kathodenelektronen  $v \approx c/3$

Beschleunigte Elektronen  $v = 99\%c$  (3 MeV)



# Beschleunigung der Elektronen

## 2. Wanderwellenprinzip

### Phasenfokussierung

Solange  $v \ll c$  holen stark beschleunigte Elektronen die Vorläufer, d.h. schwach beschleunigte Elektronen ein. Es entstehen stets diskrete Elektronenbündel die mit der Frequenz der HF-Welle (3 GHz) den Strahlerkopf erreichen.

### Elektronen Bunching

Reduktion der Ausbreitungsgeschwindigkeit der HF-Welle durch besondere Anpassung der Resonanzräume am Rohranfang, damit ein grossteil der langsamen Elektronen ( $v \approx c/3$ ) nicht hinter der HF-Phase hereilen.



# Beschleunigung der Elektronen

## 2. Wanderwellenprinzip

### Elektronenaustritt

Am Ende des Beschleunigerrohres treten die beschleunigten Elektronen durch ein dünnes Fenster in den Bestrahlerkopf aus.

### Vernichtung oder Rückführung der HF-Welle

Die Restenergie der HF-Welle wird am Ende des Rohres in einem Wellensumpf vernichtet oder zurück in den Buncher geführt



# Beschleunigung der Elektronen

## 3. Stehwellenprinzip

### Erzeugung der Stehwelle

Die Stehwelle wird durch Reflexion der HF-Welle am Ende des Beschleunigerrohres erzeugt. Die vorwärts und rückwärts laufenden HF-Wellen werden durch optimale Anordnung und Geometrie der Resonanzräume derart überlagert, dass eine stehende HF-Welle resultiert (Bäuche und Knoten der Schwingung sind ortsfest).



# Beschleunigung der Elektronen

## 3. Stehwellenprinzip

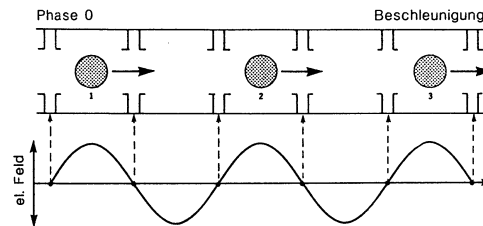
### Beschleunigungsvorgang

- Aufbau einer Stehenden Welle
- Injektion von Elektronen durch die Elektronenkanone
- ruckartige Beschleunigung der Elektronen durch erste positive HF-Schwingung
- fortlaufende Beschleunigung in den Schwingräumen und beschleunigungsfreies durchdringen der Kopplungsräume



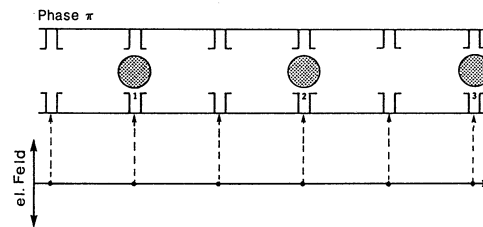
# Beschleunigung der Elektronen

## 3. Stehwellenprinzip

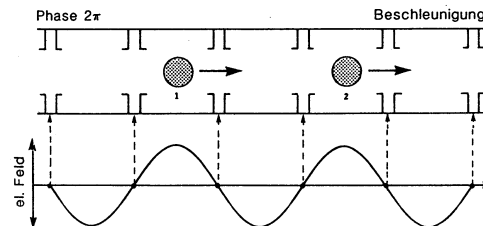


Schematische Phasenbilder im Stehwellenbeschleuniger für eine einfache Sinuswelle.

**Phase 0:** Die Elektronen befinden sich im maximal beschleunigenden, nach rechts gerichteten elektrischen Feld,



**Phase  $\pi$ :** Nulldurchgang des elektrischen Feldes, Elektronen driften mit konstanter Energie,



**Phase  $2\pi$ :** Feld ist umgepolt, Elektronen befinden sich wieder im Bereich maximaler positiver Feldstärke und werden erneut beschleunigt.

# Beschleunigung der Elektronen

## 3. Stehwellenprinzip

### Randbedingungen

- exakter Abgleich der beiden überlagerten HF-Wellen zur Erzeugung der Stehenden Welle
- exakter Abgleich der Schwingzeit und der Elektronenvorwärtsbewegung (besonders kritisch solange  $v_e \ll c$ )
- Zusätzliche elektromagnetische Fokussierung notwendig um ein Auseinanderlaufen der Elektronenbündel zu verhindern



## Beschleunigung der Elektronen

### 4. Vergleich Wander- und Stehwellenprinzip

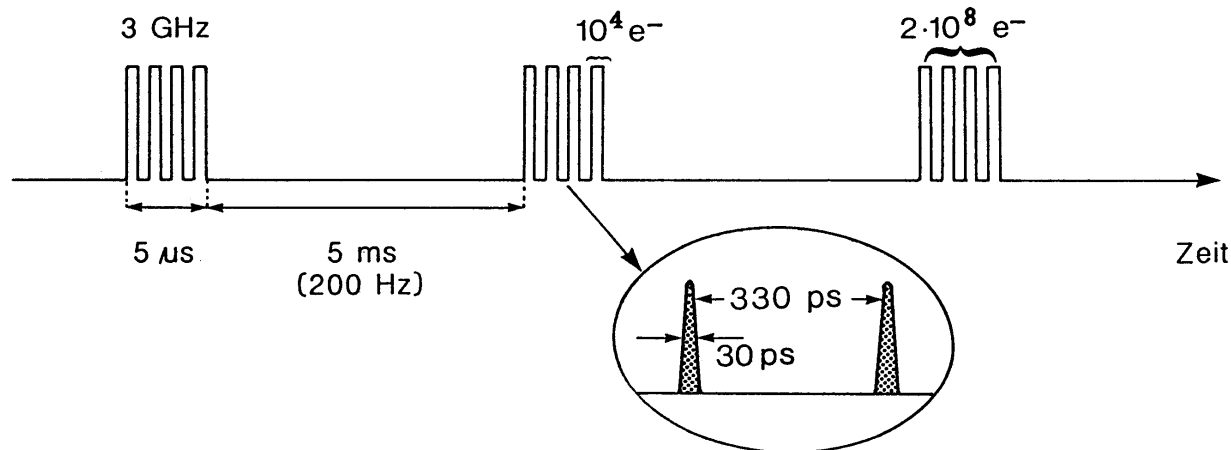
-Rohrlänge:	WW: länger SW: kürzer, kompakter
-Ausbeute	WW: grösser (35%; Bunching) SW: kleiner (10%)
-Beschleunigung/l	WW: kleiner SW: grösser
-Energieschärfe	WW: kleiner (wenige %) SW: grösser
-HF-Unschärfen	WW: unproblematisch SW: rel. Problematisch
-Vakuumanford.	WW: $< 10^{-5}$ hPa SW: $< 10^{-6} - 10^{-7}$ hPa





# Beschleunigung der Elektronen

## 5. Erzeugte Strahlenimpulse



Typische Impulsfolge von medizinischen Elektronenlinearbeschleunigern, Makropulse (Dauer  $5 \mu\text{s}$ ) setzen sich aus etwa  $2 \cdot 10^4$  Mikropulsen (Dauer je  $30 \text{ ps}$ ) zusammen, die im zeitlichen Abstand von  $330 \text{ ps}$  (entsprechend der Frequenz von  $3 \text{ GHz}$ ) aufeinander folgen. Mikropulse sind kürzer als eine halbe Schwingungsdauer der  $3 \text{ GHz}$  Schwingung, da Elektronen wegen der Phasenfokussierung nur während eines schmalen Zeitintervalls unmittelbar nach dem Wellenmaximum beschleunigt werden. Jeder Mikropuls enthält ca.  $10^4$ , ein Makropuls also  $2 \cdot 10^8$  Elektronen. Die Pulsfolgefrequenz der Makropulse beträgt typischerweise  $200 \text{ Hz}$  ( $100\text{-}400 \text{ Hz}$ ). Pulsbreite und Pausenzeit sind nicht maßstäblich gezeichnet, die angegebenen Elektronenzahlen pro Puls sind typische Werte eines Beschleunigers im Elektrotenbetrieb.

## Beschleunigung der Elektronen

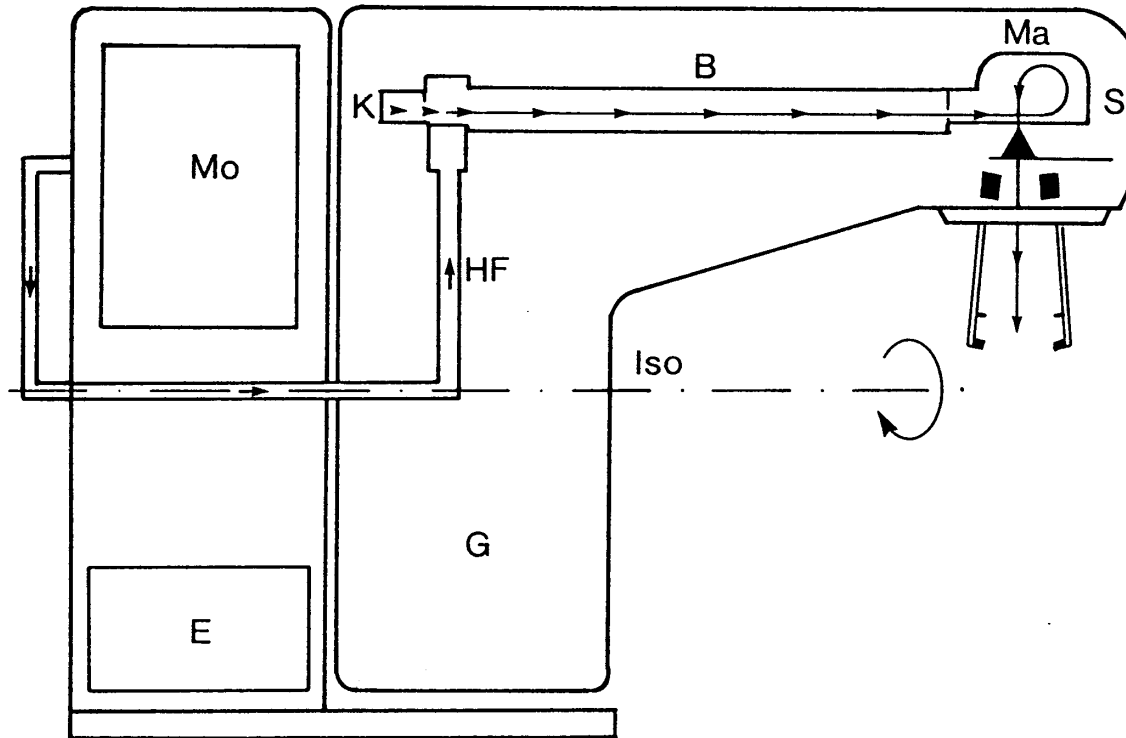
### 5. Erzeugte Strahlenimpulse

Da Elektronenkanone nur in Impulsen von  $\mu\text{s}$  Elektronen emittiert, entstehen schliesslich Strahlenimpulse von wenigen  $\mu\text{s}$  die effektiv eine zusätzliche Pulsstruktur von 3 GHz aufweisen.

Wir haben es somit immer mit einer gepulsten Strahlung zu tun.



## Strahlführung im Strahlerkopf



Prinzipieller Aufbau von Elektronenlinearbeschleunigern. Mo: Modulator, E: Energieversorgung, HF: Hochfrequenz, K: Elektronenkanone, B: Beschleunigungsrohr, Ma: Ulenkmagnet, S: Strahlerkopf, Iso: Isozentrumsachse (Drehachse der Bestrahlungsanlage), G: Gantry (Beschleunigerarm).

## Strahlerkopf

Eigenschaften des internen Elektronenstrahls

Nadelstrahl mit wenigen mm Durchmesser, in Richtung des Beschleunigerrohres (meistens horizontal) unbekannter energetischer und räumlicher Struktur (Energiespektrum, Winkelverteilung)

Aufgabe

Umwandlung des internen Elektronenstrahls in ein homogenes Bestrahlungsfeld mit bestimmter Intensität sowie vorgegebener Richtung, Form und Eindringtiefe



## Strahlerkopf

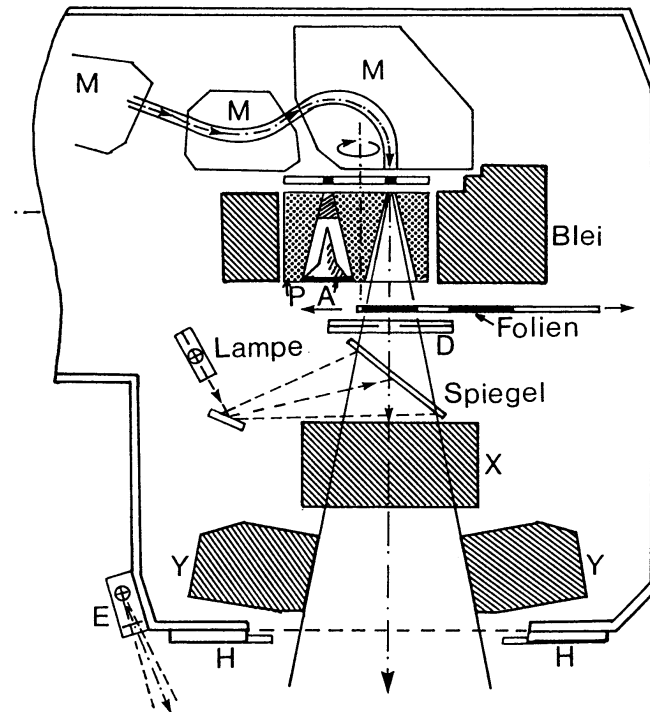
Aufbereitung des Elektronenstrahlenbündels

- **Bündelung, Fokussierung und Ablenkung,**
- **Primärkollimation,**
- **Homogenisierung,**
- **Strahlüberwachung (Lage und Symmetrie),**
- **Dosisüberwachung und Dosisleistungsregelung,**
- **Kollimierung (Feldformung).**



# Aufbereitung des Elektronenstrahlenbündels

## Strahlerkopf



Typischer Strahlerkopf eines modernen 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 Tubusse und Filter, X,Y: Kollimatorblenden, Lampe und Spiegel: Lichtvisier).

## Strahlführung

Grundlagen zur Strahlführung mit zeitlich konstanten Magnetfeldern

Lorenzkraft  $F_L$

$$\vec{F}_L = q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad \text{mit } v = \text{const}$$

Bahnradius  $r$  in einem homogenen Magnetfeld  $B$

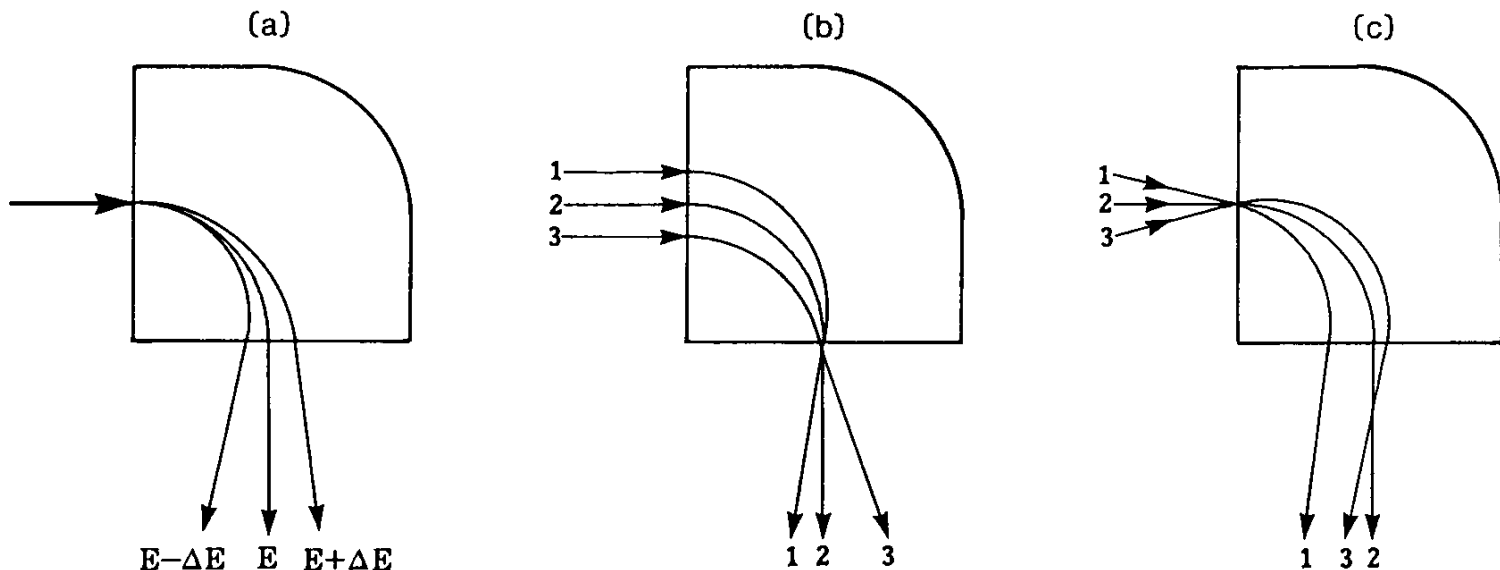
$$r = p / (q \cdot B)$$

$p$ : Impuls;  $q$ : Ladung;  $B$ : Magnetfeldstärke



## Strahlführung

Wirkung eines 90°-Umlenkmagneten mit homogenem Magnetfeld

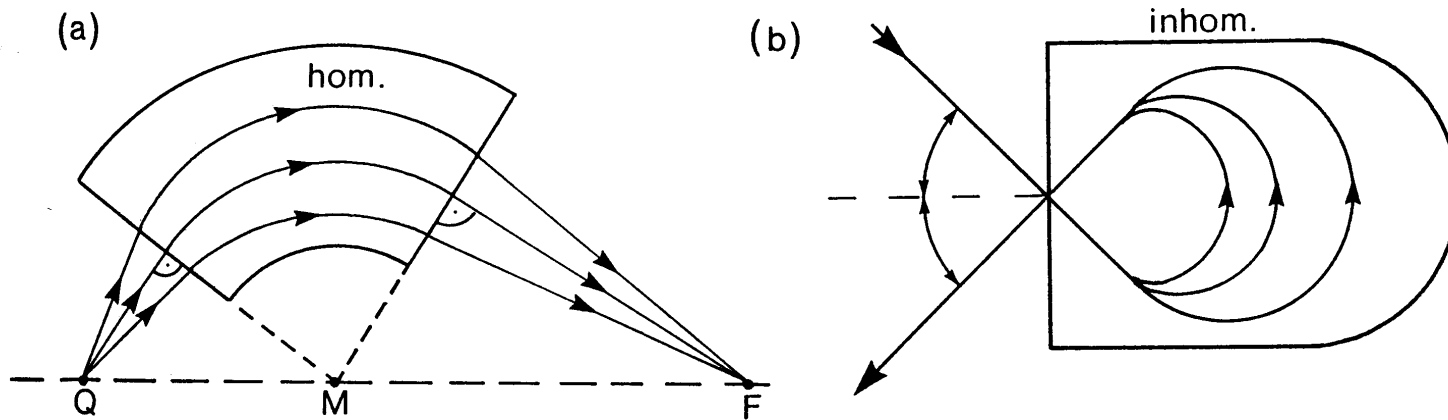


Divergierende Elektronenbahnen in homogenen 90°-Magneten, (a): axialer, nicht divergen-  
ter Nadelstrahl mit verschiedenen Elektronenenergien, (b): ausgedehnter Parallelstrahl, mo-  
noenergetisch, (c): nicht paralleler Strahl, monoenergetisch.



# Strahlführung

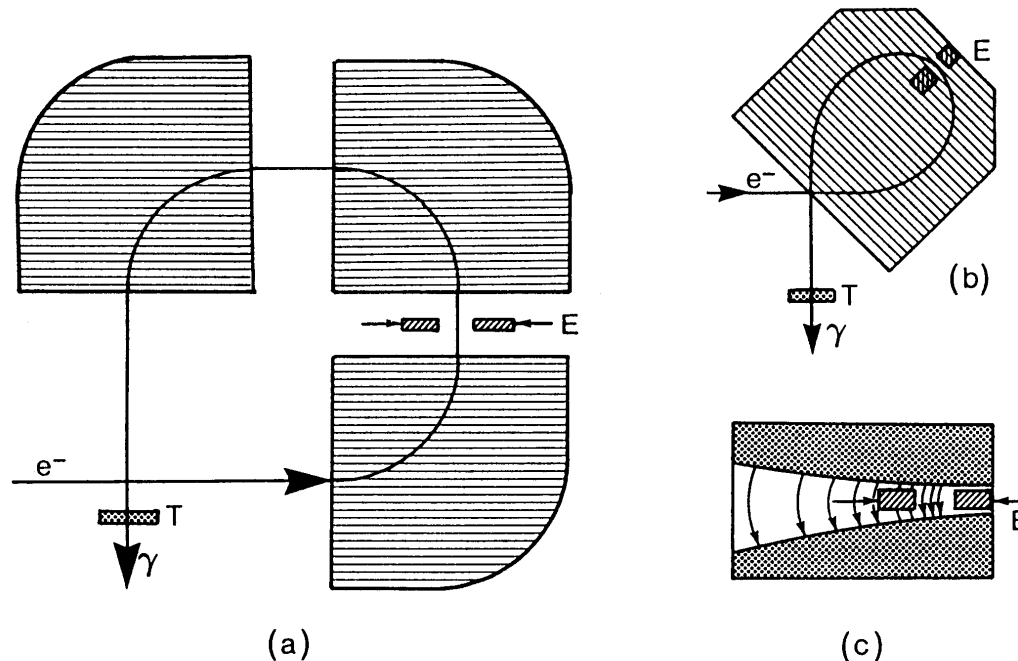
## Fokussierende Umlenkmagneten



(a): Fokussierender homogener Sektor magnet für ein divergierendes, monoenergetisches Strahlenbündel, (b): Fokussierender inhomogener 270°-Sektor magnet ("Spiegel magnet").

# Umlenkung und Fokussierung des Elektronenstrahlenbündels

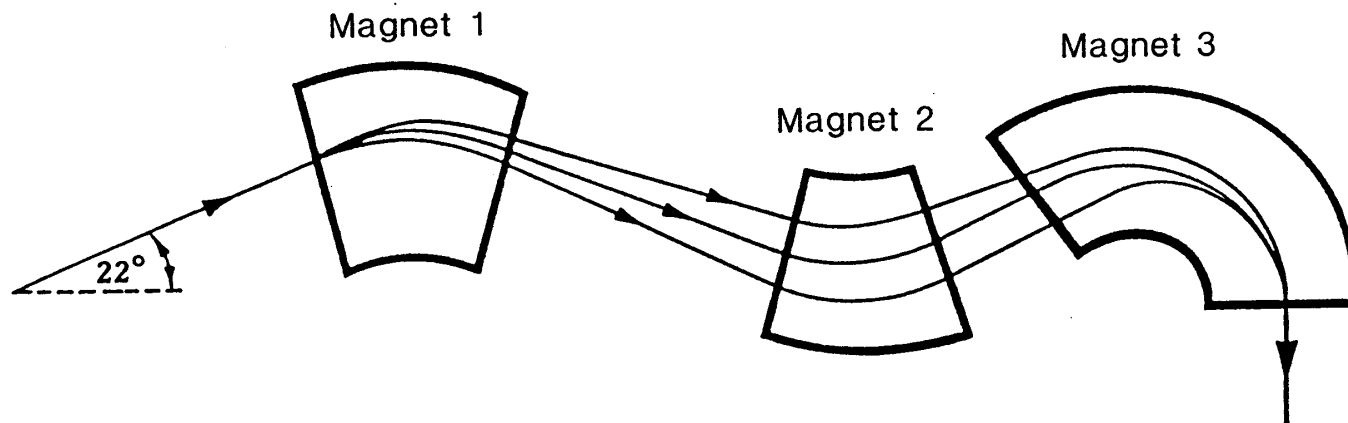
## 270°-Umlenkung



270°-Umlenkmagnete: (a): homogener 3-Sektormagnet, (b): inhomogener Spiegel-Magnet, (c): Seitenansicht von (b); (E: Energiespalt, T: Photonentarget).

# Umlenkung und Fokussierung des Elektronenstrahlenbündels

## Slalom-Magnetumlenksystem



- Kommerzielles Slalom-Umlenkmagnetsystem aus drei Sektormagneten. Die ersten beiden Magnete (1+2) lenken den Elektronenstrahl um jeweils  $45^\circ$  ab, Magnet 3 lenkt den Strahl um  $112^\circ$  nach unten. Alle drei Magnete zusammen wirken achromatisch und fokussierend.

# Homogenisierung des Elektronenstrahlenbündels

## Problemstellung

Nach Umlenkung und Fokussierung besitzt das Elektronenstrahlenbündel zwar die richtige Energieschärfe und Richtung, ist aber noch zu schmal (wenige mm breit) um therapeutisch nutzbar zu sein. Für die Applikation an Patienten werden gleichmässig „ausgeleuchtete“ Strahlenfelder benötigt. Das Strahlenbündel muss somit „aufgeweitet“ und „geglättet“ werden. Dies wird als

**Feldhomogenisierung** bzw. **Feldausgleich** bezeichnet.



# Homogenisierung des Elektronenstrahlenbündels

## Verfahren

- Streufolienverfahren
- Scanverfahren



# Homogenisierung des Elektronenstrahlenbündels

## 1. Streufolienverfahren

Elektronen werden durch dünne Folien im Strahlengang gestreut.

- Änderung der Richtung der Elektronen
- Energieverlust und Energiestraggeling
- Kontamination mit Photonen (Bremsstrahlung)



# Homogenisierung des Elektronenstrahlenbündels

## 1. Streufolienverfahren

Abhängigkeit der Streuwirkung von der Ordnungszahl der Folie

-Massenstossbremsvermögen  $S_{\text{col}} = f(Z)$

-Massenstrahlungsbremsvermögen  $S_{\text{rad}} = f(Z^2)$

-Energieverlust pro mittlerer Streuwinkel  $\Theta^2 = f(Z^2)$

$$\rightarrow S_{\text{col}}/\Theta^2 = f(1/Z)$$

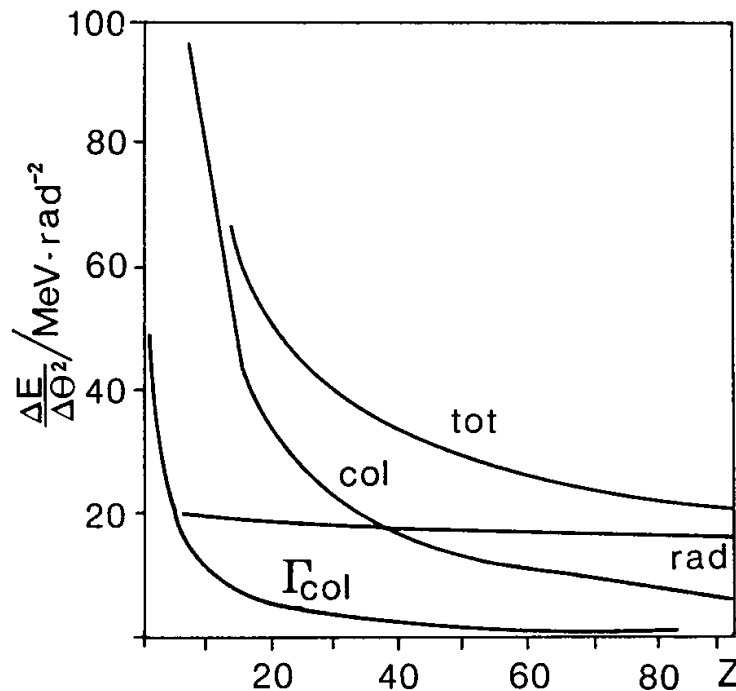
$$\rightarrow S_{\text{rad}}/\Theta^2 = \text{unabhängig von } Z$$



# Homogenisierung des Elektronenstrahlenbündels

## 1. Streufolienverfahren

Abhängigkeit der Streuwirkung von der Ordnungszahl der Folie und der Elektronenenergie



Energieverluste  $\Delta E$  bzw. Energiestraggling  $\Gamma$  bezogen auf die Einheit des mittleren Streuwinkelquadrates  $\Delta(\overline{\Theta^2})$ , nach [ICRU 35]:

$\Gamma_{\text{col}}$ : relatives mittleres Energiestraggling durch Stöße

**rad**: relative mittlere Energieverluste durch Strahlungsbremmung

**col**: relative mittlere Energieverluste durch Stoßbremmung,

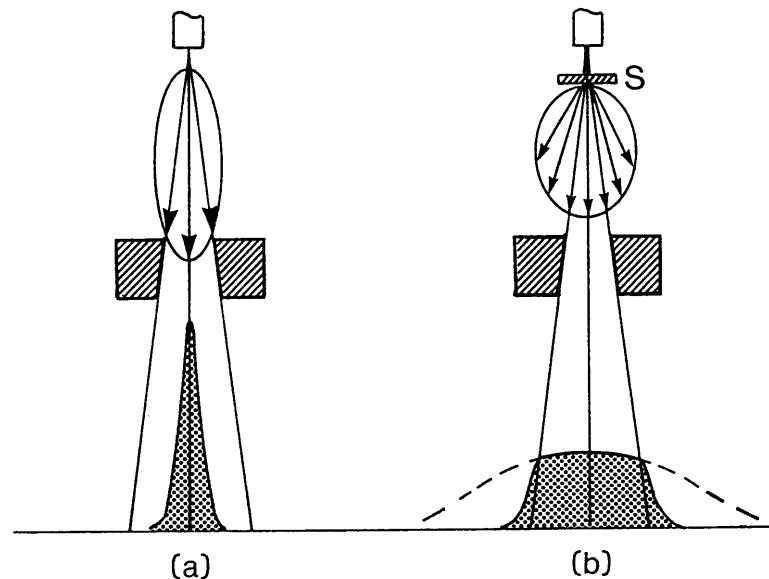
**tot**: Summe (col+rad). (Zur Erläuterung s. Text)





# Homogenisierung des Elektronenstrahlenbündels

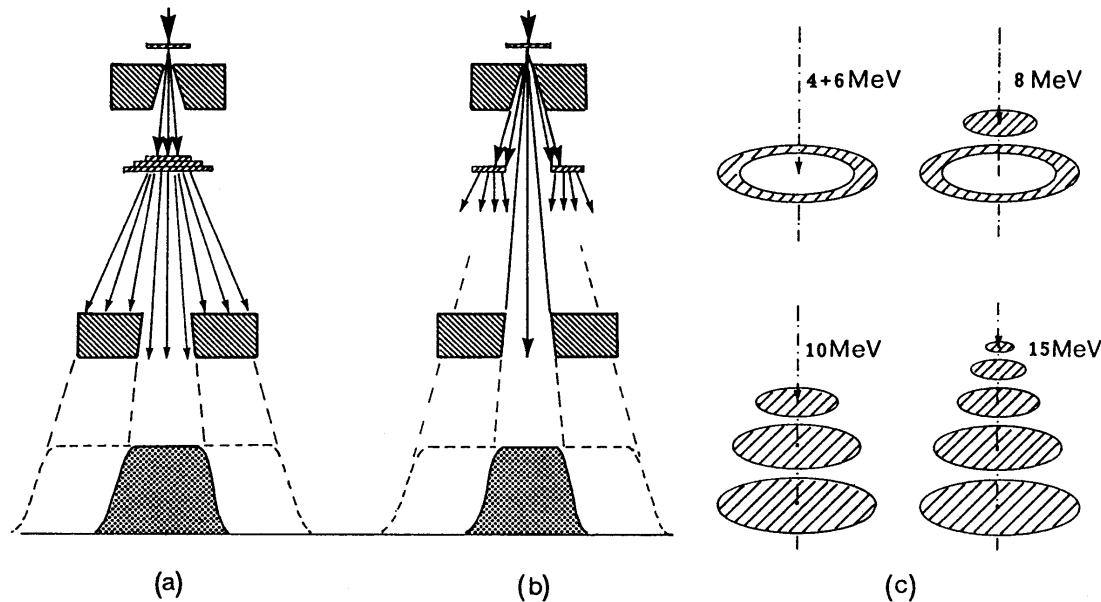
## Einfoliensysteme



Strahlquerprofile für Elektronenstrahlung. (a): Nadelstrahl ohne Streufolie, Aufstreuung nur durch Strahlrohrfenster, (b): mit einfacher Schwermetallstreufolie aufgestreuter Nadelstrahl (breites "Gaußprofil"), die Ausblendung beschränkt das Nutzstrahlenbündel auf den einigermäßen ausgeglichenen Zentralbereich.

# Homogenisierung des Elektronenstrahlenbündels

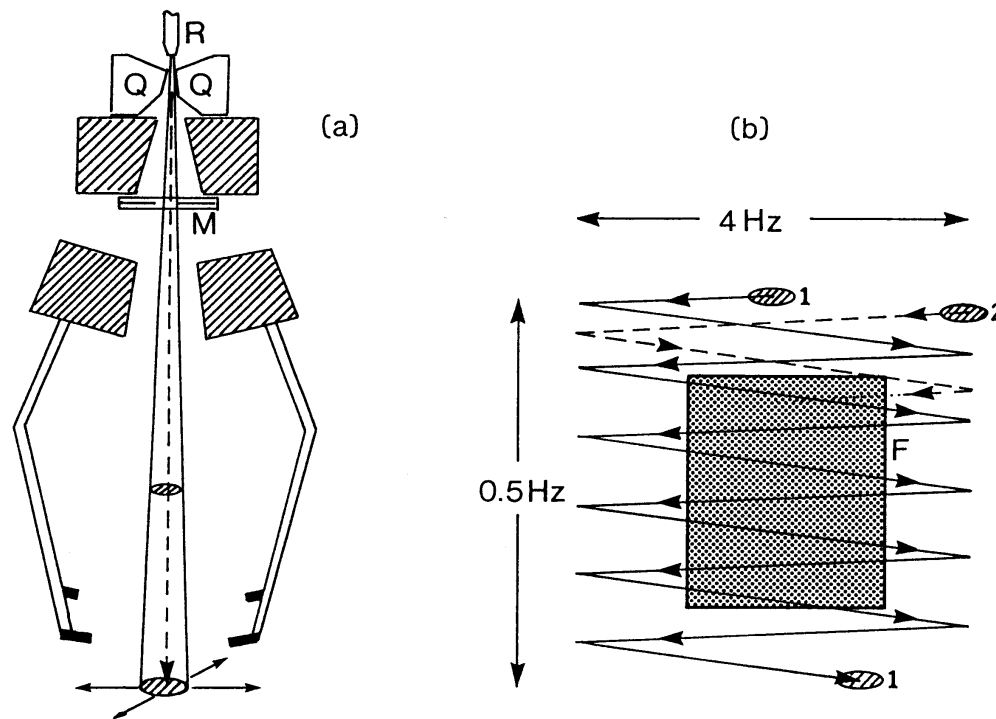
## Doppelfoliensysteme



Mehrfachstreuungsfolien zur Homogenisierung des Elektronenstrahlenbündels, (a): zentrale Sekundärfolien für hohe Energien, (b): sekundäre Ringfolie für niedrige Energien, (c): Sekundärfoliensatz für 4 verschiedene Energiebereiche eines 15-MeV-Elektronenlinearbeschleunigers aus Bleifolien von jeweils  $30\mu\text{m}$  Dicke (gemeinsame Primärfolie  $0.1\text{ mm}$  Wolfram), 4+6 MeV: einfache Ringfolie, 8 MeV: Ring- und Zentralfolie, 10+15 MeV: System von zentralen Folien.

# Homogenisierung des Elektronenstrahlenbündels

## 2. Scanverfahren



(a): Strahlscanning eines Elektronenstrahls mit Hilfe eines magnetischen Quadrupols Q (M: Monitorkammern, R: Strahlrohr), (b): zeitliche Überdeckung des Bestrahlungsfeldes durch den Scanstrahl (F: durch den Kollimator definiertes Bestrahlungsfeld, 1+2: Scanwege).

# Homogenisierung des Elektronenstrahlenbündels

## 3. Vergleich der verschiedenen Feldausgleichsmethoden

Wirkung	Eine Folie	Zwei Folien	Magnet. Scanning
Energieverlust	groß	mittel	null
Energieverschmierung	groß	mittel	null
Energieabhängigkeit	groß	klein	klein
Bremsstrahlungsanteil	< 10%	< 3%	sehr gering
Feldausgleich	mittel	sehr gut	Restwelligkeit
Feldgrößen	klein	groß	groß
Dosimetrie	normal	normal	schwierig
techn. Aufwand	klein	klein	groß
Bewegungsbestrahlung	ja	ja	nein

Vergleich der verschiedenen Feldausgleichsmethoden für Elektronenstrahlung.



# Homogenisierung des Elektronenstrahlenbündels

## Zusammenfassung:

**Zur Aufweitung und Homogenisierung des primären, nadelförmigen Elektronenstrahlenbündels können zwei Methoden angewendet werden:**

- (1) Bei der Streufolienmethode werden Schwermetallfolien für die Aufstreuung benutzt. Die Homogenisierung ist daher mit einem Verlust an mittlerer Elektronenenergie, einer Verbreiterung des Elektronenenergiespektrums und der Entstehung von Bremsstrahlung verbunden.**
- (2) Bei der berührungslosen magnetischen Aufstreuung oder Scanmethode, wird die spektrale Verteilung der primären Elektronen nicht beeinflusst. Es entsteht auch keine Bremsstrahlung durch den Feldausgleich. Der Feldausgleich hängt stark von den Scanfrequenzen ab, es besteht die Möglichkeit zur Restwelligkeit der Dosisprofile. Die Scanmethode ist technisch aufwendiger und erschwert die Dosimetrie.**



# Kollimation des Elektronenstrahls

## Problemstellung

Durch die endliche Dimension des Elektronenstrahls und durch Streuprozesse in den Primär- und Sekundärkollimatoren sowie in der Luft entstehen am Rande der Strahlenfelder grosse Halbschatten die in der Therapie nicht erwünscht sind.

Die Strahlenfelder müssen deshalb auf dem Weg von der Strahlenquelle (Streukörper) zum Patienten speziell kollimiert werden.



# Kollimation des Elektronenstrahls

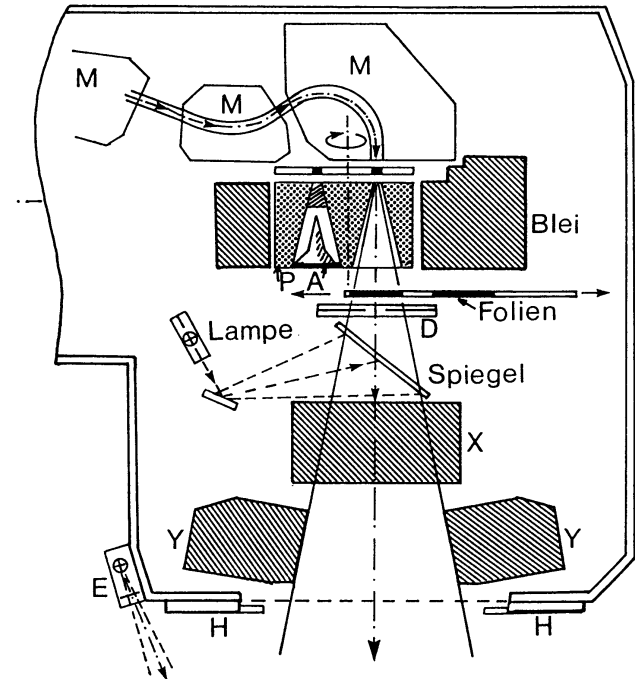
## Lösung

- unveränderlicher Primärkollimator  
(zwischen erster und zweiter Streufolie)
- Variabler Sekundärkollimator  
(für Elektronen- und Photonenstrahlungen)
- Elektronentubusse oder Elektronentrimmer



## Kollimation des Elektronenstrahls

1. unveränderlicher Primärkollimator  
(zwischen erster und zweiter Streu-  
folie)
2. Variabler Sekundärkollimator  
(für Elektronen- und Photonen-  
strahlungen)



Typischer Strahlerkopf eines modernen 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 Tubusse und Filter, X,Y: Kollimatorblenden, Lampe und Spiegel: Lichtvisier).



## Kollimation des Elektronenstrahls

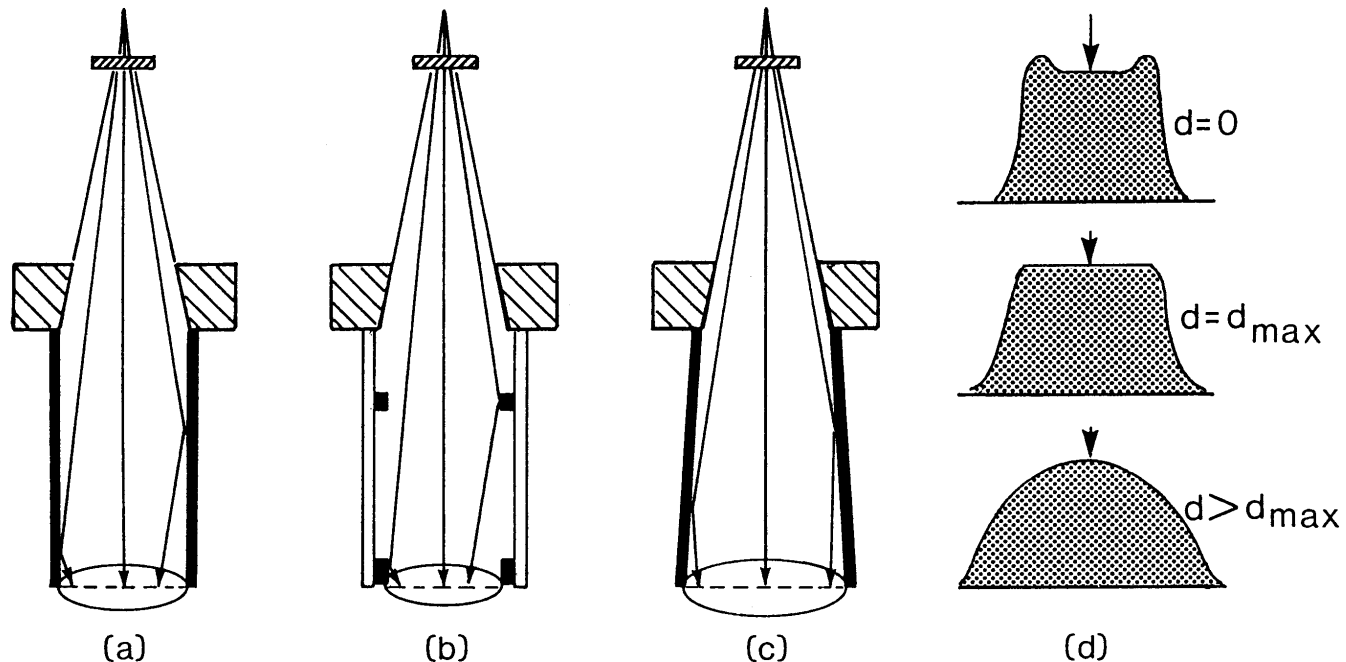
Tertiärkollimatoren für Elektronenstrahlungen

- Geschlossene und offene Elektronentubusse
- Bewegliche Elektronentrimmer



# Kollimation des Elektronenstrahls

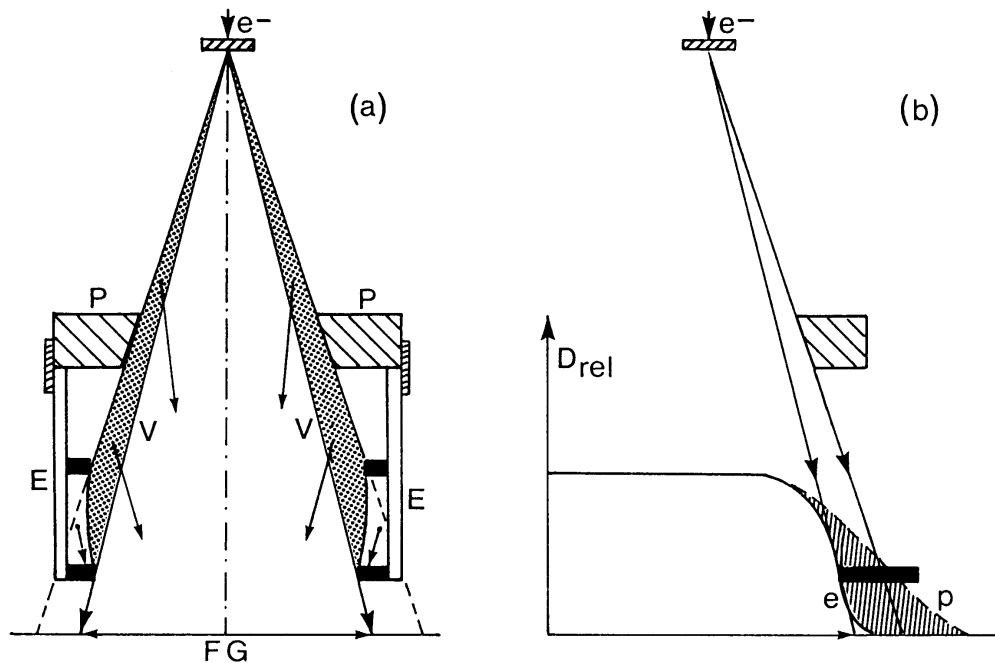
## 1. Geschlossene und offene Elektronentubusse



Kollimation des therapeutischen Elektronenstrahlenbündels mit Tubussen, (a): paralleler Schwermetalltubus, (b): paralleler Leichtmetalltubus mit Blei-Einsätzen, (c): leicht divergenter Tubus mit geringerer Aufsättigung, (d): Veränderung des Dosisquerprofils mit der Phantomtiefe durch Tubusaufsättigung bei Homogenisierung in Maximumstiefe.

# Kollimation des Elektronenstrahls

## 2. Bewegliche Elektronentrimmer



(a): Form von Elektronentrimmern mit seitlichen Luftstreuolumina (V) zur peripheren Feldaufhäufung. Die Pfeile sollen Elektronen darstellen, die in Richtung Zentralstrahl gestreut werden (P: Photonenkollimator, E: Elektronentrimmer, FG: Feldgröße für Elektronenbetrieb). (b): Wirkung der Zusatztrimmer auf das Dosisquerschnittsprofil (p: nur Photonenkollimator, e: mit Elektronentrimmern).

## Elektronentubus



COPYRIGHT © 1999 VARIAN MEDICAL SYSTEMS



# Kollimation des Elektronenstrahls

## Schlussfolgerungen

**Wegen der vielfältigen Einflüsse und Schwierigkeiten beim Design von Elektronenapplikatoren muß im therapeutischen Betrieb dringend vor unbedachten Eingriffen in die Bestrahlungsgeometrie gewarnt werden. Die Veränderung des Fokus-Haut-Abstandes, das Anbringen von zusätzlichen "klinischen" Blenden aus Schwermetall (Absorber) zur Feldgestaltung oder das Einfügen weiterer Materialien in den Strahlengang bei Elektronenstrahlung verändert in der Regel die dosimetrischen Eigenschaften des Strahlenbündels in nicht vorhersehbarer Weise. Um unliebsame Überraschungen zu vermeiden, sollte deshalb jede Änderung der Elektronenkollimation von dosimetrischen Untersuchungen begleitet sein.**





# Erzeugung von Elektronenfeldern für die perkutane Strahlentherapie

**Dr. R. Mini**