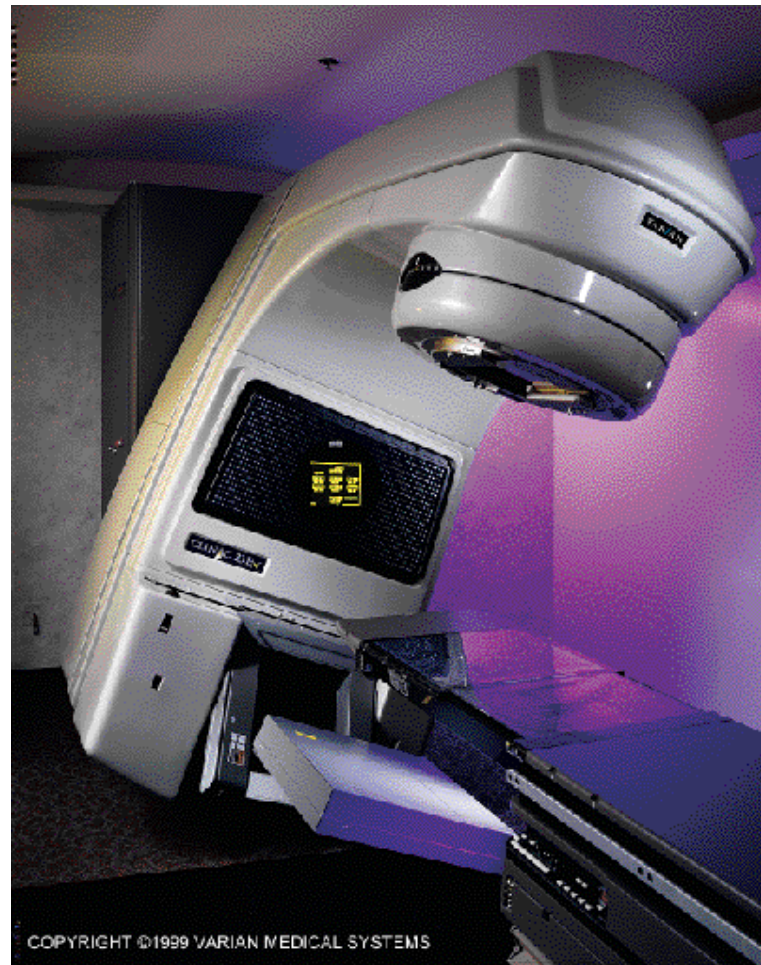




# Erzeugung von Photonenfeldern für die perkutanen Strahlentherapie

**Dr. R. Mini**

## Elektronen-Linearbeschleuniger

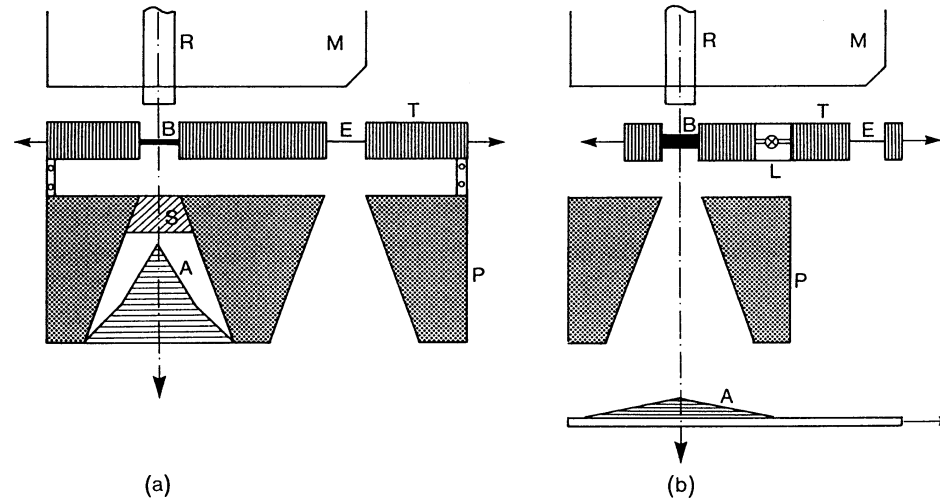


## Erzeugung von Photonenstrahlen

Für einen Photonenbetrieb muss der primäre Elektronenstrahl vorerst in hochenergetische Photonenstrahlung umgewandelt werden. Ähnlich wie bei Röntgenröhren wird hierzu der Elektronenstrahl auf ein Bremstarget aus Schwermetall geschossen. Je höher die Energie der Elektronen und je grösser die Ordnungszahl des Targets ist, um so grösser ist die Photonen- ausbeute. Dabei spielt auch die Targetdicke eine wesentliche Rolle.



## Erzeugung von Photonenstrahlen



### Bauart der „dünnen“ bzw „dicken“ Targets

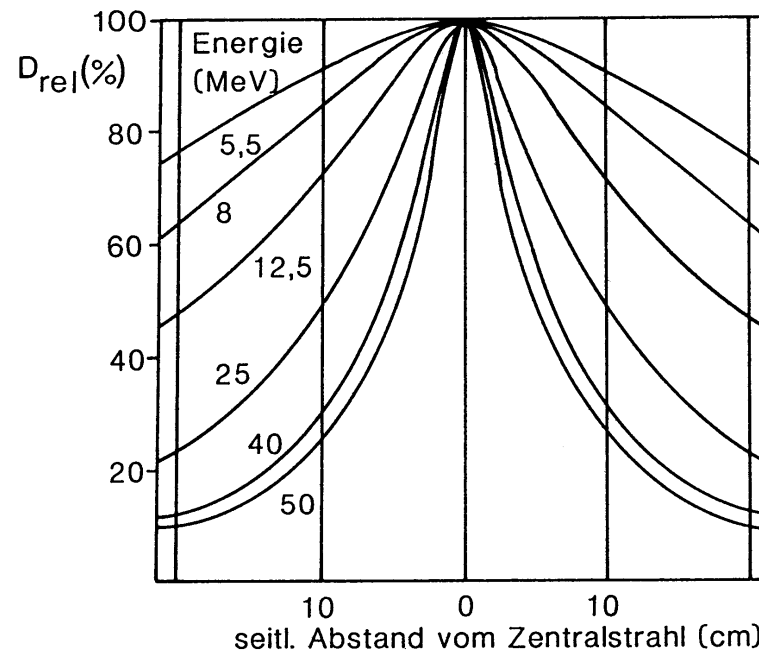
Anordnungen von Bremstargets für die Bremsstrahlungserzeugung im Strahlerkopf von Linearbeschleunigern. (R: Strahlrohr, M: Umlenkmagnet, B: Bremstarget aus Wolfram, E: Primärstreufolie für den Elektronenbetrieb, T: Targethalterung mit Anschluß an eine Wasserkühlung, P: Primärkollimator, A: Ausgleichskörper für den Photonenbetrieb, L: Lichtvisierlampe, S: Elektronenfänger).

(a): Dünnes Bremstarget: Die das Bremstarget passierenden Elektronen werden im Elektronenfänger (Beamstopper) aufgefangen, der gleichzeitig als Beamhardener verwendet wird (s. Text). Der Niedrig-Z-Ausgleichkörper ist so groß, daß er im Primärkollimator untergebracht werden muß. Primärkollimator und Targethalterung werden beim Wechsel der Strahlungsart gemeinsam verschoben.

(b): Dickes Bremstarget (Dicke = 4 mm Wolfram): Das Bremstarget befindet sich gemeinsam mit der Primärfolie für Elektronen und der Halogenlampe für das Lichtvisier auf einem verschiebbaren und wassergekühlten Kupferblock. Der Ausgleichskörper befindet sich auf einem Drehschieber unterhalb des Primärkollimators und wird beim Elektronenbetrieb durch die der Elektronenenergie angepaßten Sekundärfolien ersetzt.

## Erzeugung des Photonenstrahls

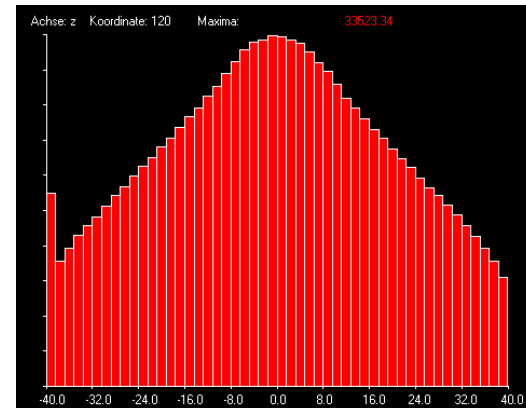
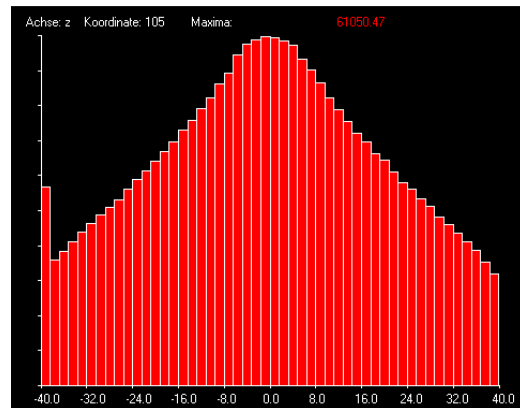
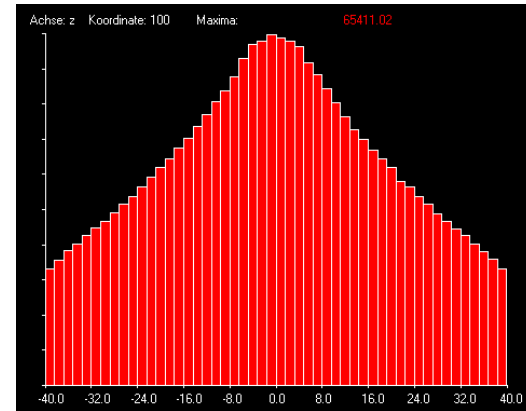
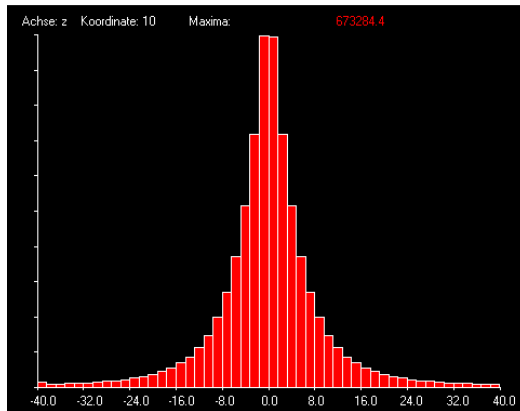
### Relatives Intensitätsquersprofil



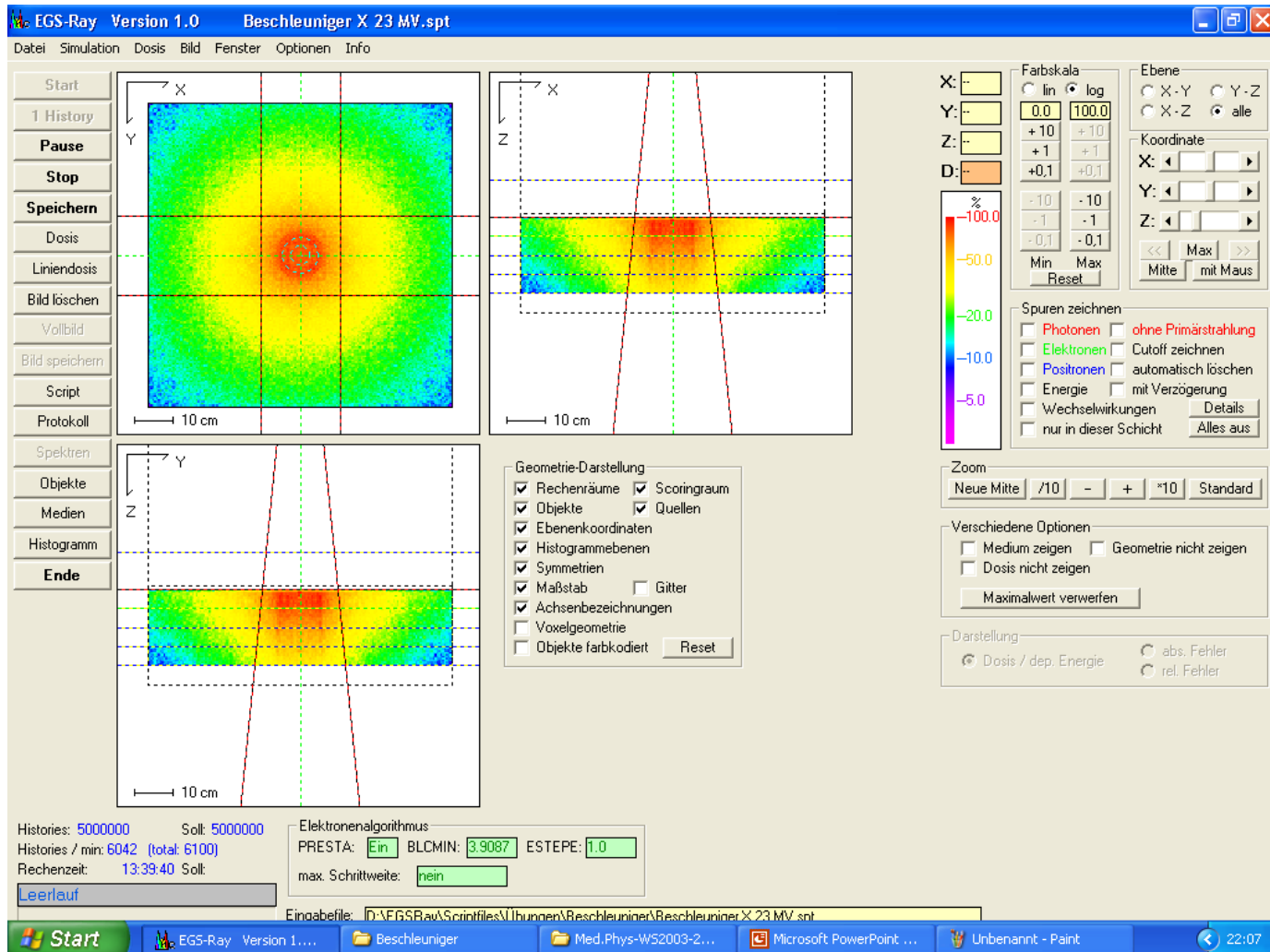
Relative Dosisquersprofile für Photonenstrahlung hinter einem Wolframbremstarget (ohne Ausgleichkörper, gemessen in 1 m Abstand vom Fokus) für verschiedene Grenzenergien zwischen 5.5 und 50 MeV. Alle Verteilungen sind auf die Dosisleistung auf dem Zentralstrahl normiert. Je höher die Elektronenenergie ist, um so schmäler ist die Intensitätsverteilung der Bremsstrahlungsphotonen.

# Photonenstrahl ohne Streufilter und Kollimatoren

## Photonenverteilung



# Photonenstrahl ohne Streufilter und Kollimatoren



## Erzeugung von Photonenstrahlen

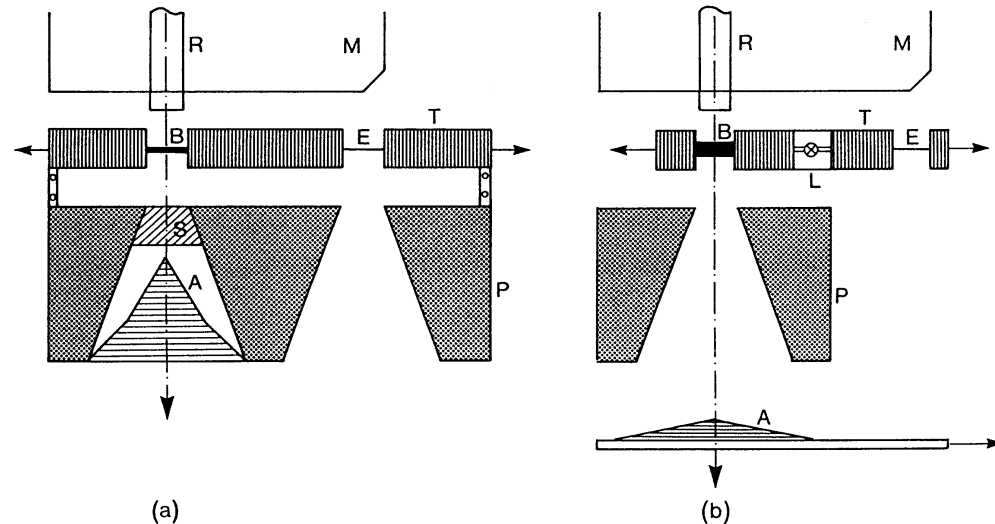
### Vergleich dünne und dicke Targets

Mittlere Photonenenergie	dünne: grösser dicke: kleiner
Ausbeute	dünne: kleiner dicke: grösser
Elektronenfänger	dünne: ja dicke: nein
Kühlungsaufwand	dünne: klein dicke: gross





## Erzeugung von Photonenstrahlen



## Homogenisierung der Photonenstrahlung

Anordnungen von Bremstargets für die Bremsstrahlungserzeugung im Strahlerkopf von Linearbeschleunigern. (R: Strahlrohr, M: Umlenkmagnet, B: Bremstarget aus Wolfram, E: Primärstreufole für den Elektronenbetrieb, T: Targethalterung mit Anschluß an eine Wasserkühlung, P: Primärkollimator, A: Ausgleichskörper für den Photonenbetrieb, L: Lichtvisierlampe, S: Elektronenfänger).

(a): Dünnes Bremstarget: Die das Bremstarget passierenden Elektronen werden im Elektronenfänger (Beamstopper) aufgefangen, der gleichzeitig als Beamhardener verwendet wird (s. Text). Der Niedrig-Z-Ausgleichkörper ist so groß, daß er im Primärkollimator untergebracht werden muß. Primärkollimator und Targethalterung werden beim Wechsel der Strahlungsart gemeinsam verschoben.

(b): Dickes Bremstarget (Dicke = 4 mm Wolfram): Das Bremstarget befindet sich gemeinsam mit der Primärfole für Elektronen und der Halogenlampe für das Lichtvisier auf einem verschiebbaren und wassergekühlten Kupferblock. Der Ausgleichkörper befindet sich auf einem Drehschieber unterhalb des Primärkollimators und wird beim Elektronenbetrieb durch die der Elektronenenergie angepaßten Sekundärfohlen ersetzt.

## Homogenisierung der Photonenstrahlen

### Wirkungen des Photonenausgleichskörpers

- Ausgleich der Strahlintensität durch bevorzugte Erniedrigung der Gesamtintensität des Photonenstrahls um einen Faktor 2-10 im Feldzentrum
- Erniedrigung der mittleren Photonenenergie durch Compton-WW und Paarbildung
- Erhöhung der mittleren Energie des Photonenstrahles durch Absorption (Aufhärtung)
- Kontamination des Photonenstrahles mit Sekundärelektronen
- bei  $E_{ph} > 10$  MeV: Kontamination des Photonenstrahles mit anderen Sekundärteilchen (Neutronen)



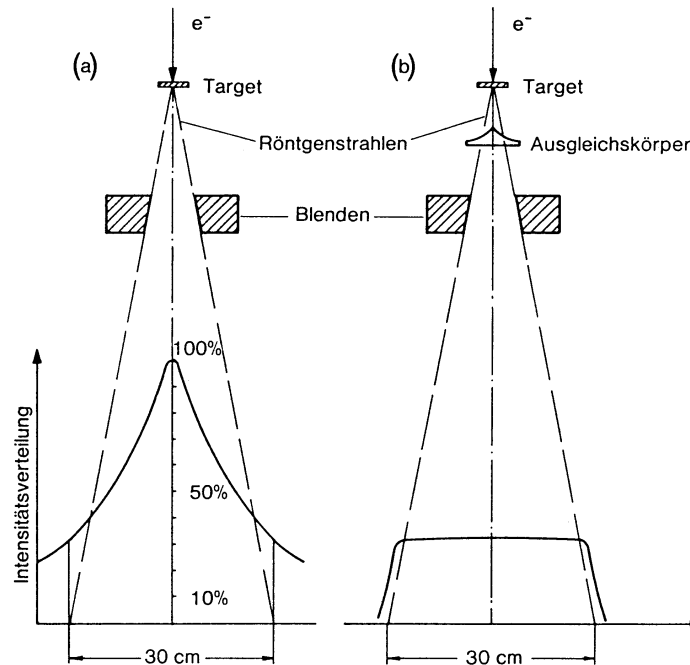
## Kernphotoreaktionen

Reaktion	Schwelle (MeV)	Tochternuklid	Zerfallsart	T <sub>1/2</sub>	E <sub>γ</sub> (keV)
<sup>12</sup> C(γ,n)	18.7	<sup>11</sup> C*	β+,EC	20.4 min	511
<sup>14</sup> N(γ,n)	10.5	<sup>13</sup> N*	β+	9.96 min	511
<sup>16</sup> O(γ,n)	15.68	<sup>15</sup> O*	β+,EC	122 s	511
<sup>16</sup> O(γ,2n)	28.9	<sup>14</sup> O*	β+,γ	70.6 s	511,2313
<sup>27</sup> Al(γ,n)	12.7	<sup>26</sup> Al*	β+,EC,γ	6.4 s	511,1810
<sup>63</sup> Cu(γ,n)	10.8	<sup>62</sup> Cu*	β+,EC	9.73 min	511
<sup>208</sup> Pb(γ,n)	7.9	<sup>207</sup> Pb	stabil	-	-
<sup>12</sup> C(γ,p)	16.0	<sup>11</sup> B	stabil	-	-
<sup>16</sup> O(γ,p)	12.1	<sup>15</sup> N	stabil	-	-
<sup>27</sup> Al(γ,p)	8.3	<sup>26</sup> Mg	stabil	-	-
<sup>63</sup> Cu(γ,p)	6.1	<sup>62</sup> Ni	stabil	-	-
<sup>208</sup> Pb(γ,p)	8.0	<sup>207</sup> Tl*	β-	4.8 min	-

Tab. 4.1: Reaktions- und Zerfallsdaten für Kernphotoreaktionen an einigen für die Radiologie wichtigen Materialien. \*:radioaktives Tochternuklid.

# Homogenisierung der Photonenstrahlen

## Wirkung des Photonenausgleichskörpers



Wirkung eines Ausgleichskörpers auf das Strahlquerschnittsprofil im Photonenbetrieb, (a): relatives Intensitätsquerschnittsprofil ohne Ausgleichskörper, gemessen in 1 m Abstand vom Target für 25-MeV-Photonenstrahlung, (b) durch Ausgleichskörper homogenisiertes Querschnittsprofil. Innerhalb der therapeutischen Feldbreite ist das Profil homogen und symmetrisch.

## Homogenisierung der Photonenstrahlen

### Auswahl des Materials beim Bau von Photonenausgleichskörper

Ausgleichskörper aus Materialien mit hoher Ordnungszahl  $Z$  erzeugen „weichere“ Photonenspektren

- mehrfach Comptenstreuung
- grosser Anteil Paarbildung:  $15 \text{ MeV} \rightarrow 80\%$   
(Annihilationsstrahlung  $511 \text{ keV}$ )

Ausgleichskörper mit kleinem  $Z$  sind wesentlich grösser und führen besonders im Zentrum zu einer Aufhärtung des Photonenstrahles; die Energieverteilung zum Feldrand hin ändert spürbar. Zudem werden solche Ausgleichskörper derart gross, dass sie kaum im Beschleunigerkopf Platz finden. Auch verschlechtern sie die Strahlgeometrie (Fokusgrösse und Ort).



## Homogenisierung der Photonenstrahlen

### Weitere Problemstellungen beim Bau von Photonenausgleichskörper

Kontamination des Photonenstrahlen mit sekundären Compton-Elektronen

- Erhöhung der Hautbelastung
- Verkürzung der Dosismaximuntiefe

Erzeugung schwerer Sekundärteilchen

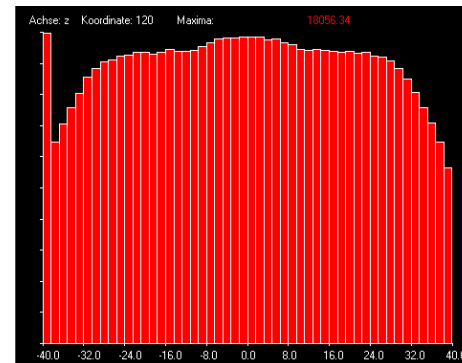
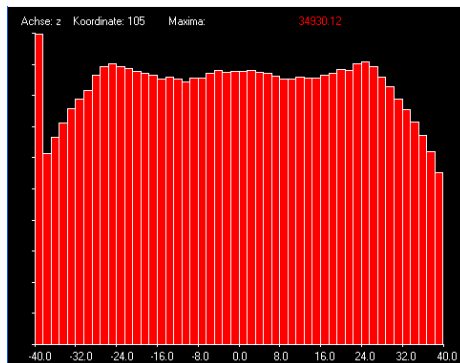
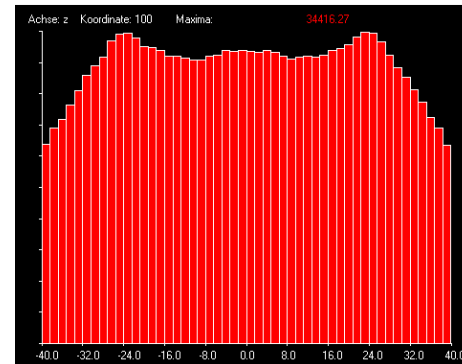
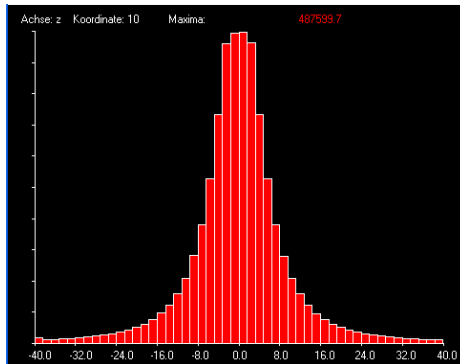
Bei ultraharter Photonenstrahlung ( $E_{ph} > 10 \text{ MeV}$ ) können durch Kernphotoeffekte Teile im Strahlerkopf aktiviert werden und schwere Sekundärteilchen emittieren (Schwelleenergie von  $\text{Cu}(\gamma, n)$ -Reaktionen = 10.8 MeV)

- Strahlenschutzprobleme bei Wartungen
- Strahlenschutzprobleme beim Personal

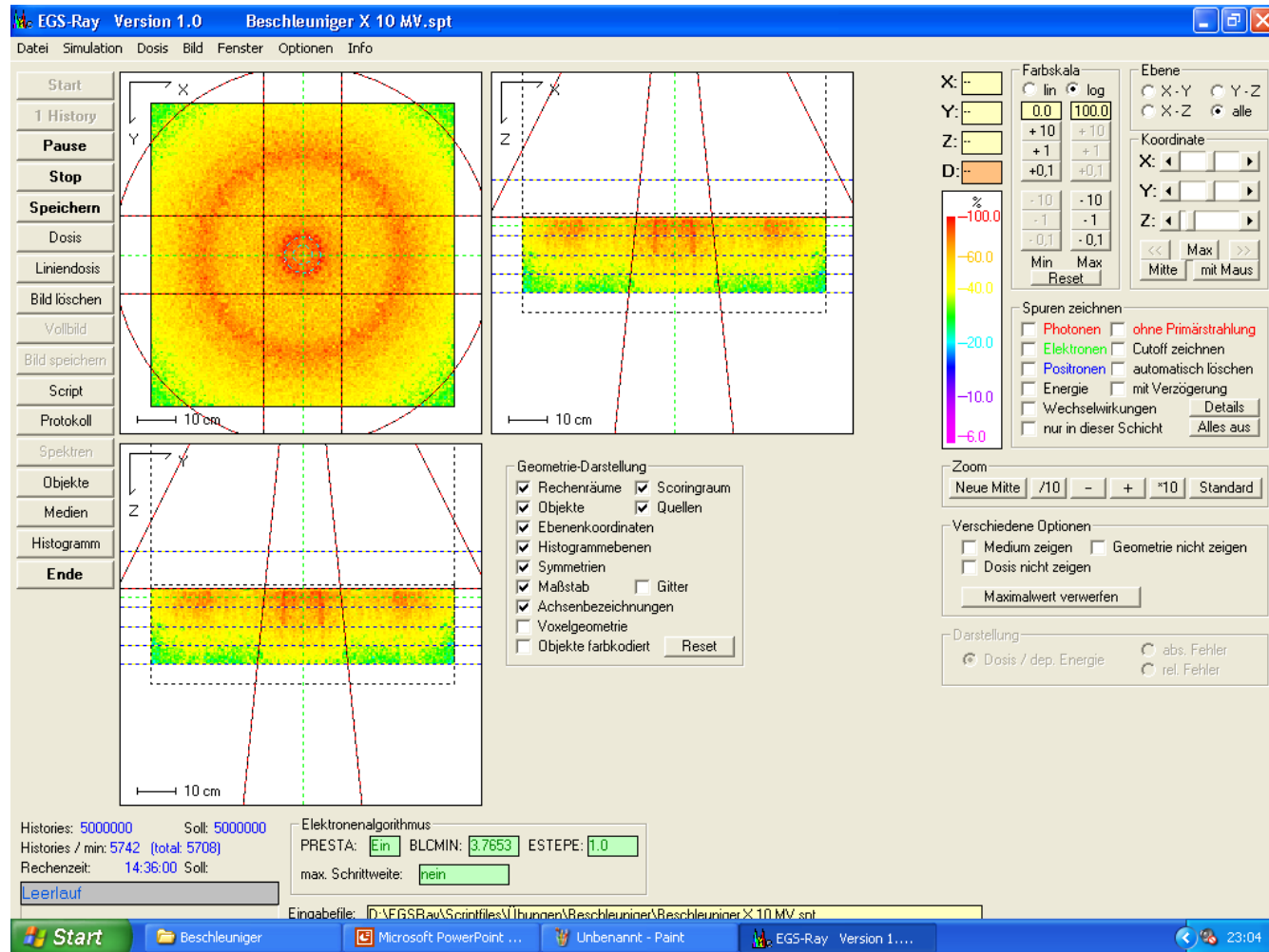


# Photonenstrahl mit Streufilter aber ohne Kollimator

## Photonenverteilung



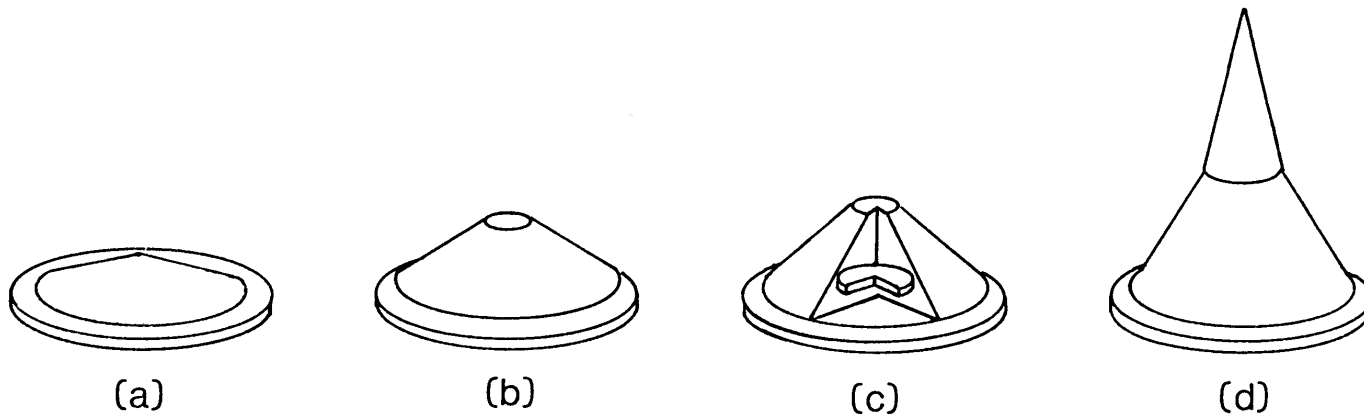
# Photonenstrahl mit Streufilter aber ohne Kollimatoren





## Homogenisierung der Photonenstrahlen

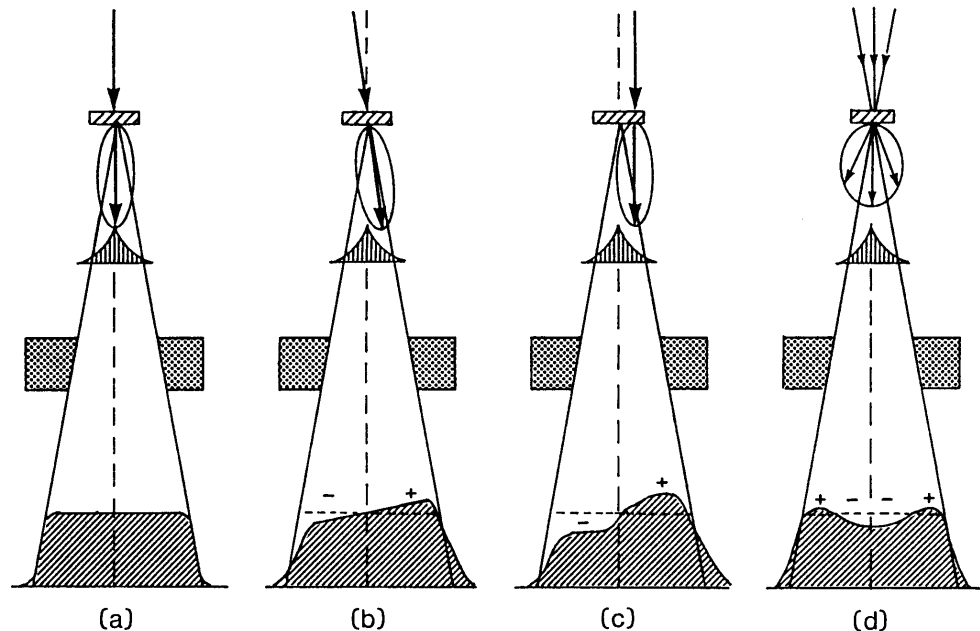
### Photonenausgleichskörper



Technische Ausführungen von Photonenausgleichskörpern, (a): Blei für niedrige Energien, (b): Blei oder Wolfram für Energien bis 15 MeV, (c): Eisen mit Bleikern für 25-MeV-Photonen, (d): Niedrig-Z-Ausgleichskörper aus Aluminium oder Stahl für hohe Energien.

## Homogenisierung der Photonenstrahlen

Der Photonenausgleich ist kritisch bezüglich geometrischer und spektraler Ungenauigkeiten



Wirkung der Fehllage des Elektronenstrahls auf den Feldausgleich im Photonenbetrieb.

(a): Korrekte Strahlrichtung und Divergenz, (b): Strahl geneigt, (c): Strahl versetzt, (d): Strahl zu divergent oder mit zu geringer Energie.

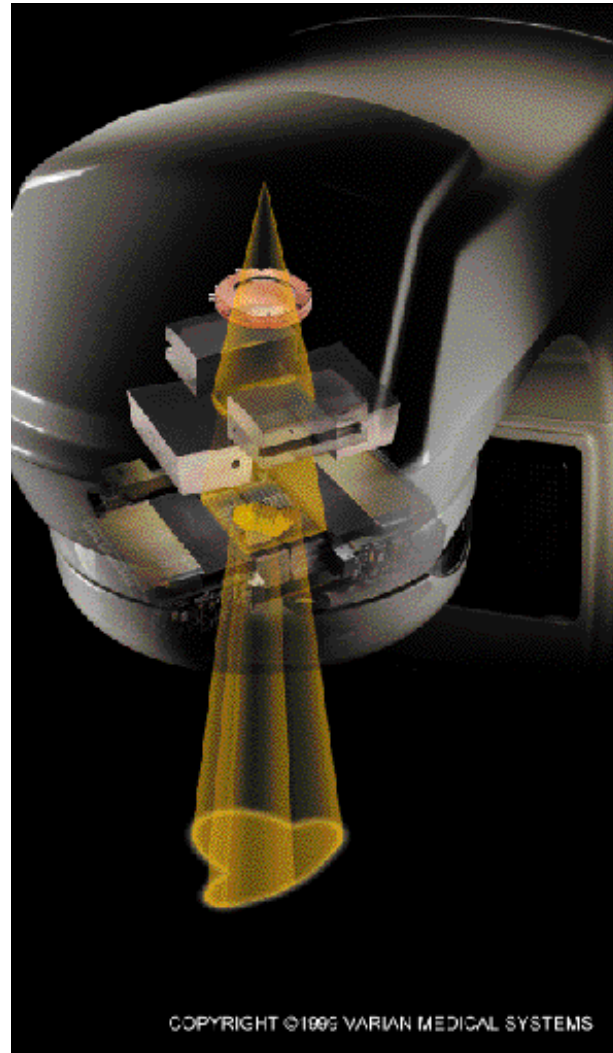
# Kollimation des Photonenstrahlenbündels

## Kollimatorsysteme

- Konventionelle Kollimatoren
- Lamellenkollimatoren

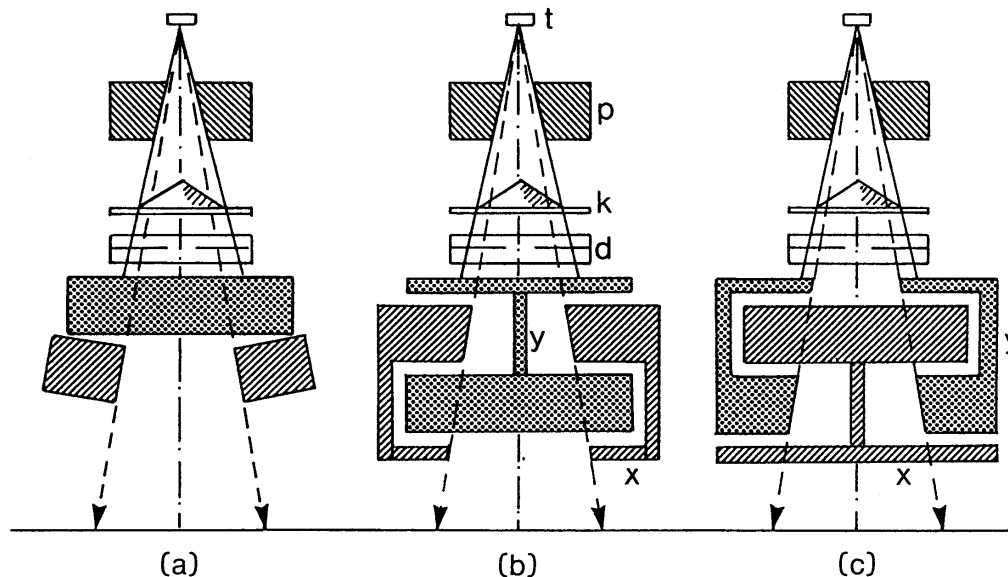


## Kollimation von Photonenfelder



# Kollimation des Photonenstrahlenbündels

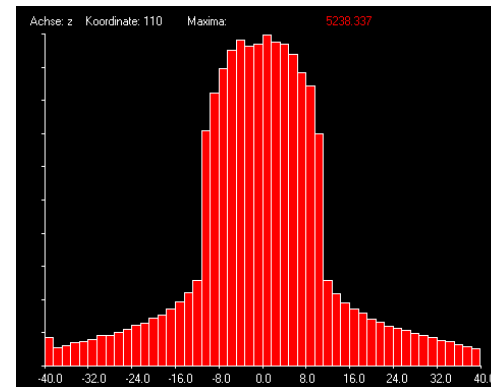
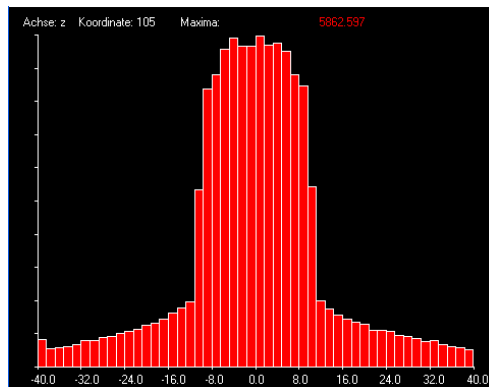
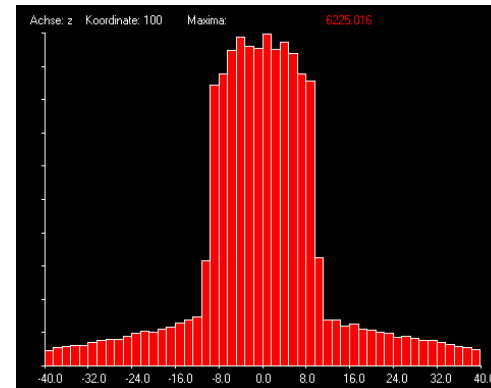
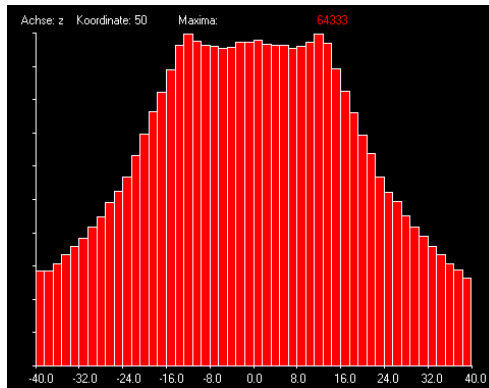
## Konventionelle Kollimatoren



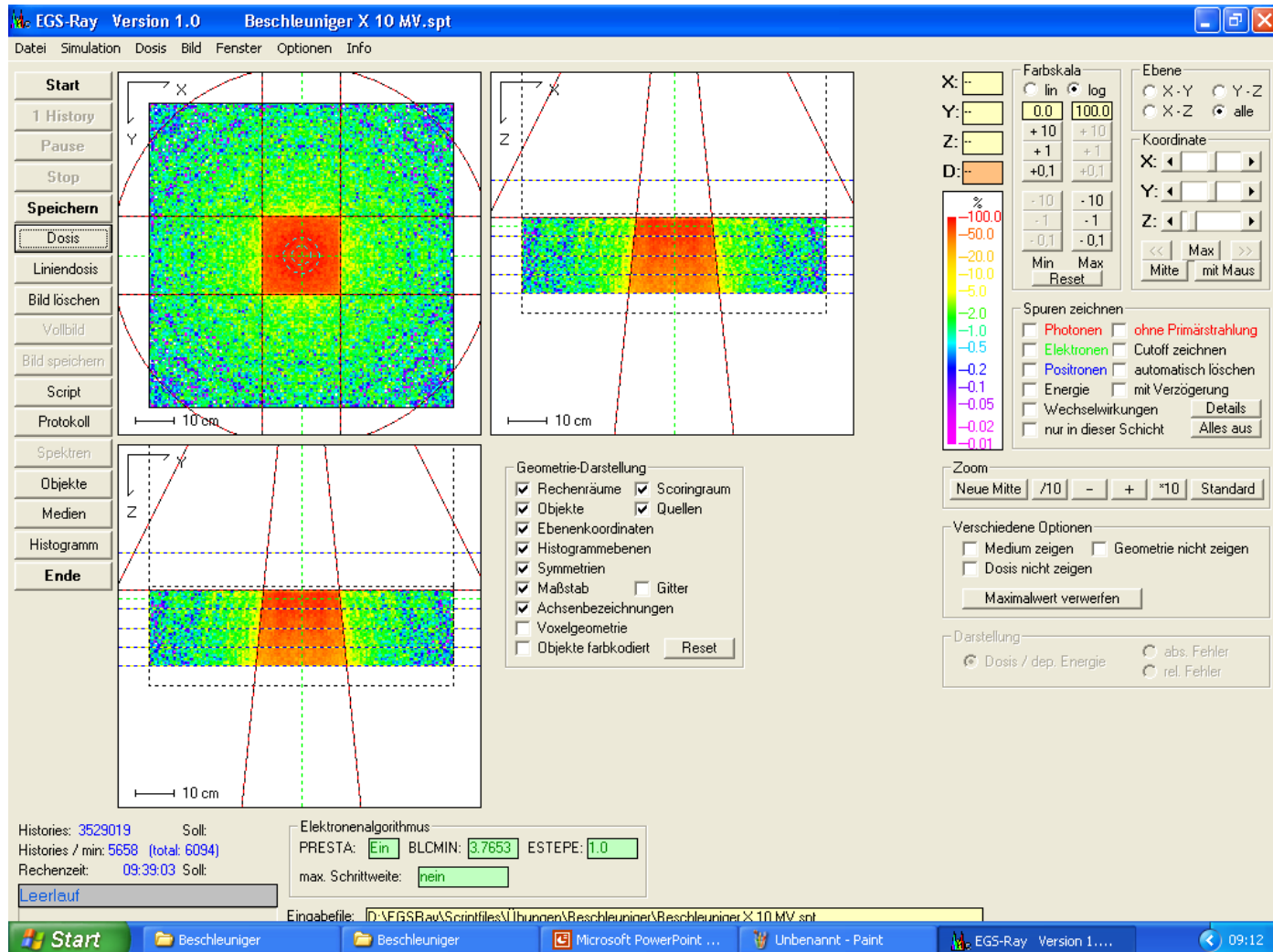
Technische Ausführungen konventioneller Photonenkollimatoren (t: Bremstarget, p: Primärkollimator, k: Ausgleichskörper, d: Doppelmonitor, x,y: Halbblenden). (a): Versetzte, übereinander angeordnete Halbblenden. Die obere Halbblende befindet sich normalerweise außerhalb der Zeichenebene, sie ist hier aber mit eingezeichnet, um die relative Anordnung zu kennzeichnen. Sie bewegt sich beim Öffnen oder Schließen senkrecht zur Zeichenebene. (b): Überlappende, ineinander greifende Halbblenden, y-Blende außerhalb der Zeichenebene (vgl. (a)). (c): Wie (b), um 90° gedreht, x-Blende außerhalb der Zeichenebene.

# Photonenstrahl mit Streufilter und Kollimatoren

## Photonenverteilung

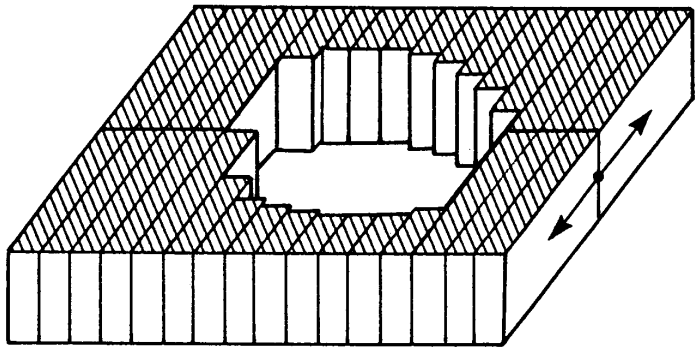


# Photonenstrahl mit Streufilter und Kollimatoren

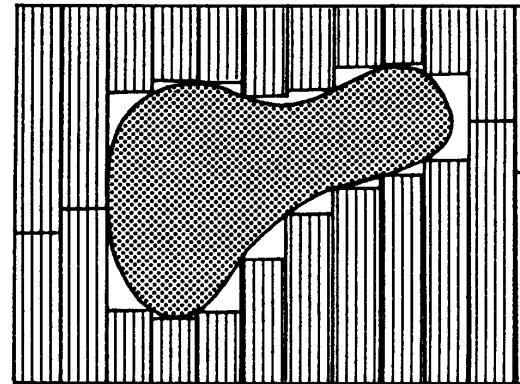


## Kollimation des Photonenstrahlenbündels

### Lamellenkollimatoren



(a)

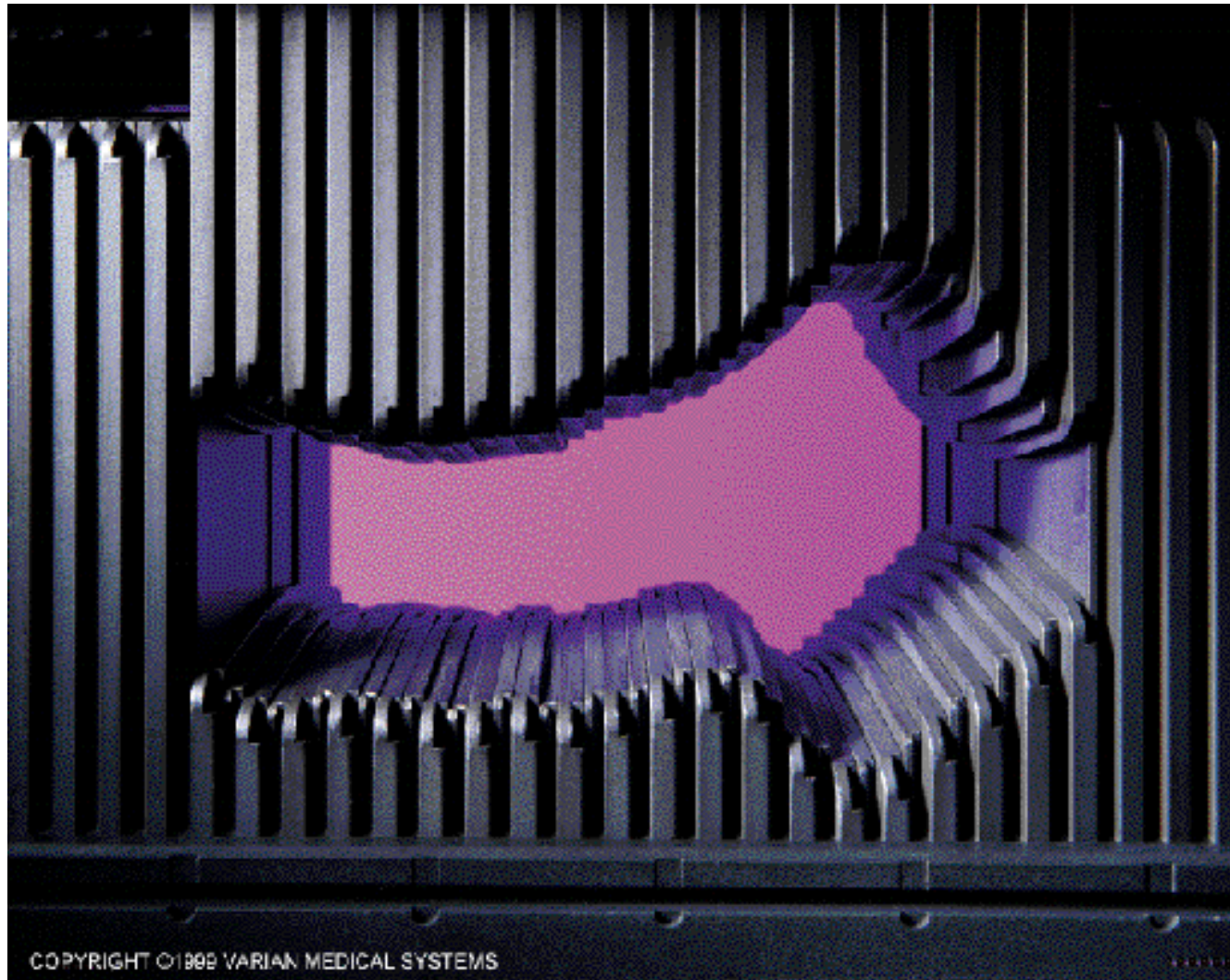


(b)

(a): Prinzip des Lamellenkollimators (aus Darstellungsgründen nicht konvergierend gezeichnet). (b): Anpassung der Lamellenpositionen an das Zielvolumen. Die Abbildung zeigt nur den zentralen Ausschnitt der Kollimatorlamellen. Die Lamellen stehen tatsächlich je nach Öffnung nach außen über, da sie alle die gleiche Länge haben.

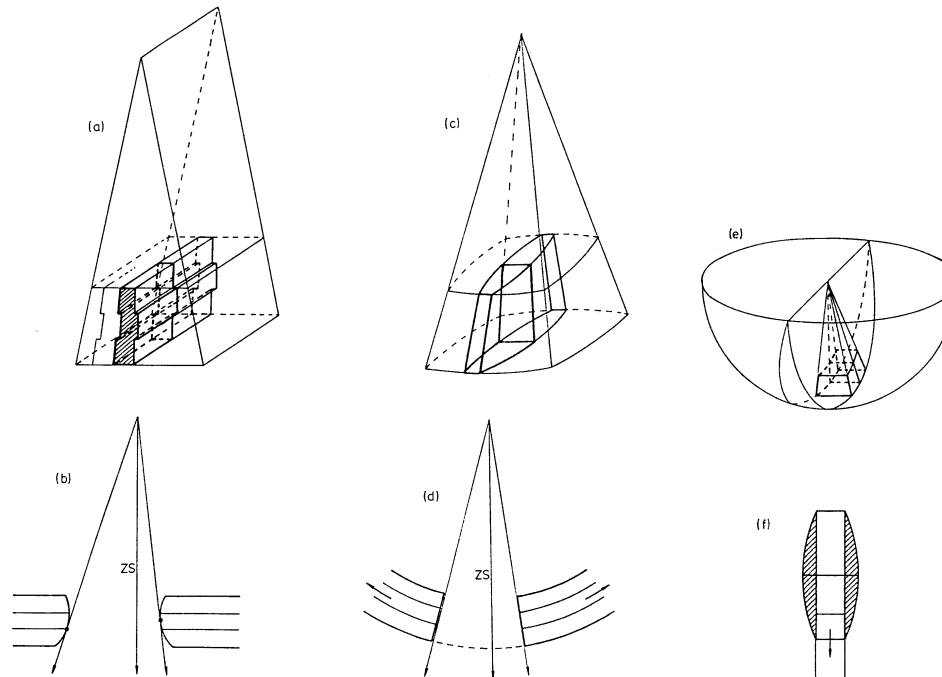


## Lamellenkollimatoren



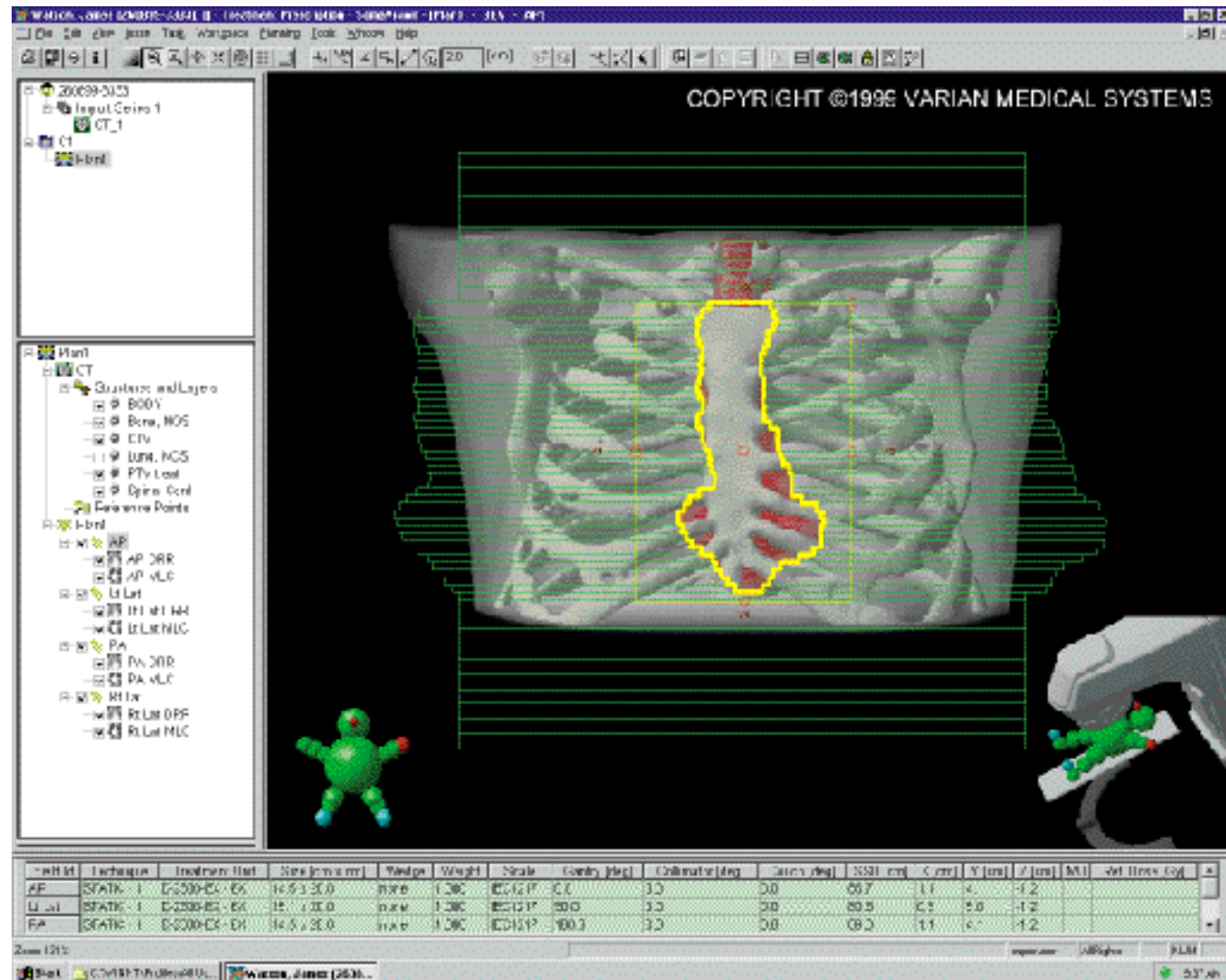
# Kollimation des Photonenstrahlenbündels

## Lamellenkollimatoren



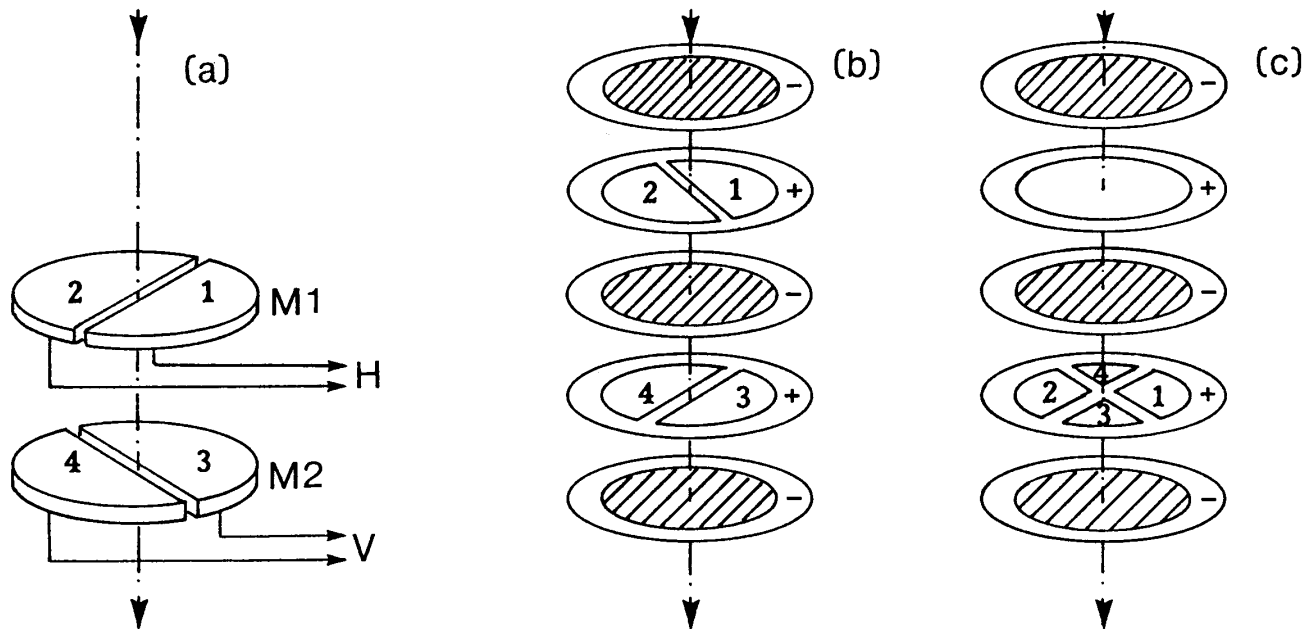
(a): Einfach konvergierender Lamellenkollimator mit gestuften Seitenflanken zur Transmissionsverbesserung. (b): Gerundete Vorderflanken beim Kollimator nach a. (c): Theoretisch erwünschte Lamellenform eines doppelfokussierten Kollimators. (d): Fokussierte Vorderflanke der Lamellen nach c. (e): Orangenscheibenmodell einer doppelfokussierten Einzella-melle. (f): Aufsicht zu e. Da beim Verschieben einer Lamelle der verfügbare Platz durch Nachbarlamellen benötigt wird, müssen die Lamellen auf die der weitesten Verschiebung entsprechende Breite reduziert werden. Dies führt zu einer erhöhten, lageabhängigen Transmission zwischen den Lamellen.

# Lamellenkollimatoren



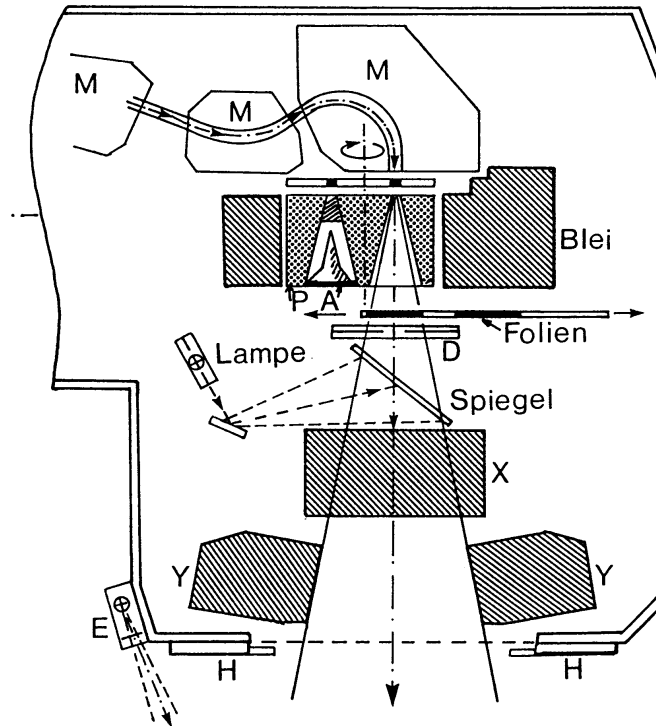
## Monitorsysteme

### Doppeltes Durchstrahl-Ionisationskammer-System



Doppelmonitorsystem eines Beschleunigers für die Medizin, (a): Prinzip (M1, M2: Monitor 1+2, H: Horizontal-, V: Vertikalsteuersignale), (b,c): einfache technische Ausführungen.

## Einfluss der Kollimatoren auf die Monitorkammern



Typischer Strahlerkopf eines modernen medizinischen Elektronen-Linearbeschleunigers. (M: Slalom-Magnete für die Strahlumlenkung, D: Doppeldosismonitor, P: Primärkollimator, A: Photonausgleichskörper mit vorgeschaltetem Beamhardener und Elektronenfänger, Folien: Ausgleichsfolien für Elektronen, E: Entfernungsmesser, H: Halter für Tubusse und Filter, X,Y: Kollimatorblenden, Lampe und Spiegel: Lichtvisier).



## Modulation der Photonenfelder

Um Gewebedefizite zu kompensieren oder Dosisüberhöhungen zu vermeiden wurden seit je die Photonenfelder mit verschiedenen Absorbern moduliert. Hierzu gehören Keilfilter, Blöcke, Moulagen und patientenspezifische Ausgleichskörper.

Die Entwicklung dynamischer Lamellenkollimatoren ermöglichte die Einführung von dynamisch intensitäts-modulierten Bestrahlungstechniken IMRT. Diese Technik ist Voraussetzung um die resultierenden Strahlenfelder einer inversen Planoptimierung im klinischen Alltag zu realisieren.



## Modulation der Photonenfelder

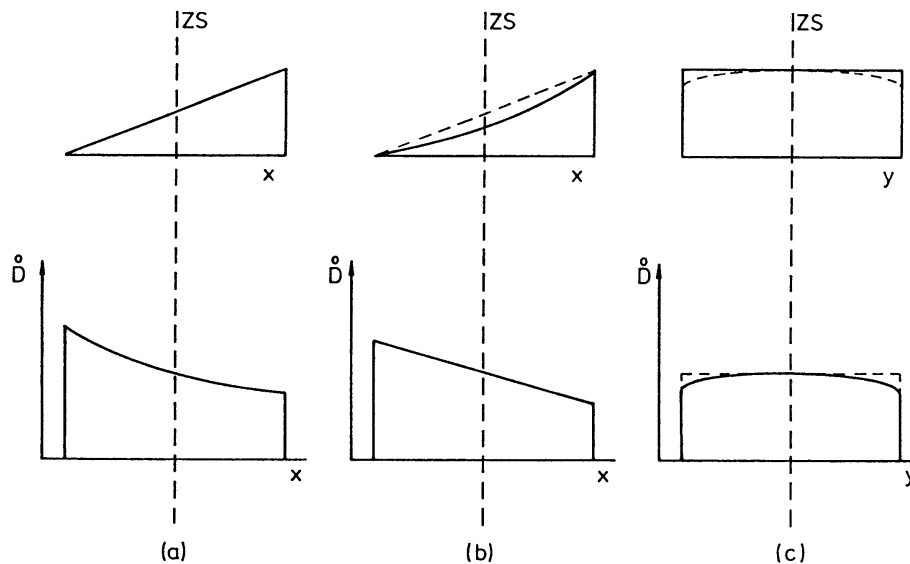
### Keilfilter

- Konventionelle Keilfilter
- Motorische Keilfilter
- Dynamische Keilfilter



# Modulation der Photonenfelder

## Konventionelle Keilfilter



Form konventioneller Keilfilter für die Strahlentherapie, oben: Keilfilterformen, unten: Dosisquerschnitte, (a): linear geformter Dreieckskeilfilter in x-Richtung. Seine Form führt zu einem "exponentiellen" Querprofil und in Abhängigkeit vom Photonenspektrum zu ausgeprägten Rundungen in den Isodosenverläufen. (b): Keilfilter mit logarithmischem Verlauf entlang der Schräge für ein nahezu "lineares" Querprofil, (c): Kompensation der vergrößerten Transmissionswege und der durch Streuverluste bestimmten Rundungen im Randbereich der Strahlenfelder zur Formung des zur Keilfilterschräge orthogonalen y-Querprofils durch Verminderung der lateralen Keilfilterdicken (gestrichelte Linien, alle Darstellungen schematisch).

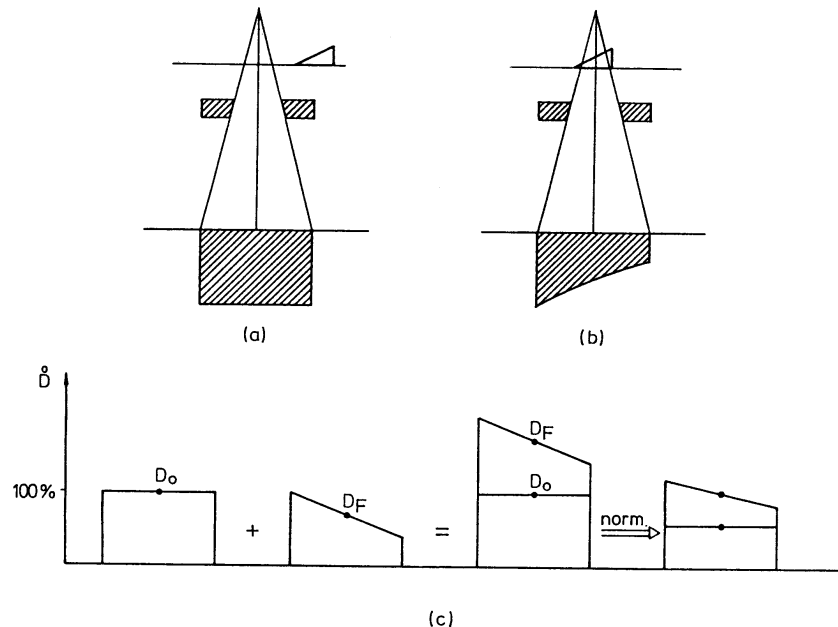


## Konventionelle Keilfilter



## Modulation der Photonenfelder

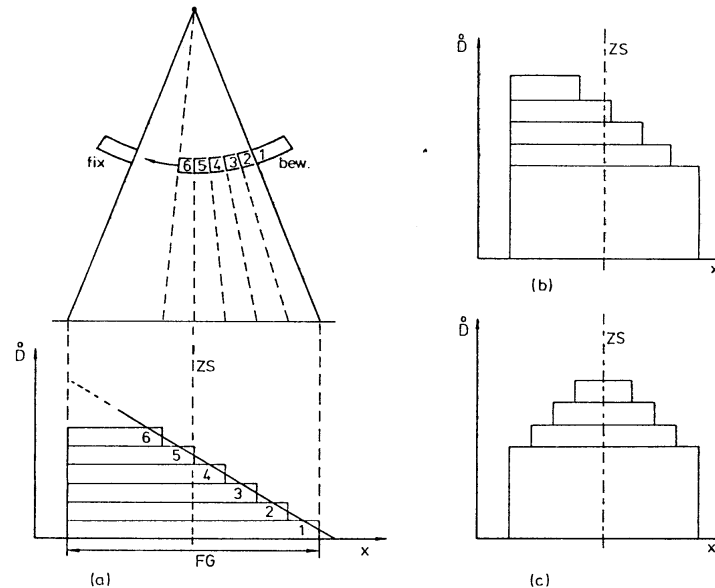
### Motorische Keilfilter



Methode der motorischen Keilfilter, (a): Freies Feld mit zurückgezogenem Keilfilter und rechteckigem Dosisprofil, (b): eingefahrener linearer Keilfilter mit exponentiellem Dosisquersprofil, (c): Zeitgewichtete Addition eines freien Feldes und eines Keilfilterfeldes. Durch Umnormierung der Summenverteilung auf die gleiche Zentralstrahldosisleistung wie das freie Feld ( $D_0$ ) entsteht das Dosisquersprofil mit verringerter Dachneigung und somit kleinerem effektiven Keilfilterwinkel (rechts).  $D_F$  ist die Zentralstrahl-Dosisleistung für das Keilfilterfeld, das die gleiche maximale Dosisleistung am Feldrand hat wie das freie Feld.

# Modulation der Photonenfelder

## Dynamische Keilfilter



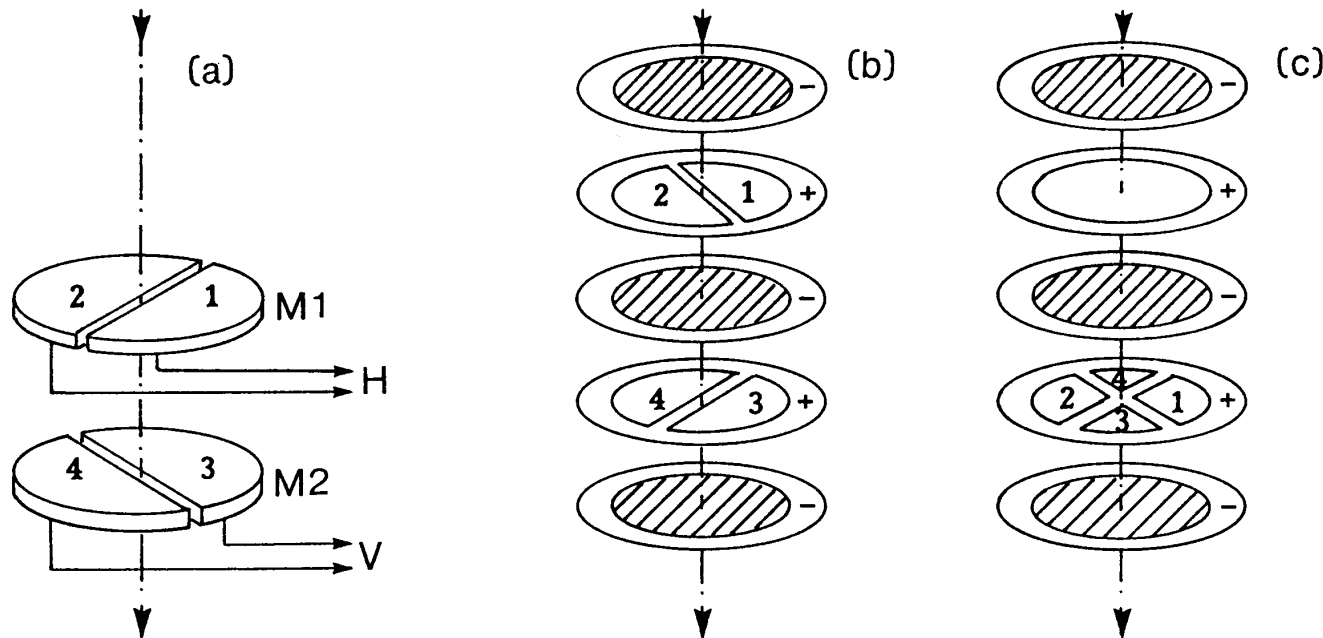
Technik der dynamischen Keilfilter: (a): Erzeugung eines Strahlenquerschnitts mit maximaler Dosisleistung links und ohne Dosisleistung am rechten Feldrand durch schrittweises Schließen der rechten Halblende mit jeweils gleichen Zeitgewichten für die jeweilige Blendenposition. (b): Überlagerung eines freien Feldes mit einem dynamisch geformten Keilfilterquerschnitt zur Erzeugung eines kleineren effektiven Keilfilterwinkels. (c): Erzeugung einer pyramidenförmigen Dosisverteilung zur Verminderung der Dosisleistungen an den beiden Feldrändern (Kompensatorwirkung) durch simultanes Schließen beider Halblenden.

## Intensitätsmodulation mit dynamische Lamellenkollimatoren



## Monitorsysteme

### Dosisleistungsabhängige dynamische Applikationen



Doppelmonitorsystem eines Beschleunigers für die Medizin, (a): Prinzip (M1, M2: Monitor 1+2, H: Horizontal-, V: Vertikalsteuersignale), (b,c): einfache technische Ausführungen.

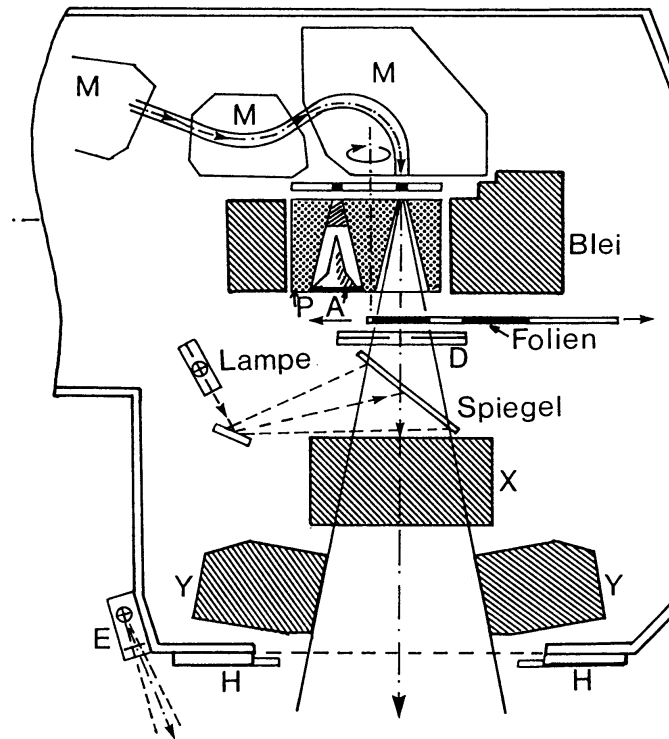
## Einstellhilfen und Einstellüberwachung

Als Einstellhilfen dienen verschiedene Einrichtungen

- Lichtvisier
- Distanzanzeige
- Laser-System
- Portal-Imaging-Systeme



## Einstellhilfen und Einstellüberwachung



Typischer Strahlerkopf eines modernen medizinischen Elektronen-Linearbeschleunigers. (M: Slalom-Magnete für die Strahlumlenkung, D: Doppeldosismonitor, P: Primärkollimator, A: Photonenungleichkörper mit vorgeschaltetem Beamhardener und Elektronenfänger, Folien: Ausgleichsfolien für Elektronen, E: Entfernungsmesser, H: Halter für Tubusse und Filter, X,Y: Kollimatorblenden, Lampe und Spiegel: Lichtvisier).

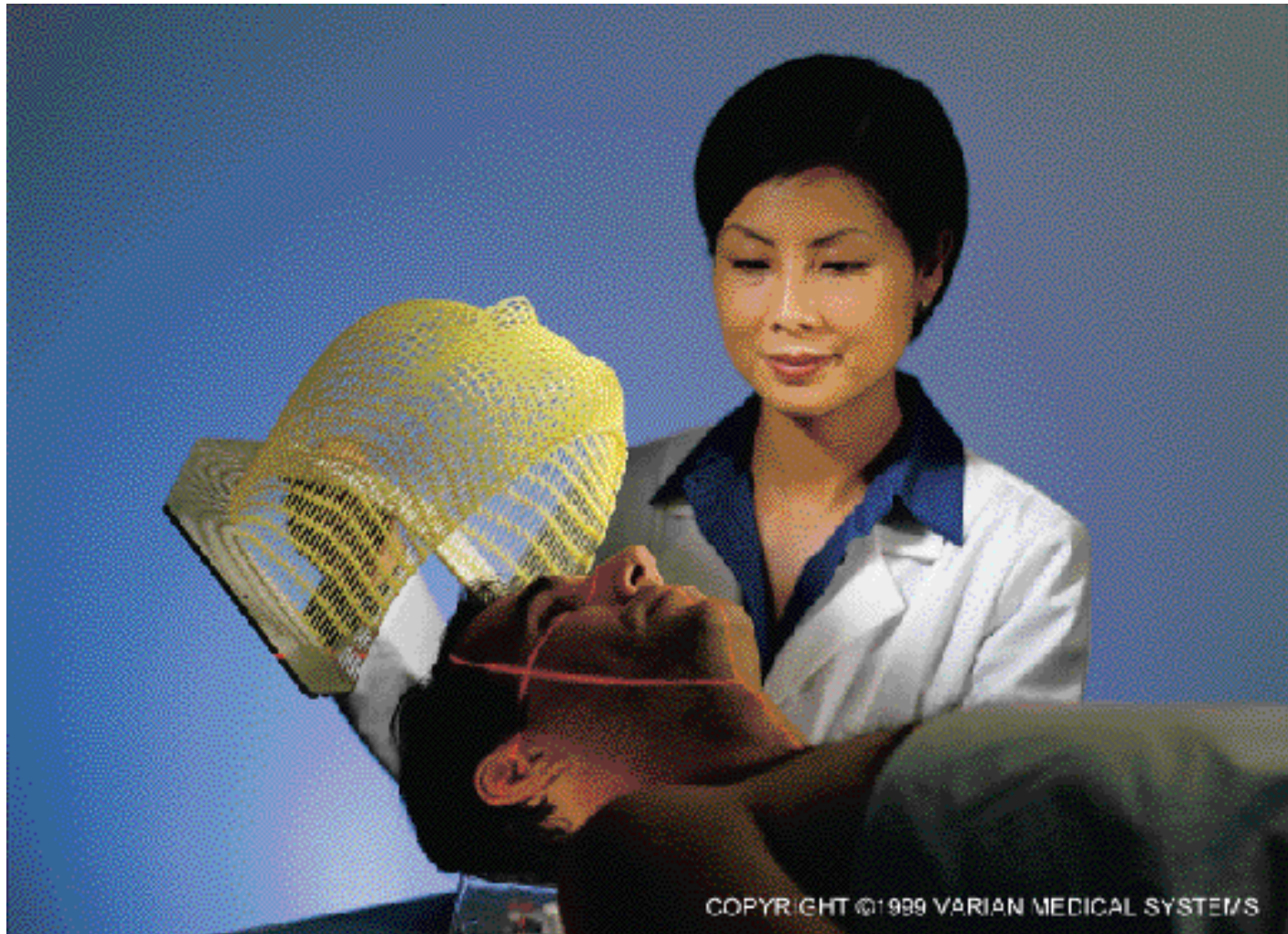


## Lichtvisier



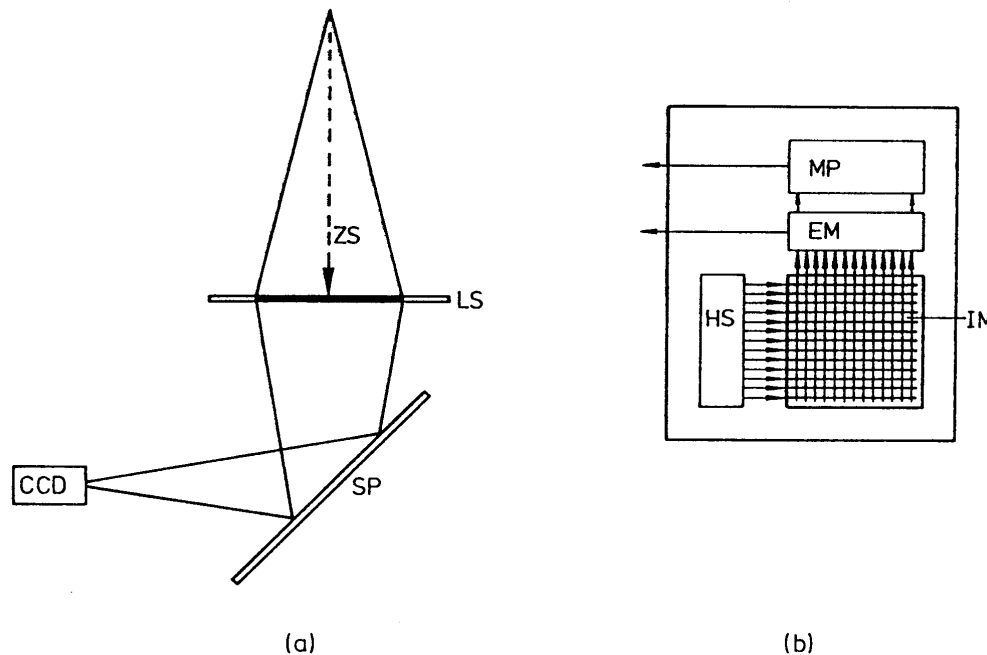


## Einstellhilfen



## Einstellhilfen und Einstellüberwachung

### Portal-Imaging-Systeme



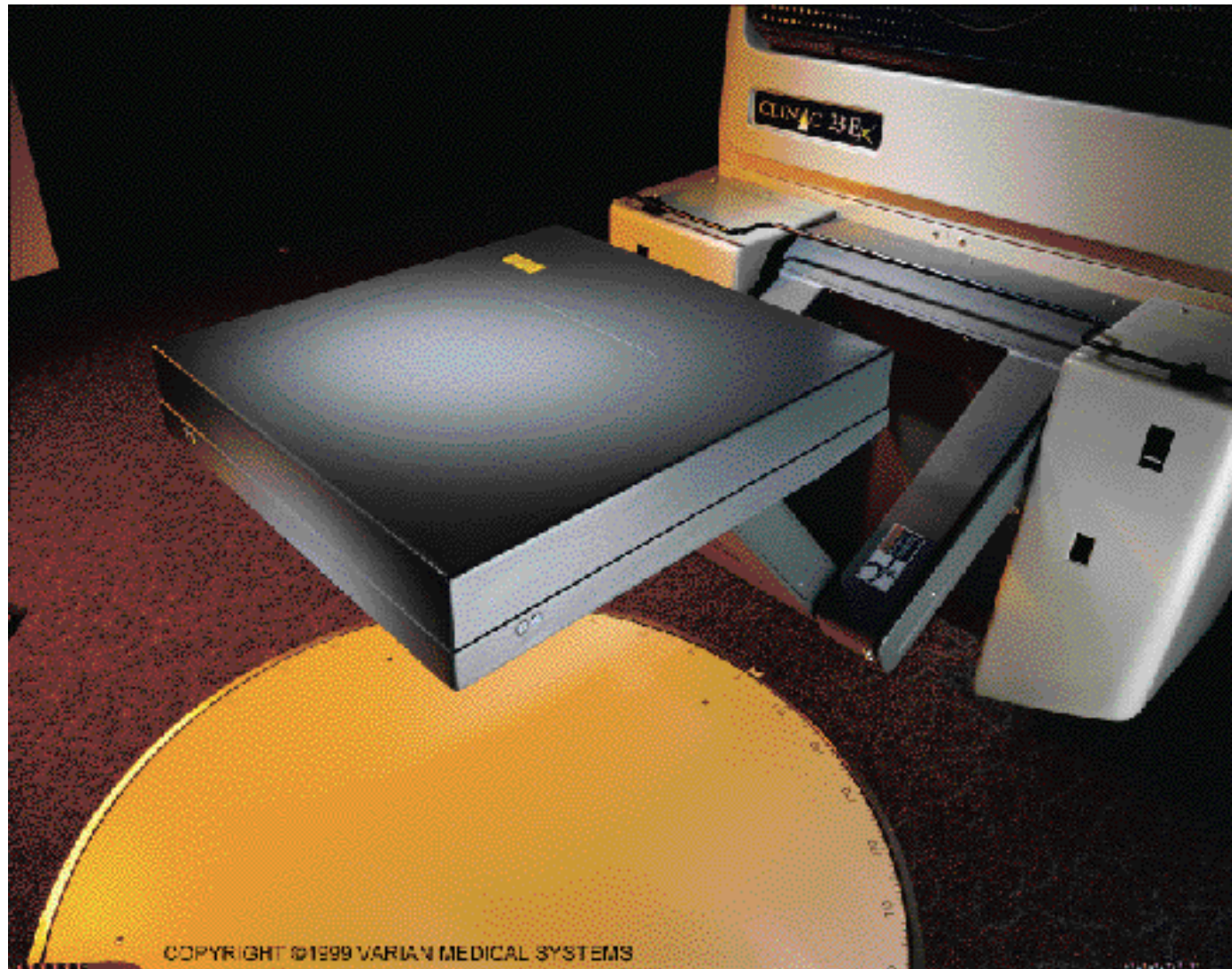
(a): Strahlengang beim 45°-Spiegelsystem (nach Fig. 1.3.36b), ZS: Zentralstrahl, LS: Leuchtschirm, SP: 45°-Spiegel, CCD: Digitale Kamera, (b): Prinzip der Ionisationskammermatrix mit 256x256 Bildpunkten als elektronischer Detektor für ein Portal-Imaging-System (nach Fig. 1.3.36a), HS: Hochspannungsschalter zur Zeilenanwahl, EM: Elektrometerverstärker, MP: Multiplexer, IM: Ionisationskammermatrix.

## Asi-Portal-Imaging-System



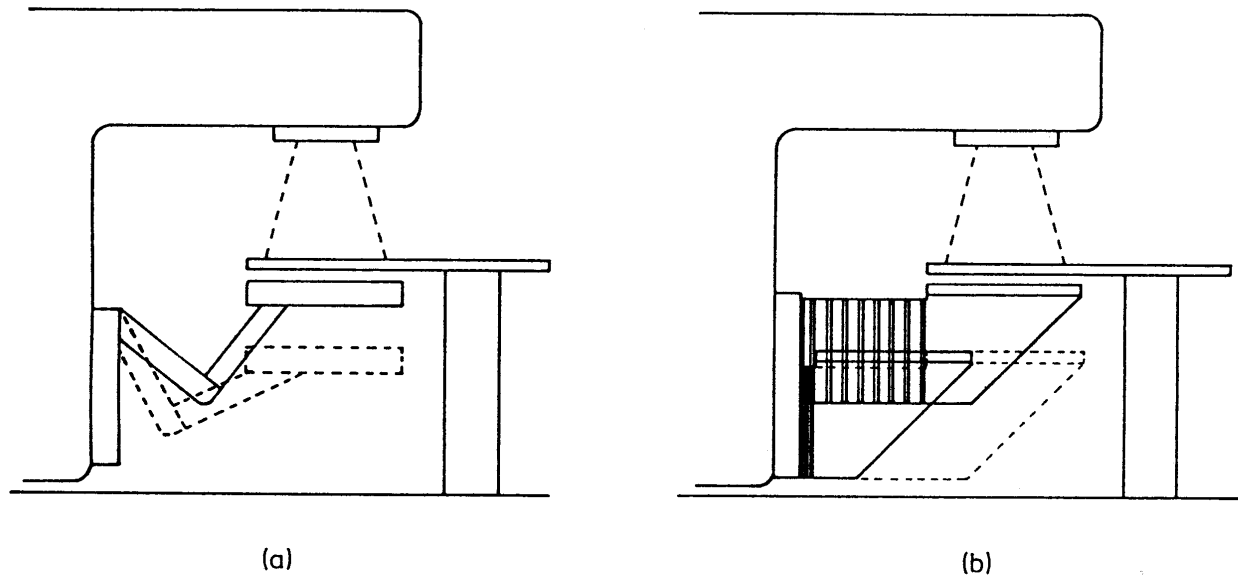


## Asi-Portal-Imaging-System



## Einstellhilfen und Einstellüberwachung

### Portal-Imaging-Systeme



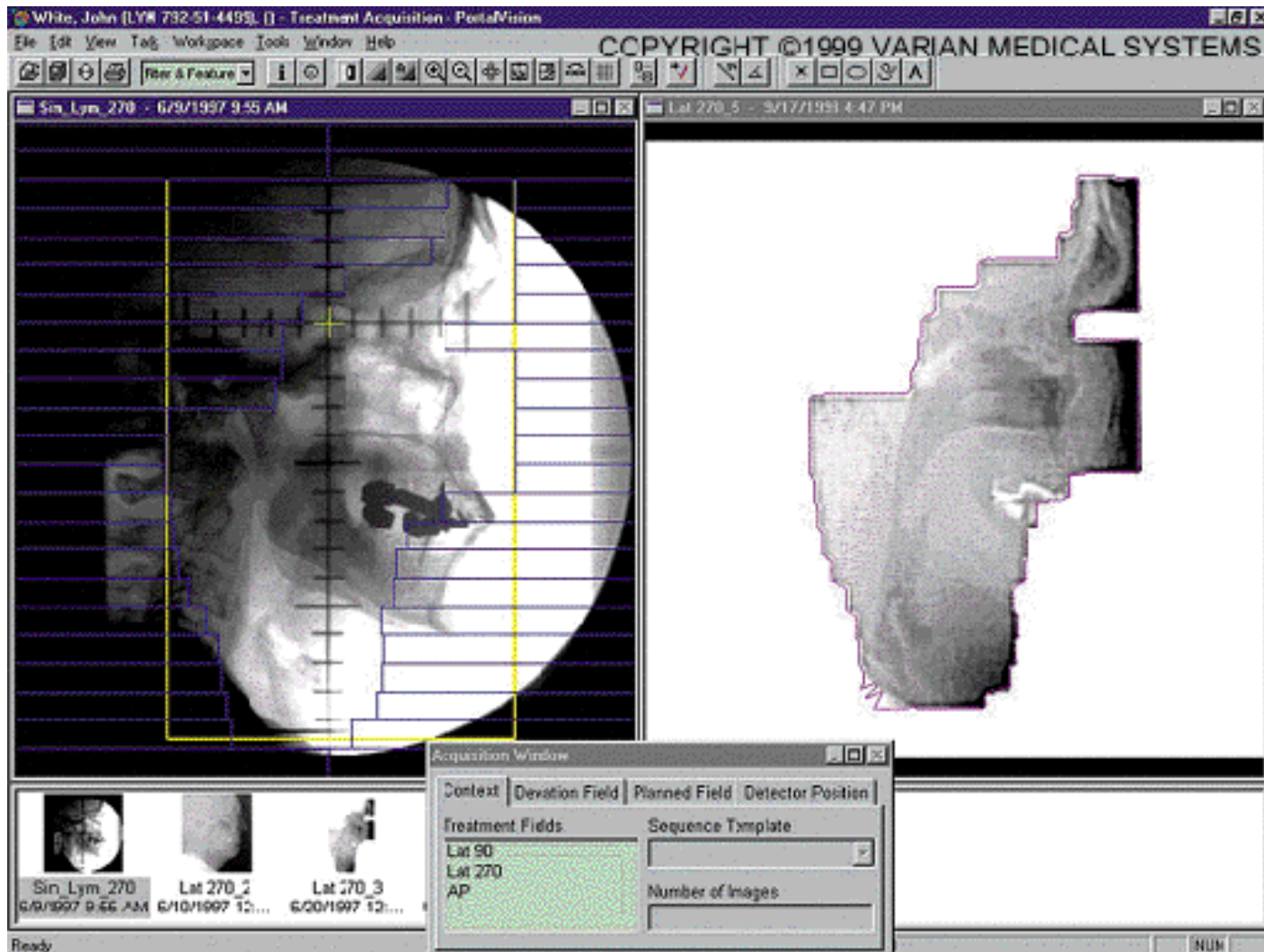
(a): Anordnung eines elektronischen Portal-Imaging-Systems mit Flüssigionsisationskammer, (b): Portal-Imaging-System mit Leuchtschirmtechnik und CCD-Kamera. Beide Systeme sind bzgl. ihres Fokusabstandes und des Abstandes zum Bestrahlungstisch verstellbar. Das CCD-System benötigt wegen der starren Spiegelanordnung auch im versenkten Zustand etwas mehr Platz.

## Portal-Imaging-System





## Lagerungsüberwachung



## Bedienung eines Beschleunigers

