

«Die Macht der Teilchen»

Markus Reist, Leiter Radiologiefachpersonen HF

Fortbildung – Fachstelle – Radio-Onkologie – 18. März 2023



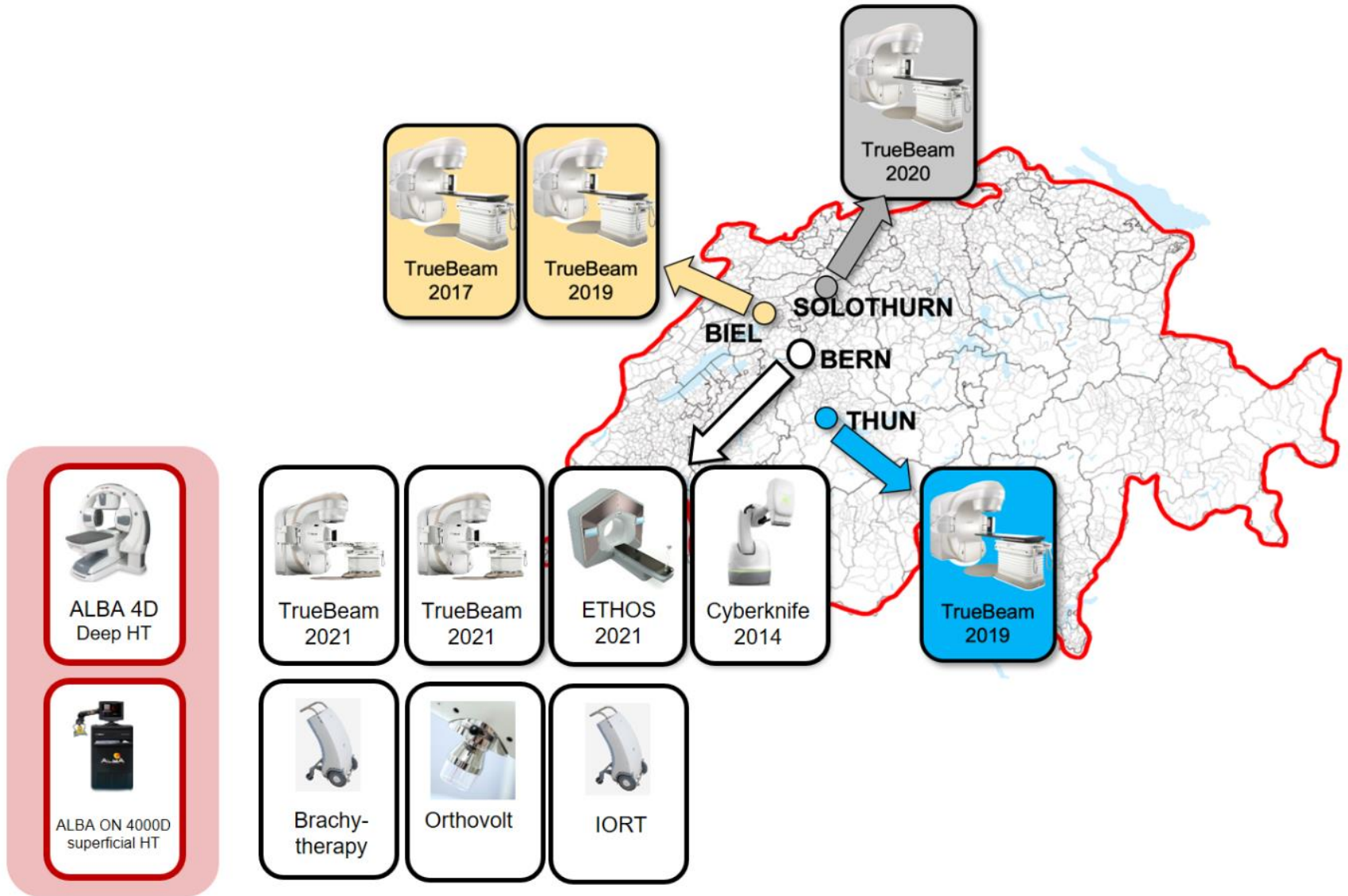
...und die Schönheit der Elektronen





Radio-Onkologiezentrum Biel – Seeland – Berner Jura
Centre de radio-oncologie Bienne – Seeland – Jura Bernois

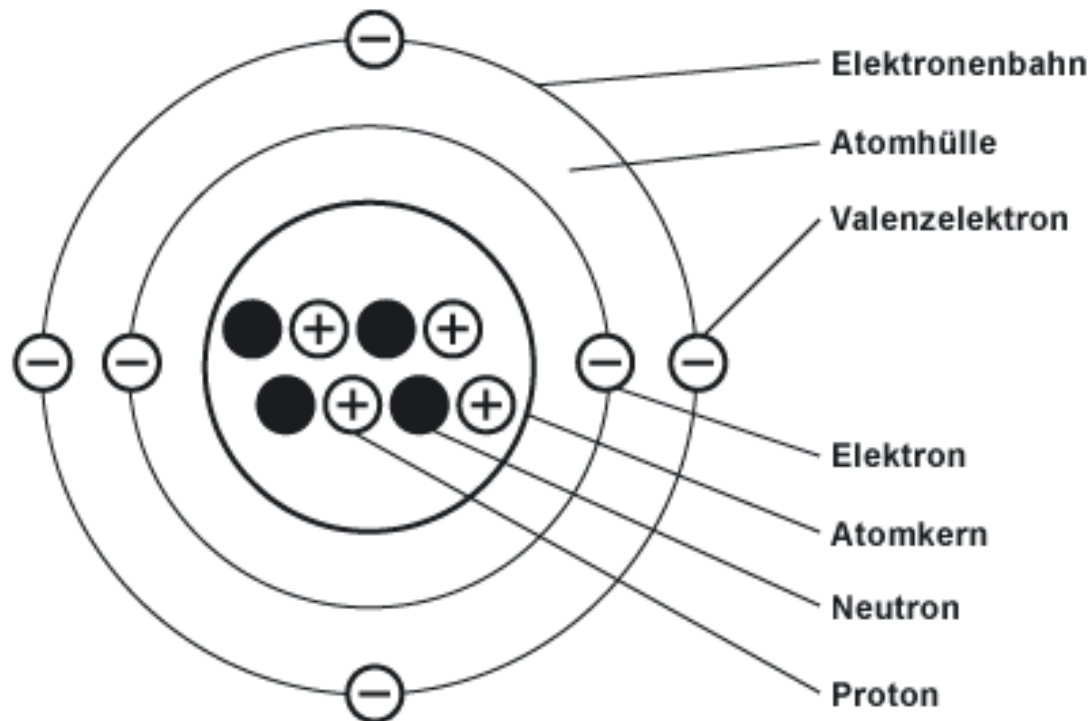


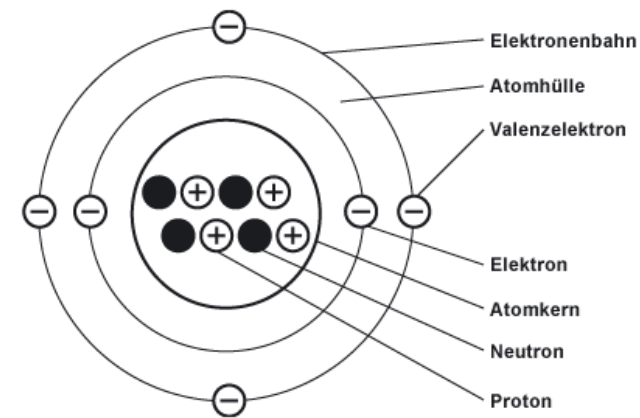


Elektronen – Übersicht

- Das Atom – das Bohrsche Atommodell
- – der Aufbau
- Elektronen – Elementarteilchen
- – zusammengefasst
- – sind da
- – Physik; nur ein wenig
- – gehen tief
- – Charaktere
- – entstehen, Linac
- – die Anwendung im Alltag
- – aus der Forschung
- – zukünftige Anwendungen
- – alles klar?
- Vielen Dank

Das Atom – das Bohrsche Atommodell

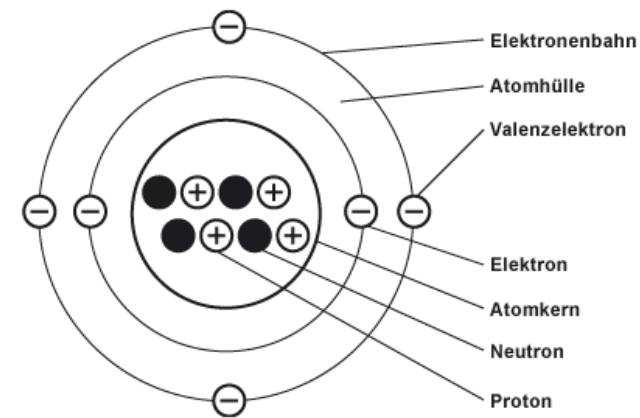




Das Atom – der Aufbau

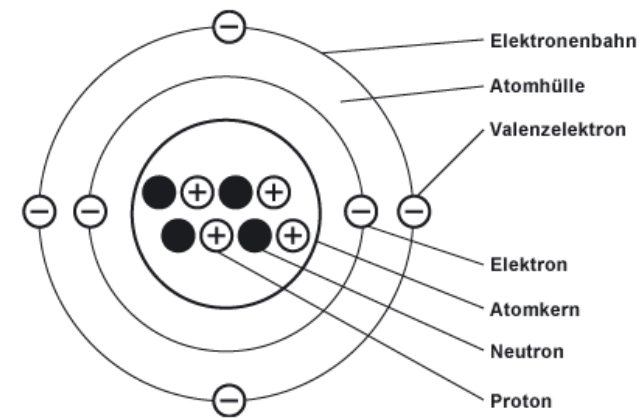
- Ein Atom ist der kleinste Baustein der chemischen Elemente
- Es gibt weit über 100 verschiedene Atome, die ähnlich aufgebaut sind
- Atome setzen sich aus einem Atomkern und einer Atomhülle zusammen
- Der Aufbau ist mit einem Planetensystem vergleichbar:
Eine Sonne, das soll der Atomkern sein, um die sich die Planeten drehen (Atomhülle)
- Der Atomkern befindet sich im Zentrum des Atoms
- Er ist positiv geladen und enthält fast die gesamte Masse des Atoms

Das Atom – der Aufbau



- Er setzt sich aus Protonen und Neutronen zusammen
- Das hier dargestellte Atommodell ist das Bohrsche-Atommodell
- Es ist eine Sicht, wie Elektronen, Protonen und Neutronen zueinander stehen
- Dabei geht man davon aus, dass sich Elektronen auf einer festen Bahn um den Atomkern drehen

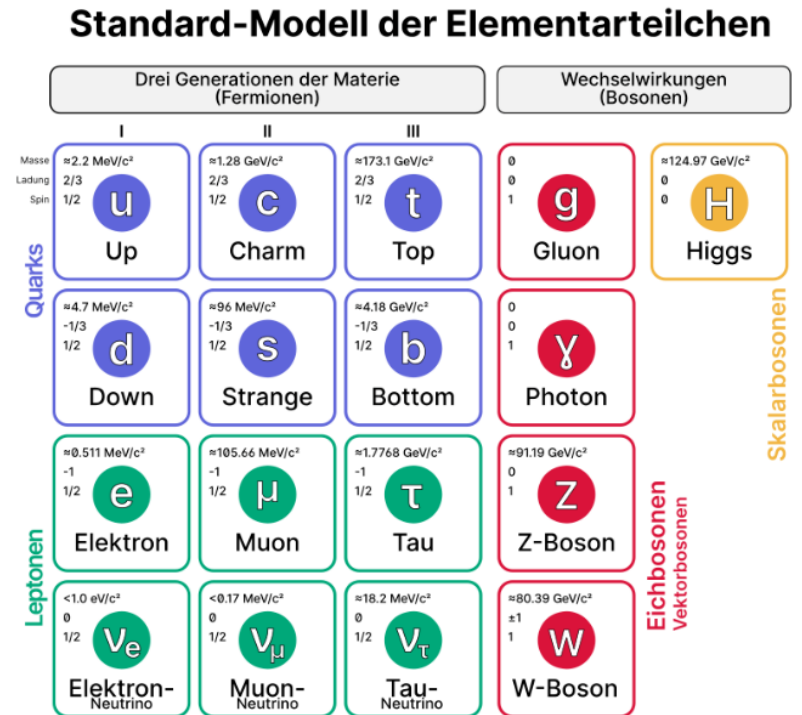
Das Atom – der Aufbau



- Neutronen sind elektrisch neutrale Teilchen
- Sie kommen nur im Atomkern vor, weil sie in freiem Zustand nicht stabil sind
- Die Anzahl der Protonen im Atomkern ist immer auch die gleiche Anzahl an Elektronen in der Atomhülle
- Protonen existieren auch im freien Zustand

Elektronen – Elementarteilchen

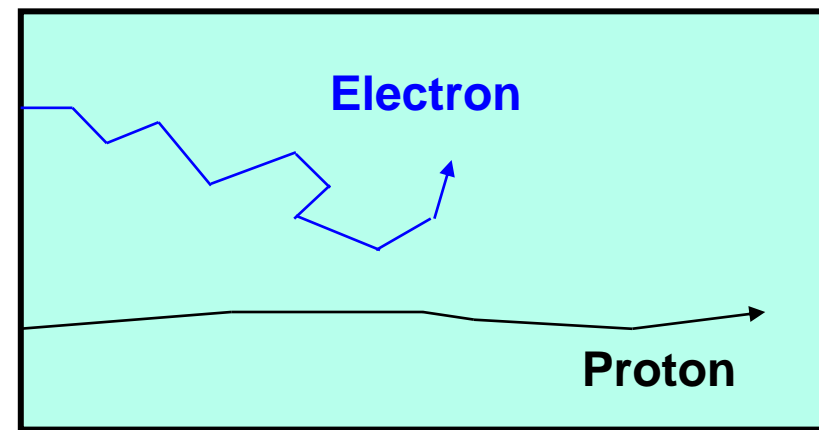
- Elektronen und Photonen sind Elementarteilchen
- Protonen sind Hadronteilchen



Elektronen – zusammengefasst

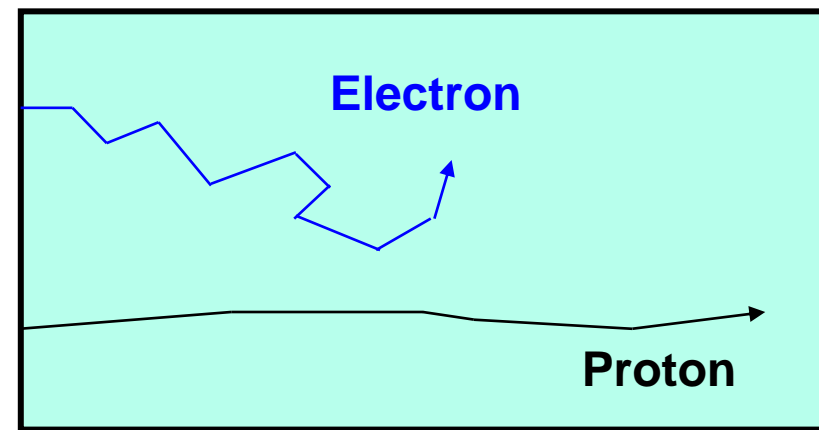
- Elektronen sind negativ geladene Elementarteilchen
- Das Symbol ist e^-
- Elektronen bilden die Hülle um einen Atomkern
- Elektronen können im Teilchenbeschleuniger 99.9 Prozent der Lichtgeschwindigkeit erreichen

Elektronen – sind da



- Die Wechselwirkung von Elektronen mit Materie geschieht ausschliesslich über Streuprozesse
- Elastische Streuung führt zu einer Richtungsänderung der Teilchen
- Bei der Streuung ändern die Teilchen ihre Richtung und verlieren Energie durch die Anregung der Atomhülle, durch die Ionisation von Atomen oder durch die Erzeugung von Röntgenbremsstrahlung
- Elektronen sind elektrisch geladene Teilchen, die ihre Energie direkt dem Gewebe übertragen

Elektronen – sind da



- Es handelt sich also um direkt ionisierende Strahlung
- Daraus resultieren eine relativ hohe Hautbelastung
- Ein großer Bereich, in der die Maximaldosis deponiert wird und
- Ein schneller Dosisabfall im Anschluss an das Dosismaximum
- Sodass die Region hinter dem oberflächlich gelegenen Zielvolumen besser geschont wird als bei Photonen

Elektronen – Physik; nur ein wenig

- Elektronen sind negativ geladene Elementarteilchen

➔ direkt ionisierend

➔ pro Längeneinheit deponierte Energie nach der Bethe-Bloch-Formel

$$\rightarrow S := - \left(\frac{dE}{dx} \right) \propto \frac{\rho_e}{v^2}$$

Rule of thumb: $S \approx 2 \text{ MeV/cm}$

Elektronen – Physik; nur ein wenig

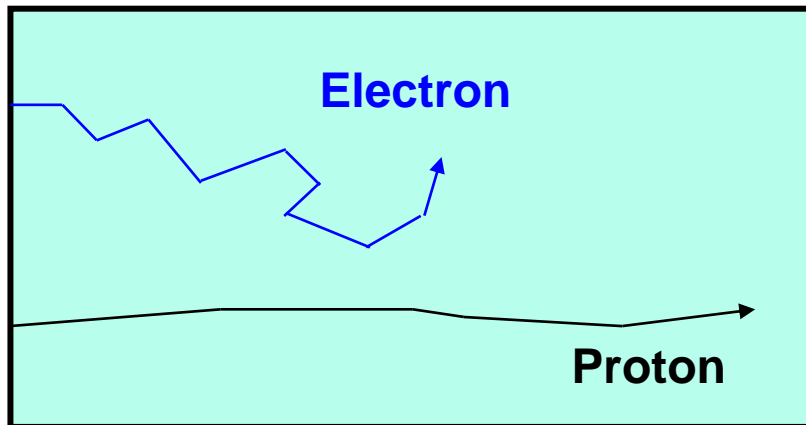
$$\rightarrow S := - \left(\frac{dE}{dx} \right) \propto \frac{\rho_e}{v^2}$$

Rule of thumb: $S \approx 2 \text{ MeV/cm}$

- Elektronen sind ähnlich wie Protonen

Elektronen – Physik; nur ein wenig

- Aber warum gibt es keinen Bragg-Peak?
 - ➔ jedes Elektron hat einen Bragg-Schnabel entlang seines Weges
 - ➔ Elektronen haben grössere Streuwinkel
 - ➔ Der Bragg-Peak über alle Elektronen eines Strahls wird verschmiert



Elektronen – Physik; nur ein wenig

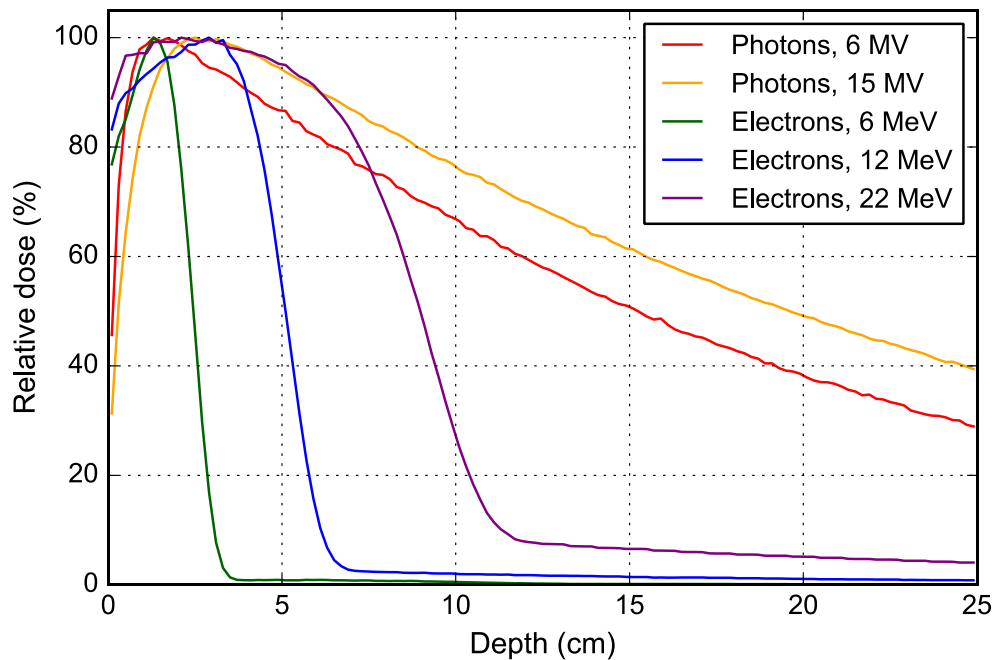
$$\rightarrow S := - \left(\frac{dE}{dx} \right) \propto \frac{\rho_e}{v^2}$$

Rule of thumb: $S \approx 2 \text{ MeV/cm}$

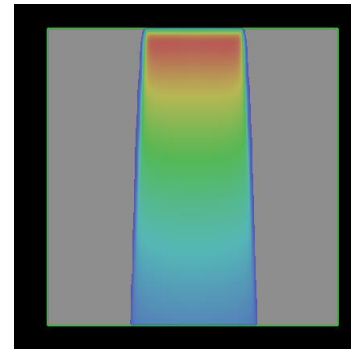
- Elektronen verlieren im Durchschnitt etwa 2 MeV / cm
- Und: je langsamer das Elektron, desto mehr Energie verliert es

Elektronen – gehen tief

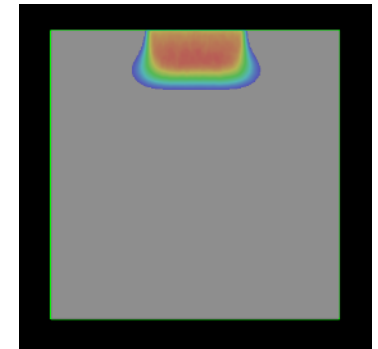
- Tiefendosiskurven, Vergleich Photonen 6 MV – Elektronen 22 MeV



Photon, 6 MV



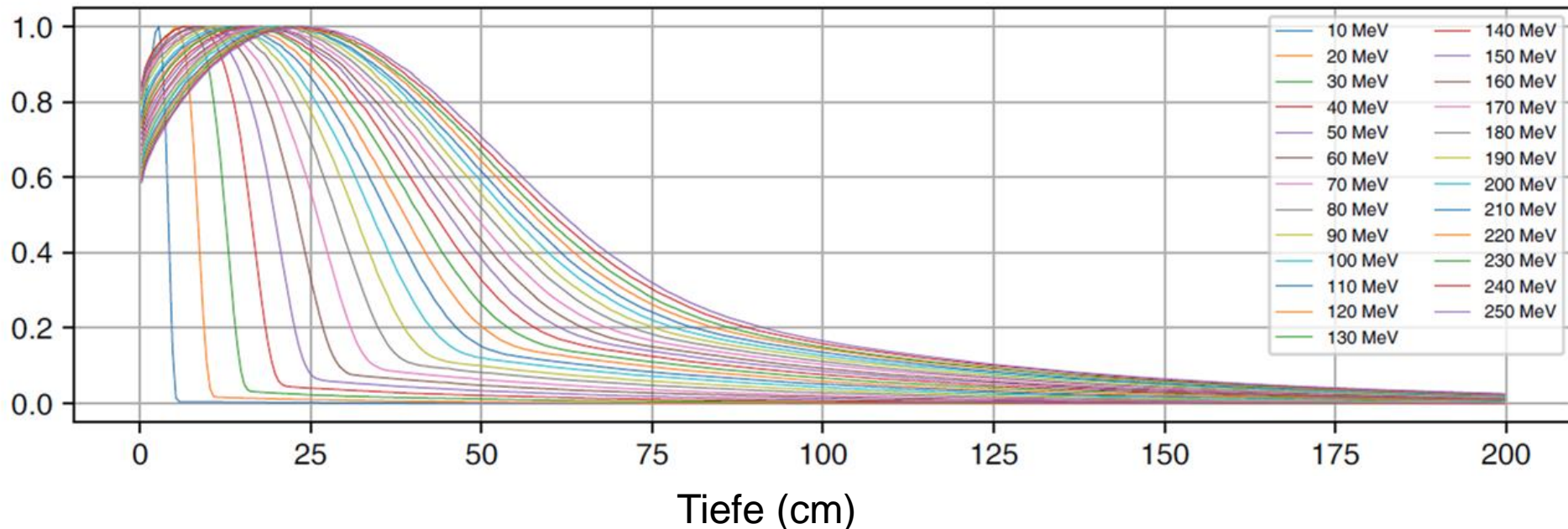
Electron, 12 MeV



Elektronen – gehen tief

- Tiefendosiskurven, Elektronen 10 MeV bis Elektronen 250 MeV

Dosis (relativ zum Max)



Elektronen – Charaktere

Menge	Einheit	Bedeutung
S	MeV / cm	Kraft stoppen Energiedepot pro Längeneinheit
E	MeV	Energie des Teilchens
v	cm / s	Aktuelle Partikelgeschwindigkeit
x	cm	Wegleitung des Partikels
$\rho_e = \frac{\rho}{m_u} \cdot \frac{Z}{A}$	1 / cm ³	Elektronendichte des Gewebes (bestimmt durch HU-Werte im CT)

Elektronen – Charaktere

Menge	Einheit	Bedeutung
ρ	kg / cm ³	Massendichte des Gewebes
Z	-	Ordnungszahl Anzahl der Protonen / Elektronen im Atom
A	-	Massenzahl Anzahl der Protonen und Neutronen im Atom
m_u	1.66054 * 10 ⁻²³ kg	

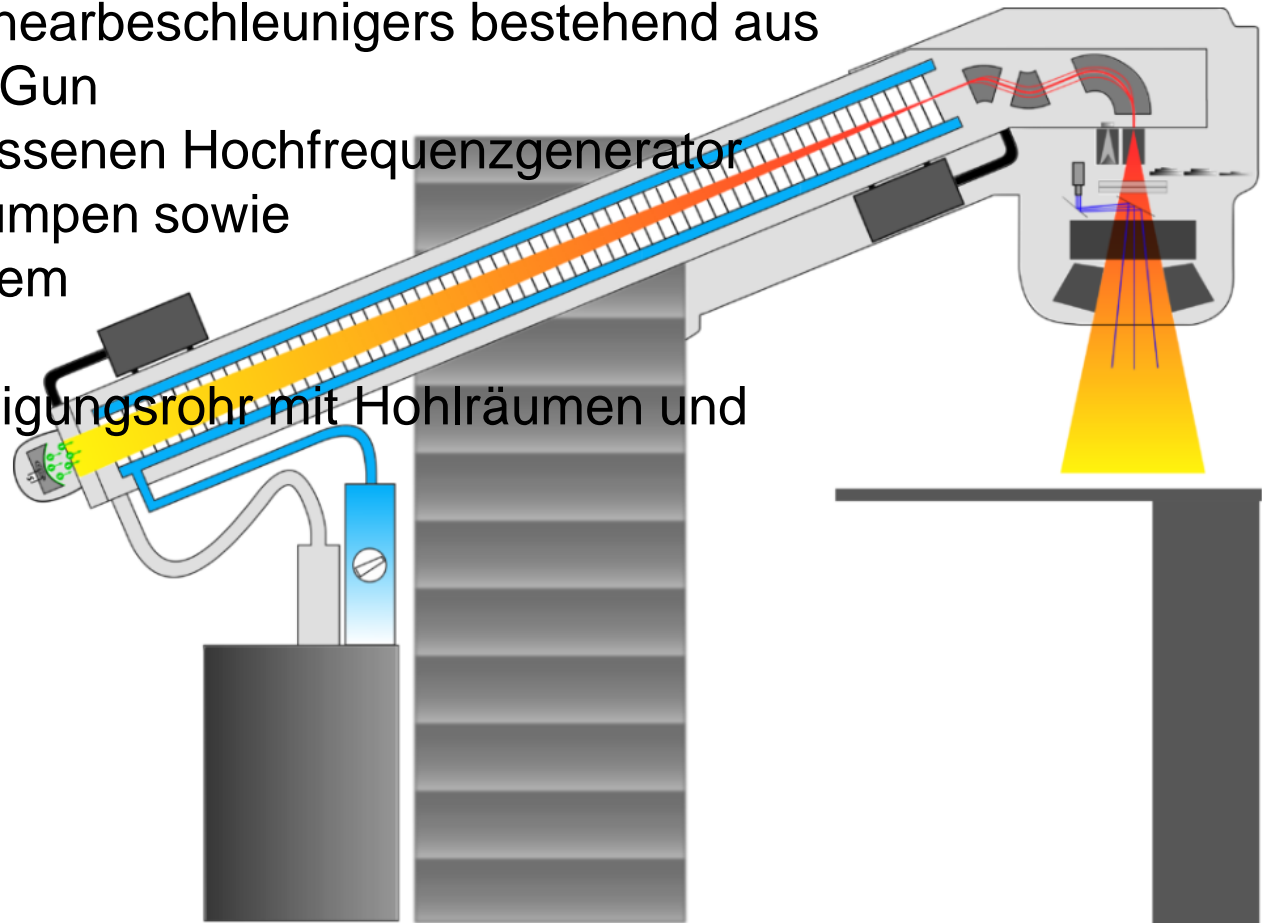
Elektronen – entstehen, Linac

- 1954: die ersten Versuche, elektrisch betriebene Teilchenbeschleuniger für die Therapie zu modifizieren
- der Linearbeschleuniger, der geladene Teilchen wie Elektronen in gerader Linie beschleunigt
- Aufbau des Linearbeschleunigers



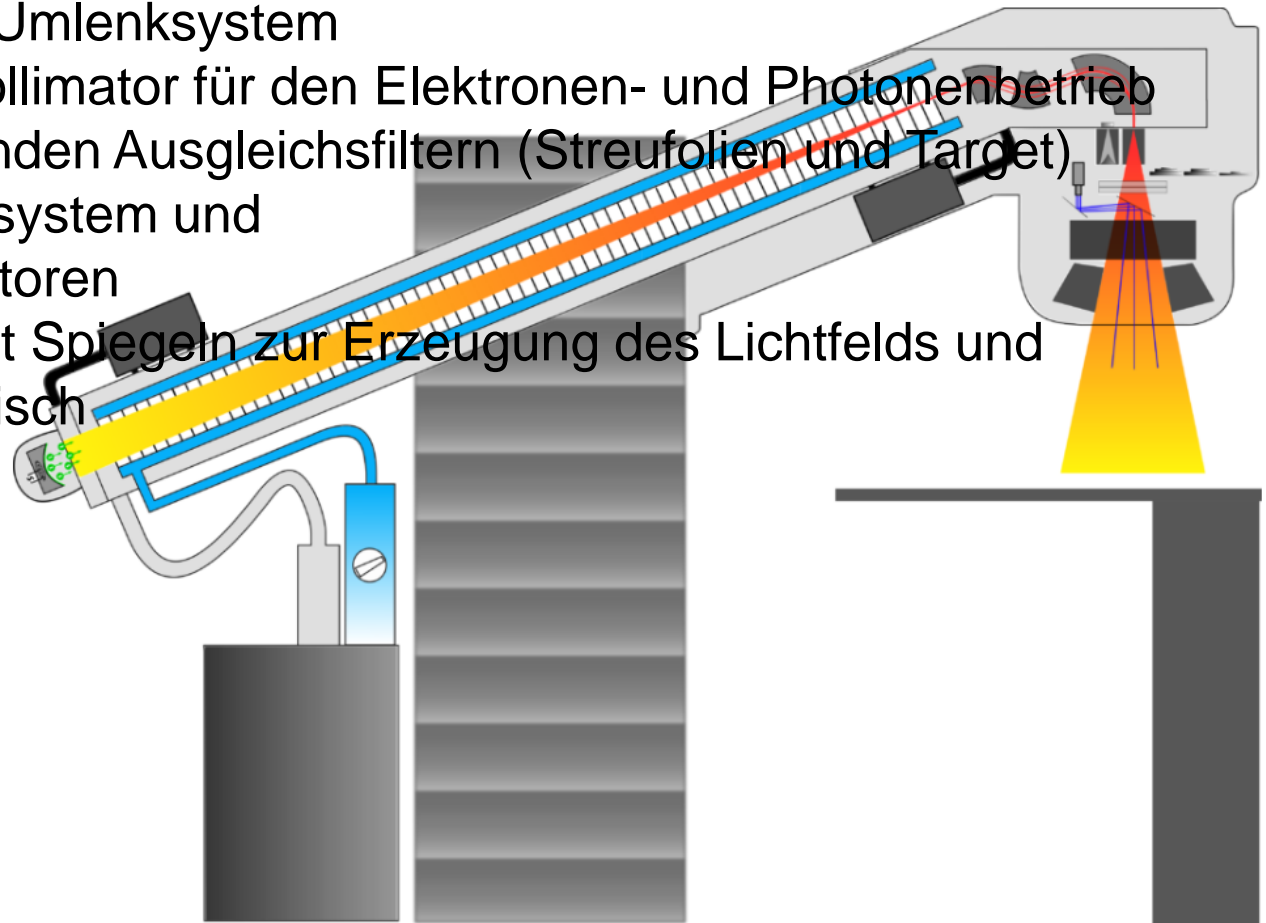
Elektronen – entstehen, Linac

- Skizze eines Linearbeschleunigers bestehend aus
- der Elektronen-Gun
- dem angeschlossenen Hochfrequenzgenerator
- zwei Vakuumpumpen sowie
- einem Kühlsystem
- der Gantry und
- dem Beschleunigungsrohr mit Hohlräumen und
- Blenden



Elektronen – entstehen, Linac

- einem Magnet-Umlenkensystem
- einem Primärkollimator für den Elektronen- und Photonenbetrieb
- mit entsprechenden Ausgleichsfiltern (Streufolien und Target)
- einem Blendensystem und
- Multileafkollimatoren
- einer Lampe mit Spiegeln zur Erzeugung des Lichtfelds und
- dem Patiententisch

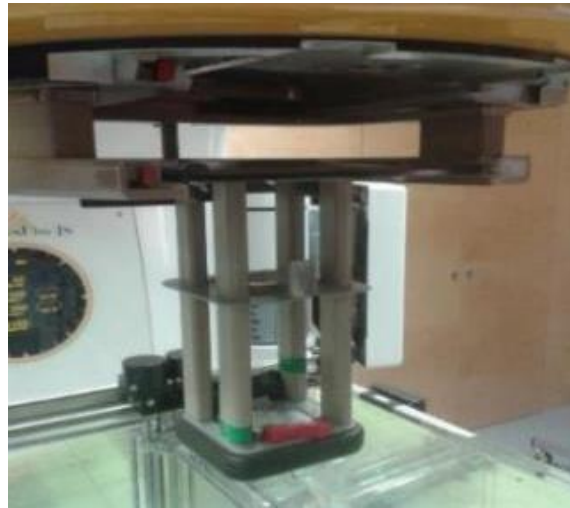


Elektronen – entstehen, Linac



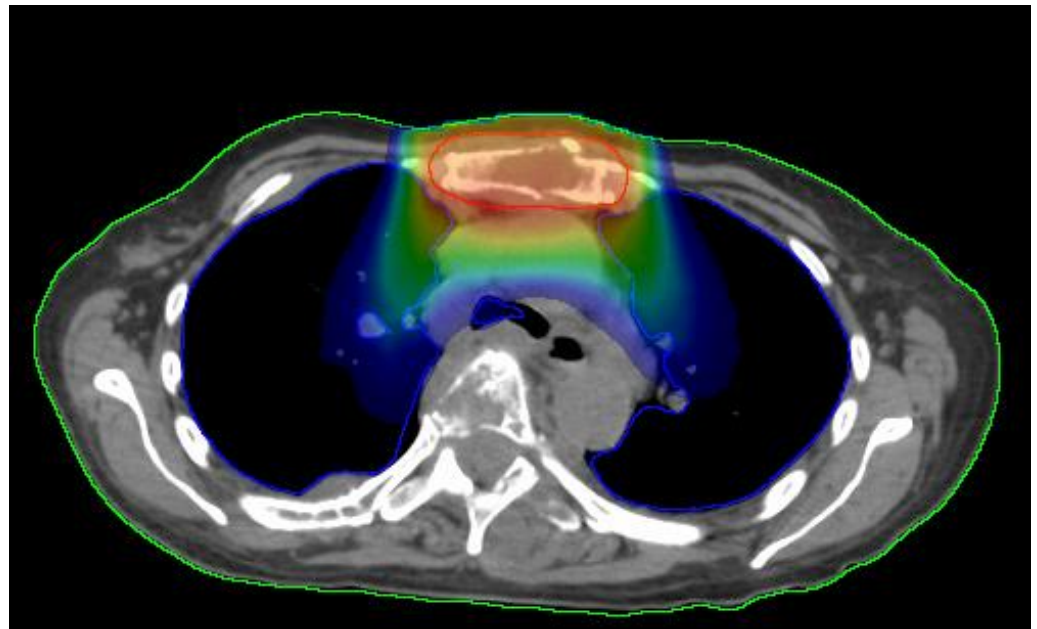
Elektronen – die Anwendung im Alltag

- Linearbeschleuniger
- Applikator
- Block, standard oder individuell gegossen



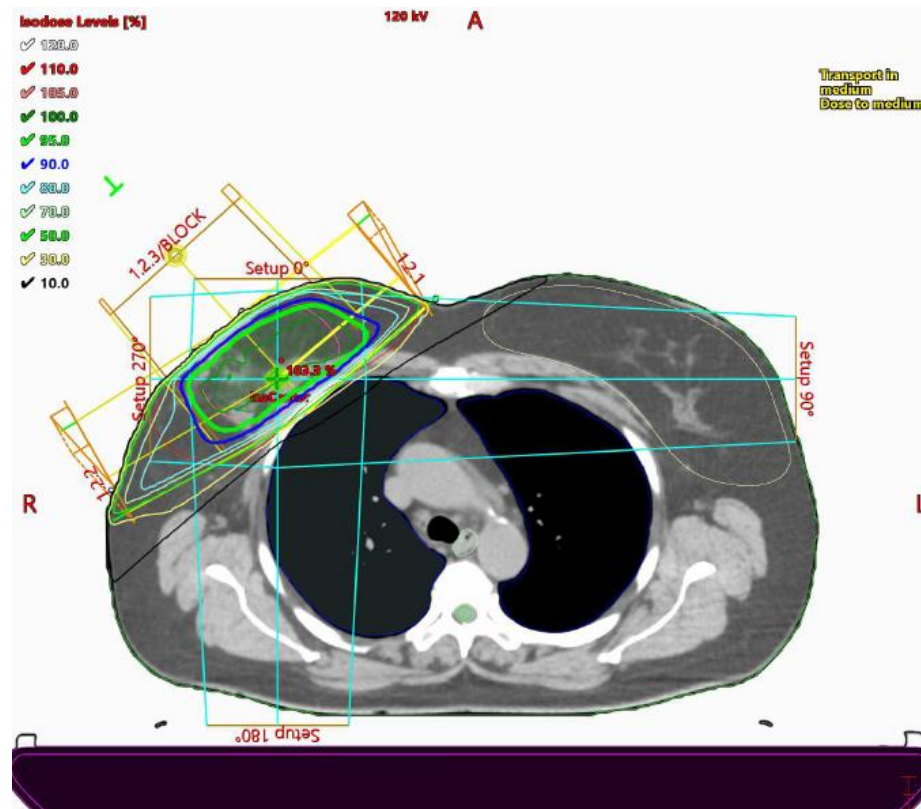
Elektronen – die Anwendung im Alltag

- Stehfeld mit individuellem Block
- SSD 105 cm (@ Inselspital)
- Sternum: 1E (12 MeV)
- Dosis: 700cGy



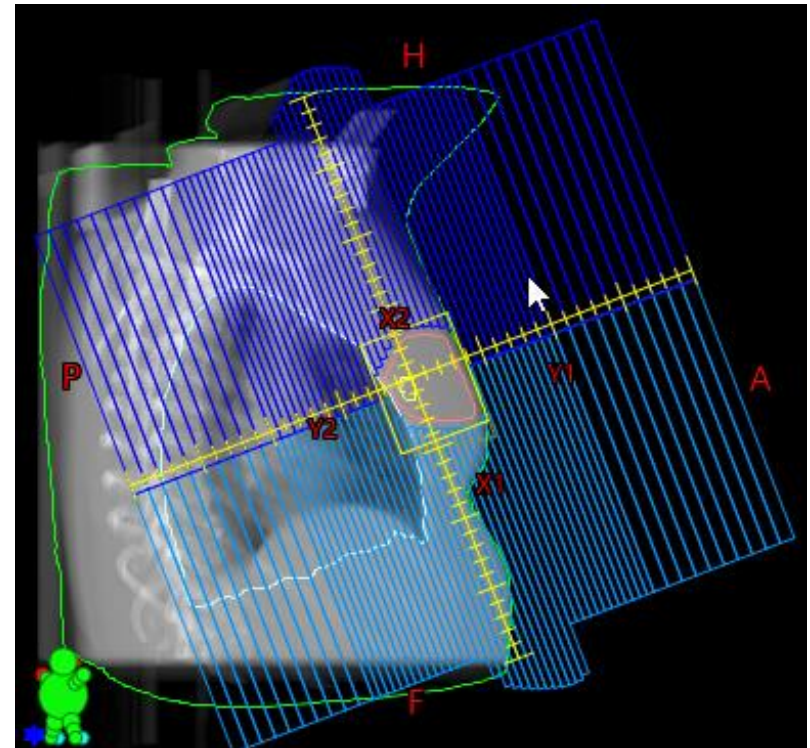
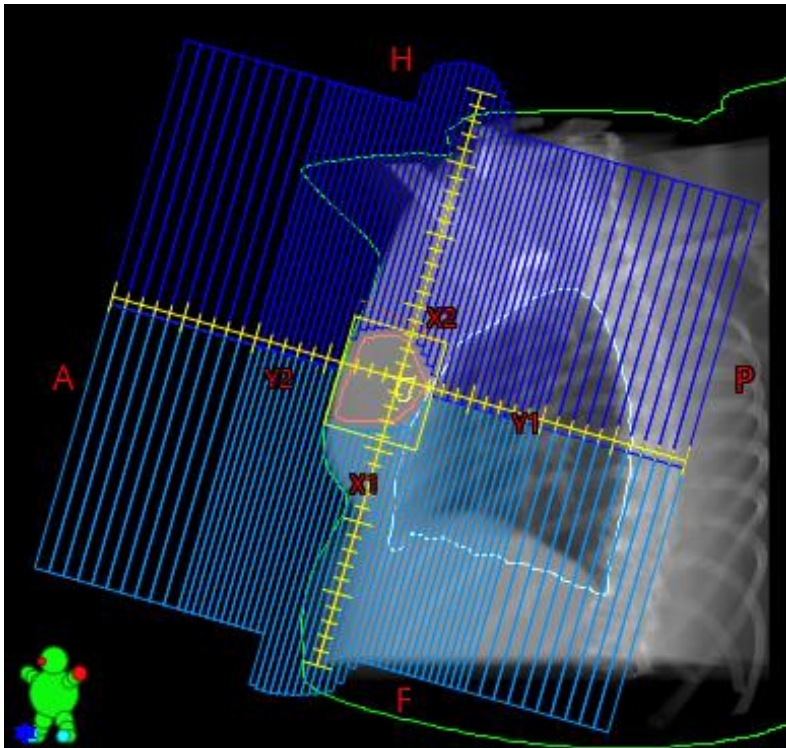
Elektronen – die Anwendung im Alltag

- Mamma – Boost, Mixed-Beam, Photonen – Elektronen



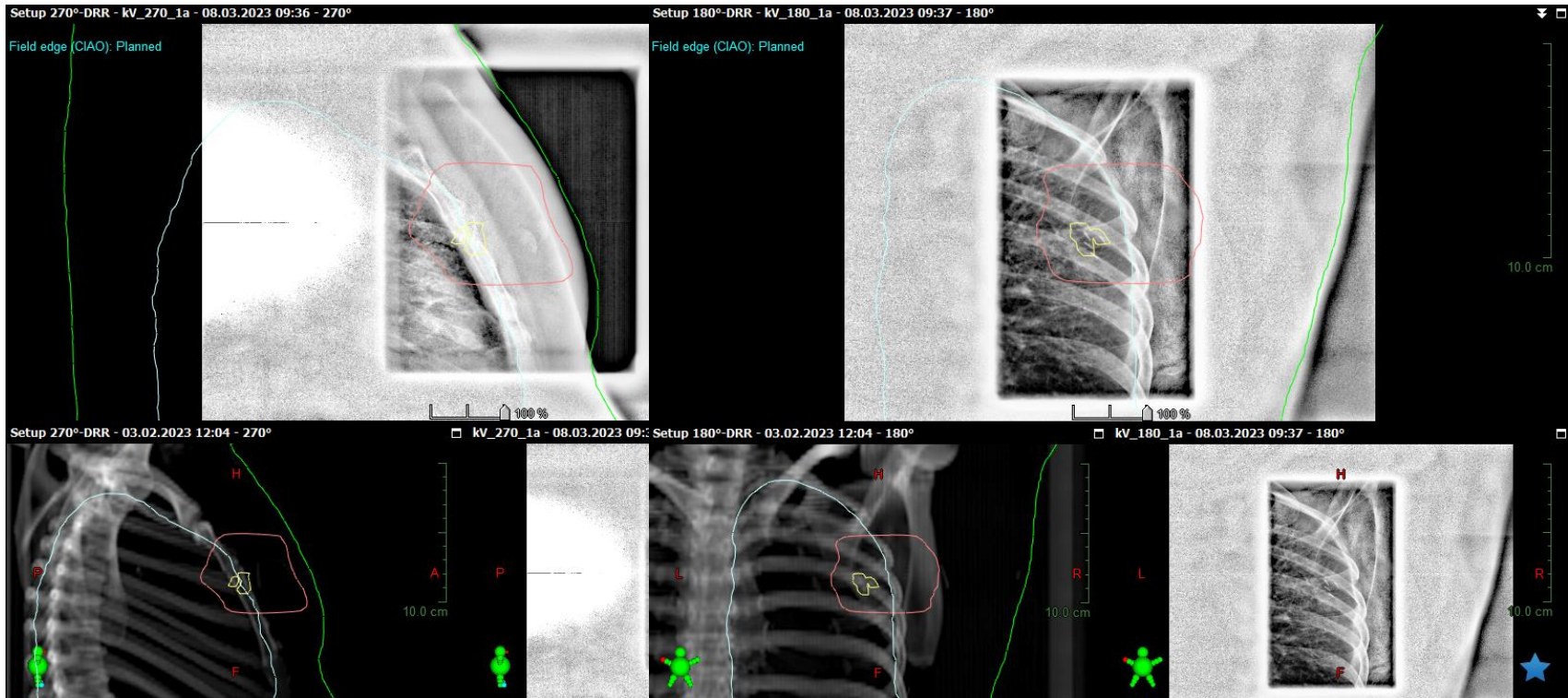
Elektronen – die Anwendung im Alltag

- Mamma – Boost, Mixed-Beam, Photonen – Elektronen



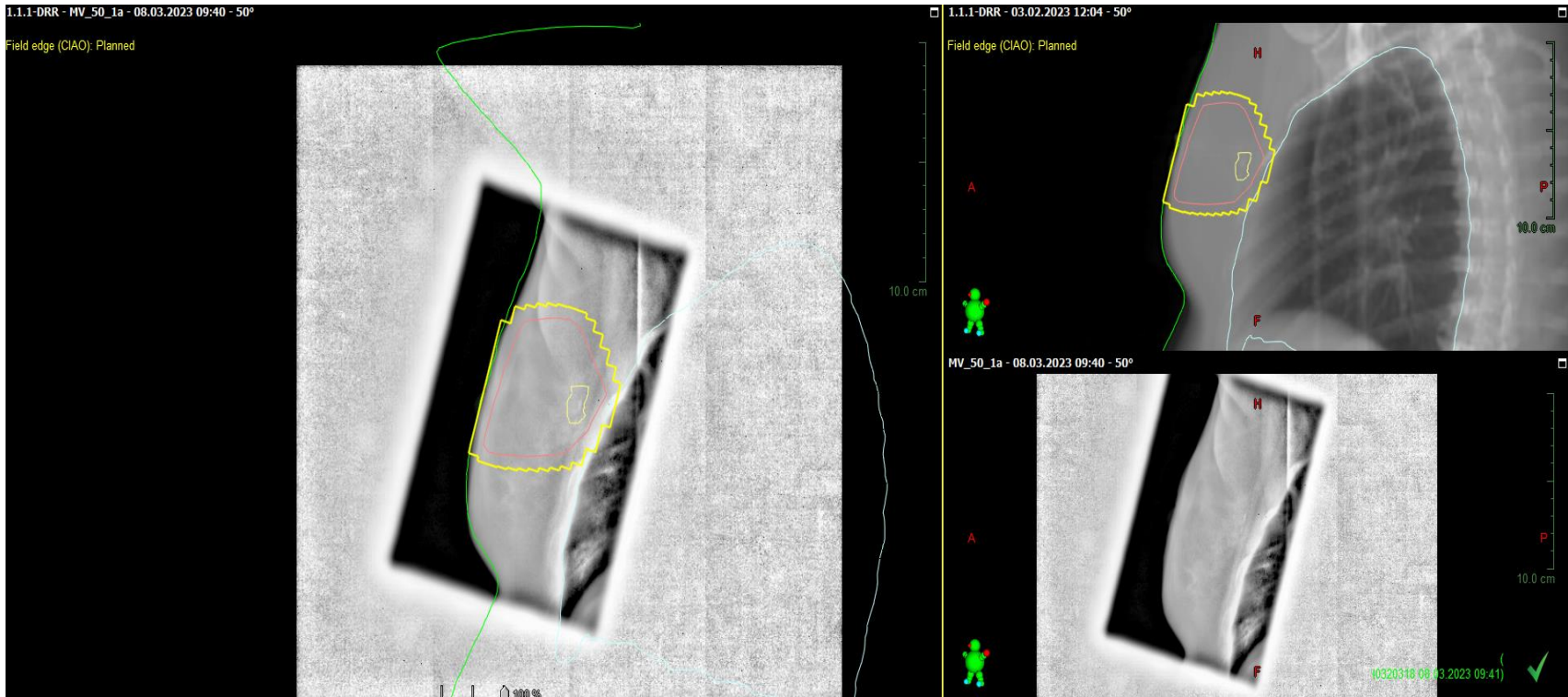
Elektronen – die Anwendung im Alltag

- Mamma – Boost, Mixed-Beam, Photonen – Elektronen



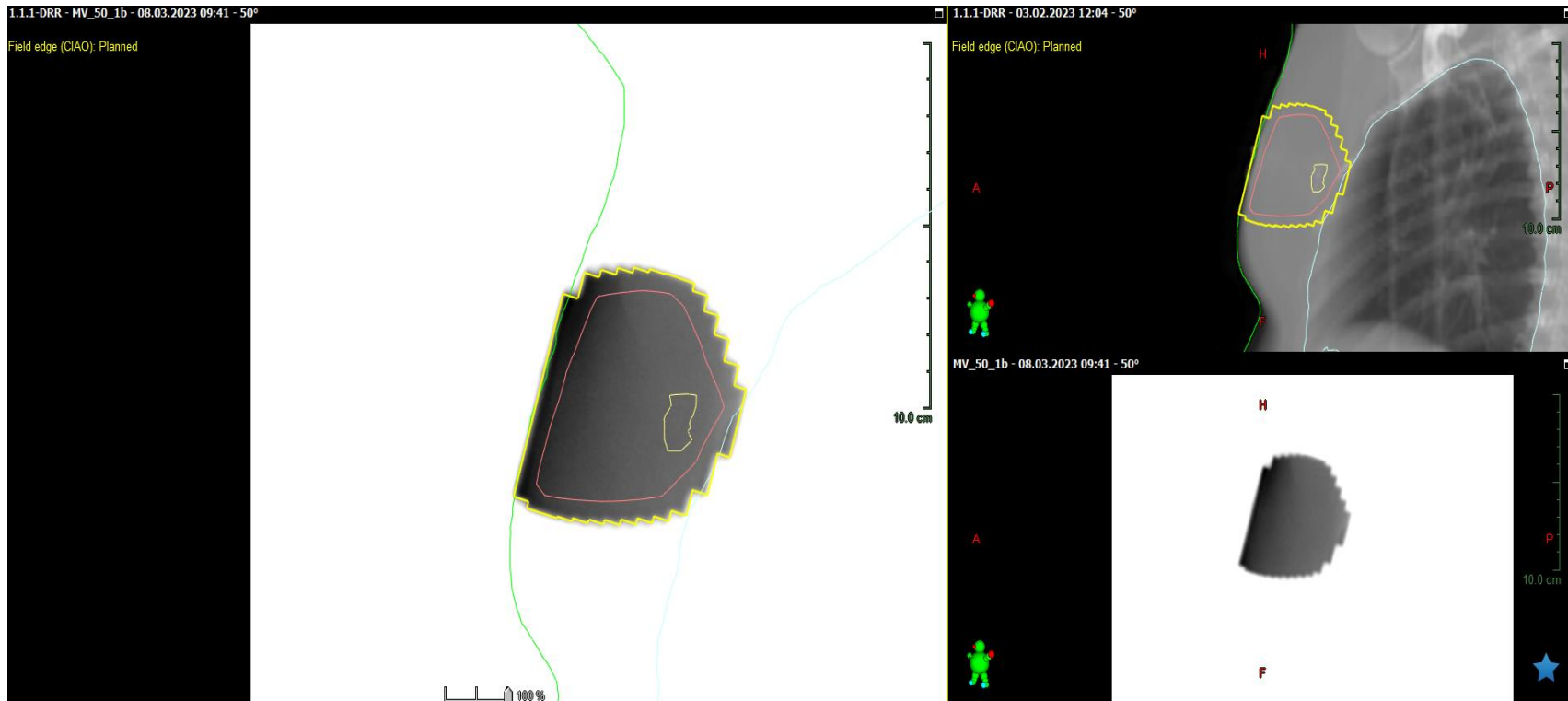
Elektronen – die Anwendung im Alltag

- Mamma – Boost, Mixed-Beam, Photonen – Elektronen



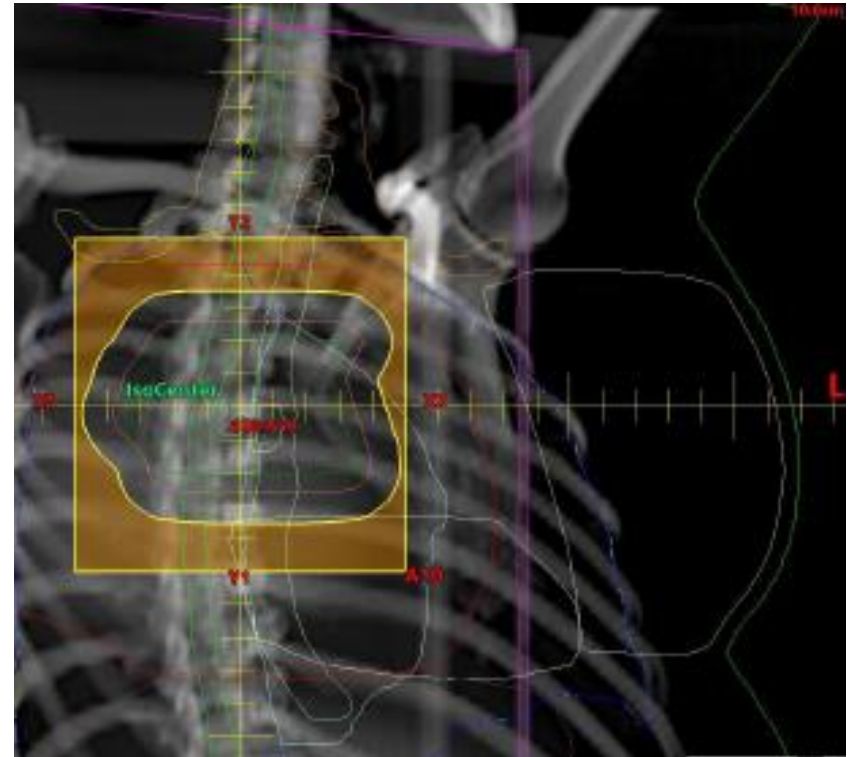
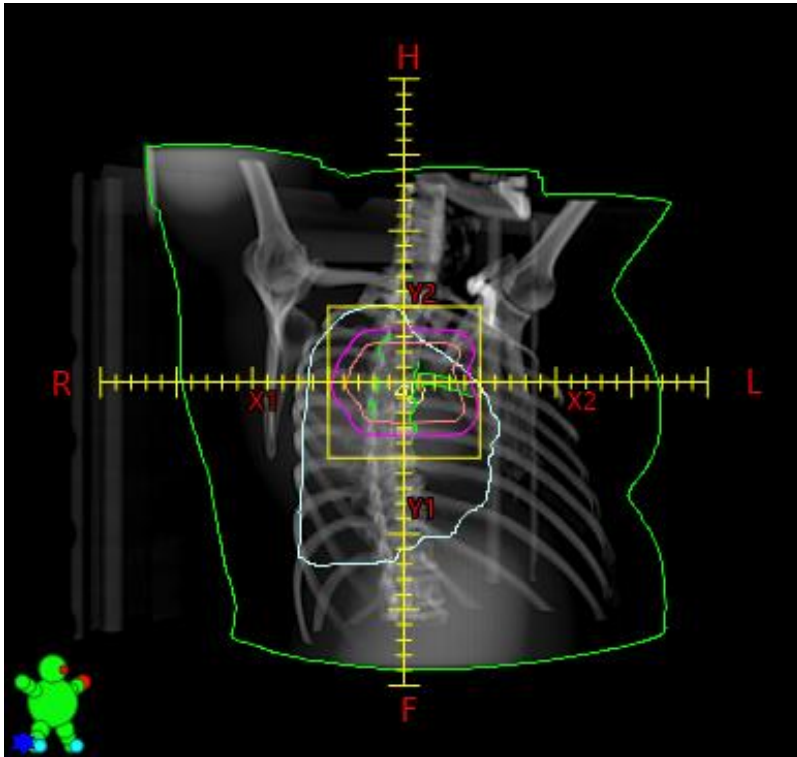
Elektronen – die Anwendung im Alltag

- Mamma – Boost, Mixed-Beam, Photonen – Elektronen



Elektronen – die Anwendung im Alltag

- Mamma – Boost, Mixed-Beam, Photonen – Elektronen



Elektronen – die Anwendung im Alltag

- Mamma – Boost, Mixed-Beam, Photonen – Elektronen

Plan ID Field ID Field Name

Treatment

Machine Tol. Table

Calculated SSD cm Treatment Time min

Planned SSD cm Use Gated

Treatment Orientation

Orientation

Couch

Couch Vrt cm Delta Vrt cm

Couch Lng cm Delta Lng cm

Couch Lat cm Delta Lat cm

Couch Rtn °




Imager

Imager Vrt cm

Imager Lng cm

Imager Lat cm

Accessories

	ID	Slot	Code
	A10	2: AccessoryMount	<input type="text" value="4001"/>
	CustomFFDA	3: ElectronAperture	<input type="text" value="3421"/>
	Block1	3: ElectronAperture	<input type="text" value="3421"/>

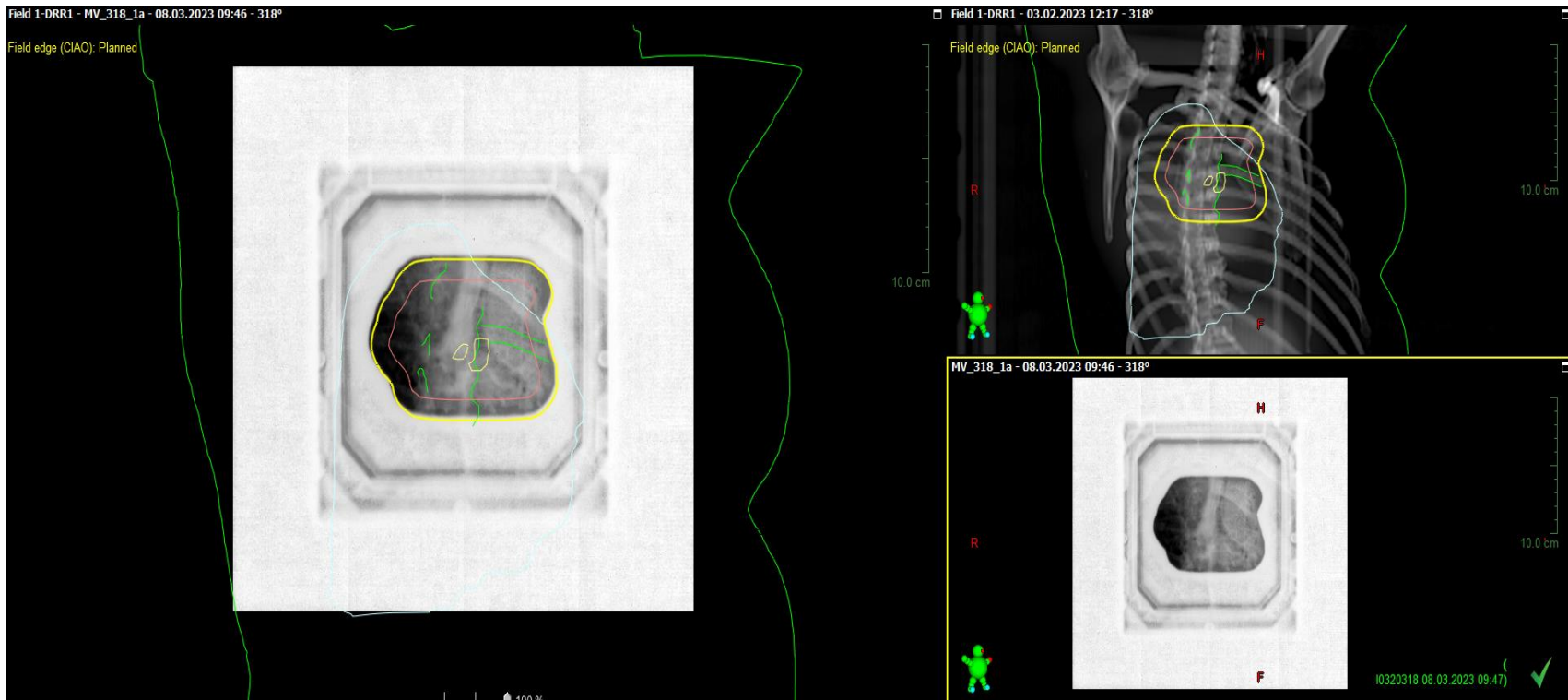
Elektronen – die Anwendung im Alltag

- Mamma – Boost, Mixed-Beam, Photonen – Elektronen



Elektronen – die Anwendung im Alltag

- Mamma – Boost, Mixed-Beam, Photonen – Elektronen, kV - MV

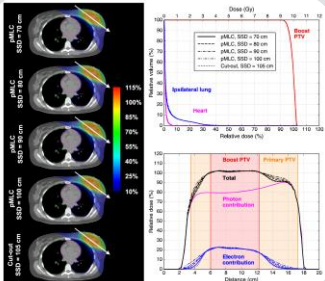


Elektronen – aus der Forschung

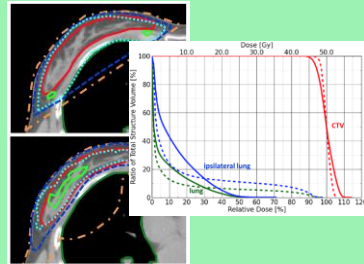
- Neuartige Elektronenkollimationstechniken
- **Modulierte Elektronenstrahlentherapie** **MERT**
Modulated electron radiotherapy
- **Step-and-Shoot-Mixed-Beam-Radiotherapie** **ssMBRT**
Step & shoot mixed beam radiotherapy
- **Dynamische Mixed-Beam-Strahlentherapie** **DYMBER**
Dynamic mixed beam radiotherapy

Elektronen – aus der Forschung

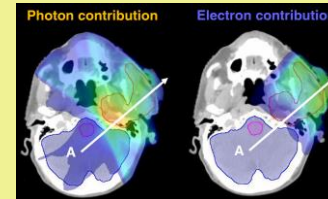
Standard electron beams using photon MLC



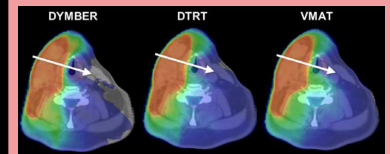
Modulated electron radiation therapy (MERT)



ssMixed beam radiation therapy (ssMBRT)



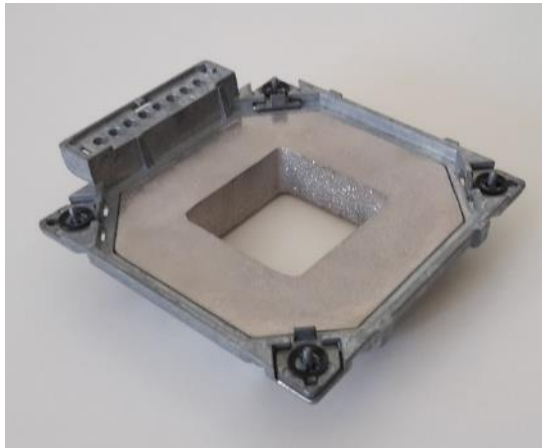
Dynamic mixed beam radiation therapy (DYMBER)



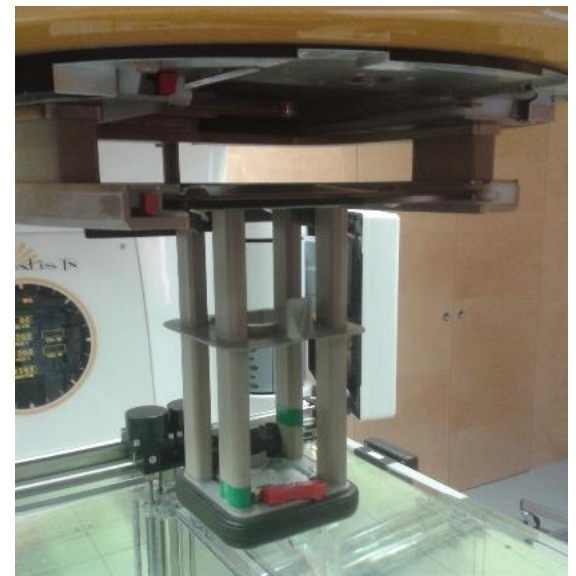
Elektronen – aus der Forschung

- Neuartige Elektronenkollimationstechniken
- Modulierte Elektronenstrahlentherapie MERT
Modulated electron radiotherapy
- Step-and-Shoot-Mixed-Beam-Radiotherapie ssMBRT
Step & shoot mixed beam radiotherapy
- Dynamische Mixed-Beam-Strahlentherapie DYMBER
Dynamic mixed beam radiotherapy

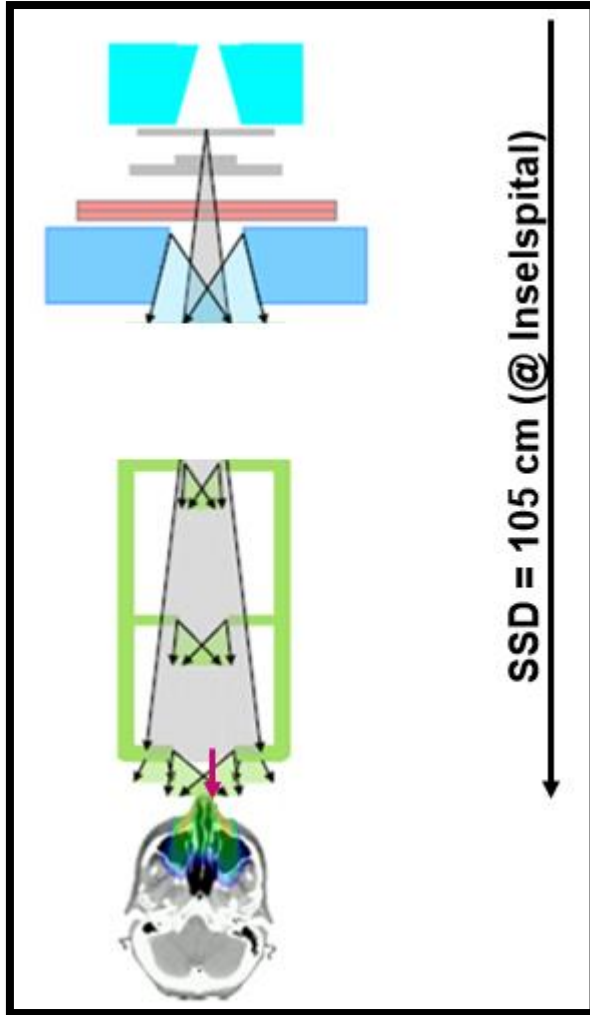
Elektronen Block



Applikator



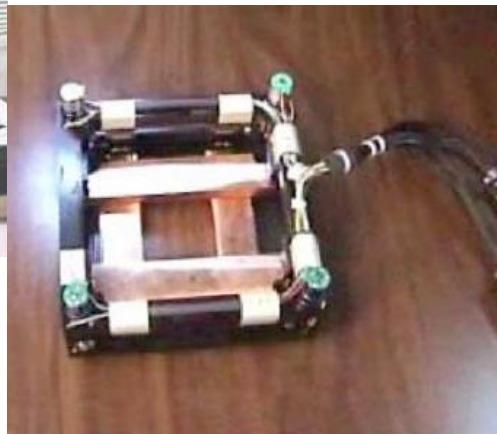
... mit Elektronenblock



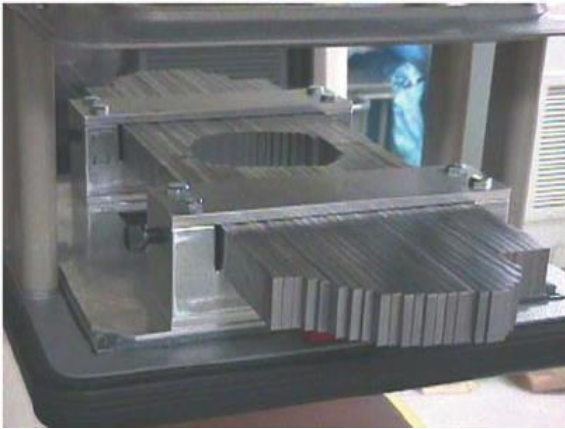
Elektronen MLC



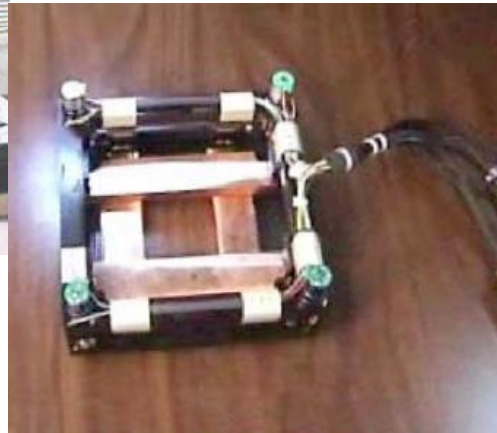
Kollimator



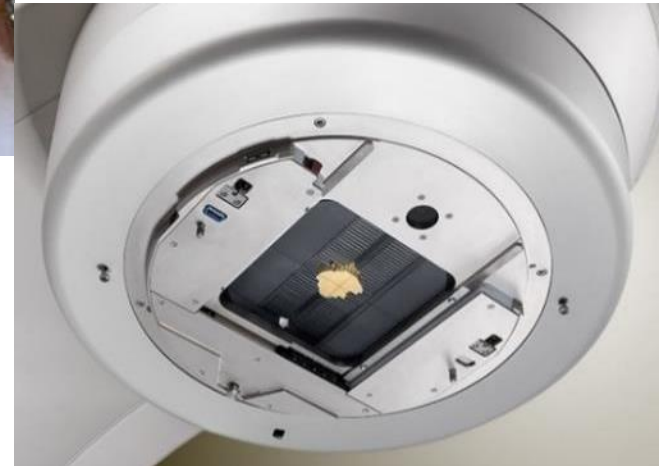
Elektronen MLC



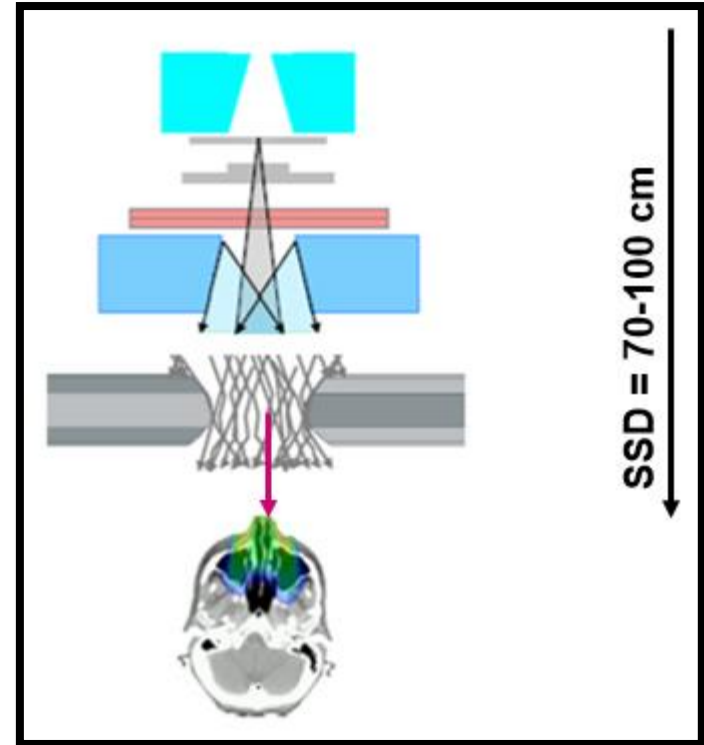
Kollimator



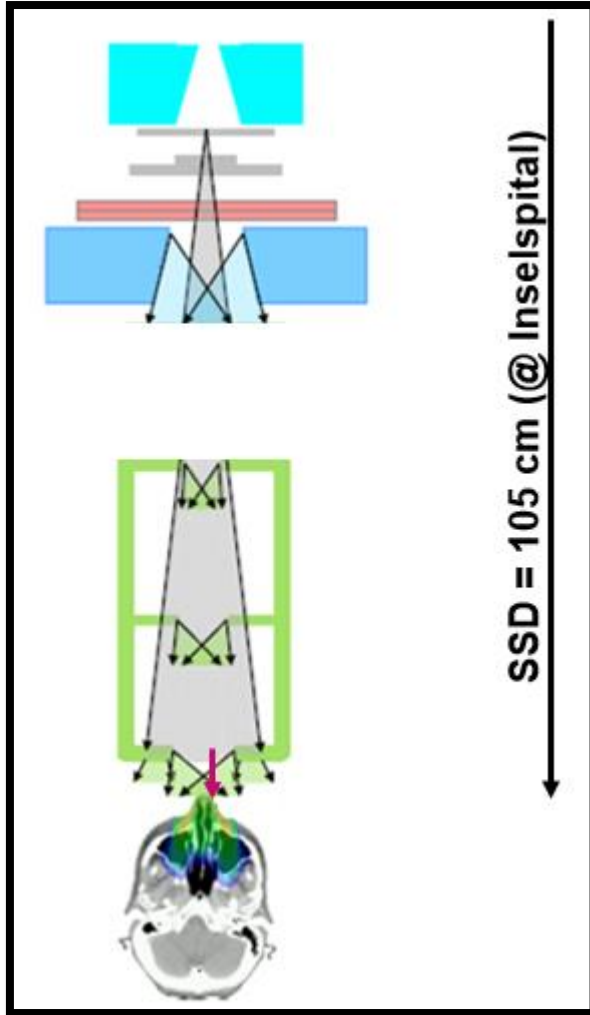
Photonen MLC | pMLC



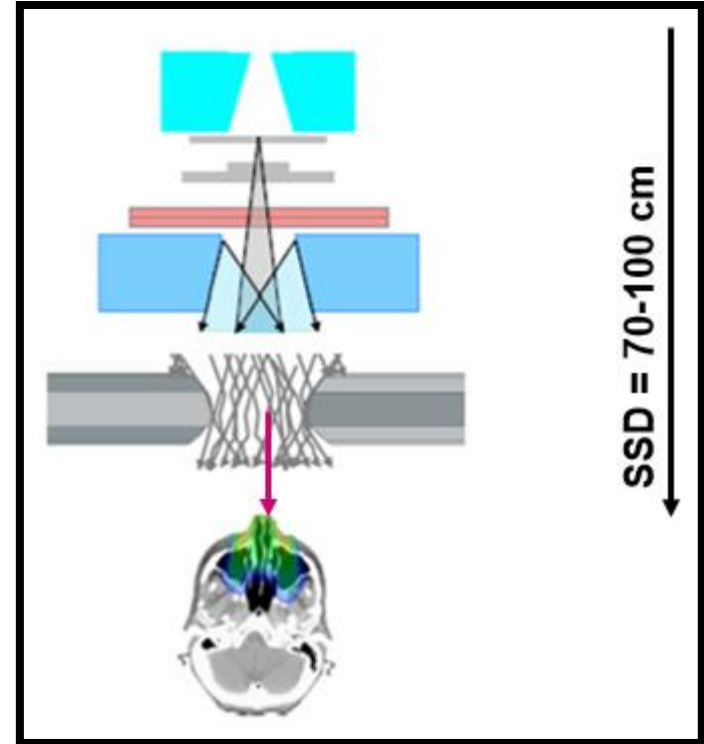
... mit pMLC



... mit Elektronenblock

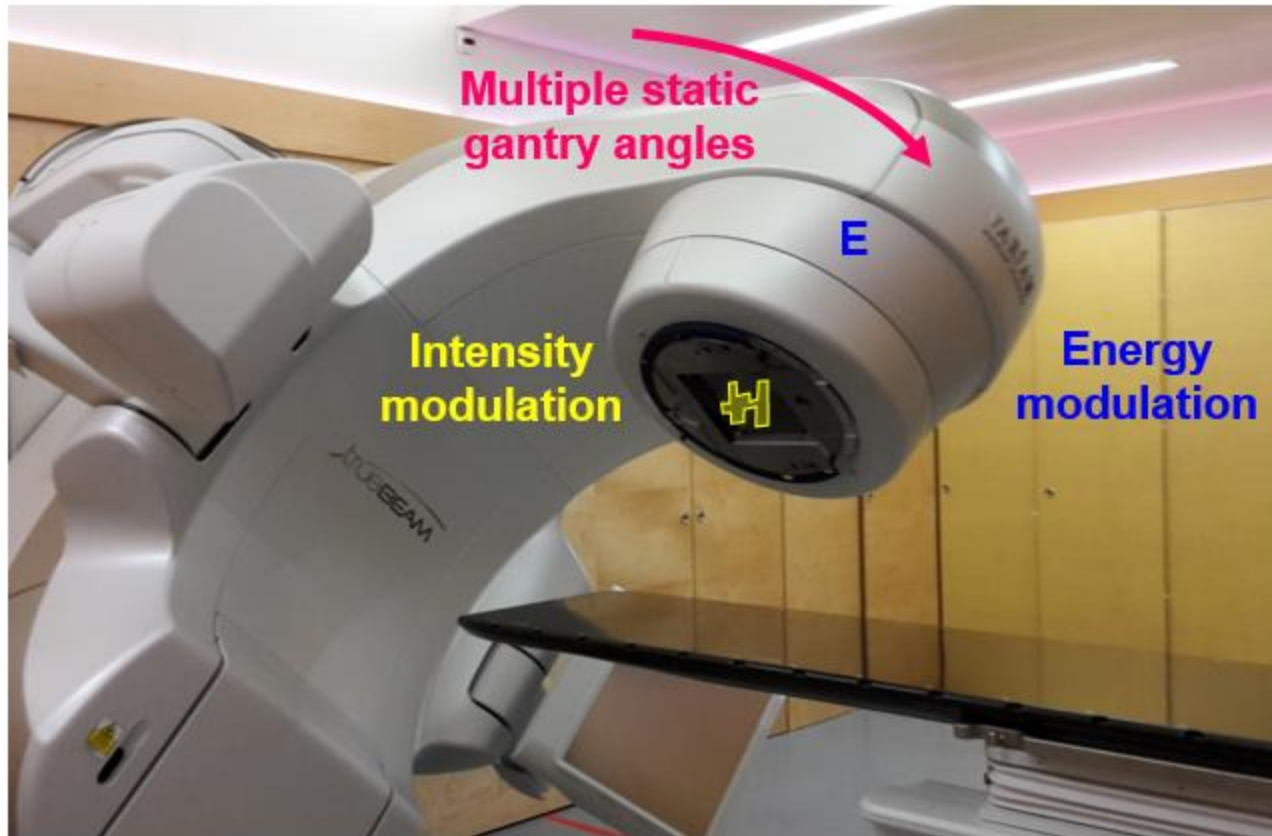


... mit pMLC



Elektronen – aus der Forschung

- Neuartige Elektronenkollimationstechniken
- **Modulierte Elektronenstrahlentherapie** **MERT**
Modulated electron radiotherapy
- Step-and-Shoot-Mixed-Beam-Radiotherapie **ssMBRT**
Step & shoot mixed beam radiotherapy
- **Dynamische Mixed-Beam-Strahlentherapie** **DYMBER**
Dynamic mixed beam radiotherapy

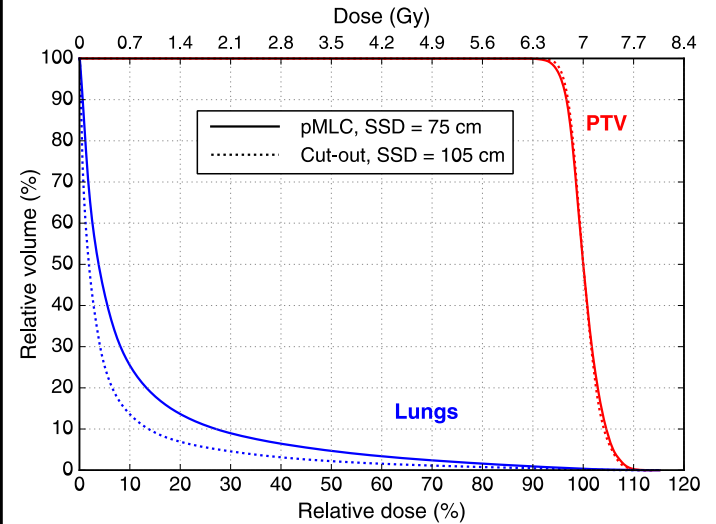
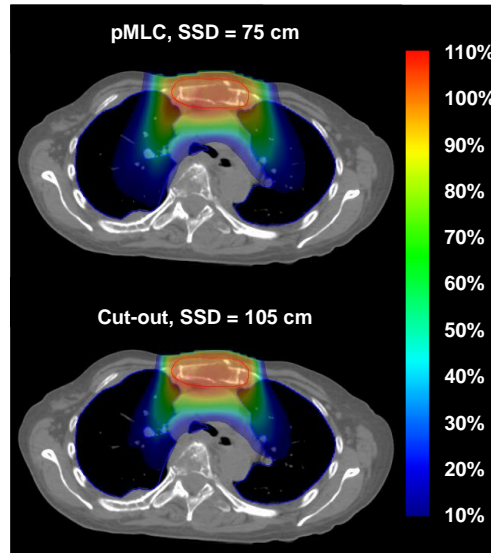


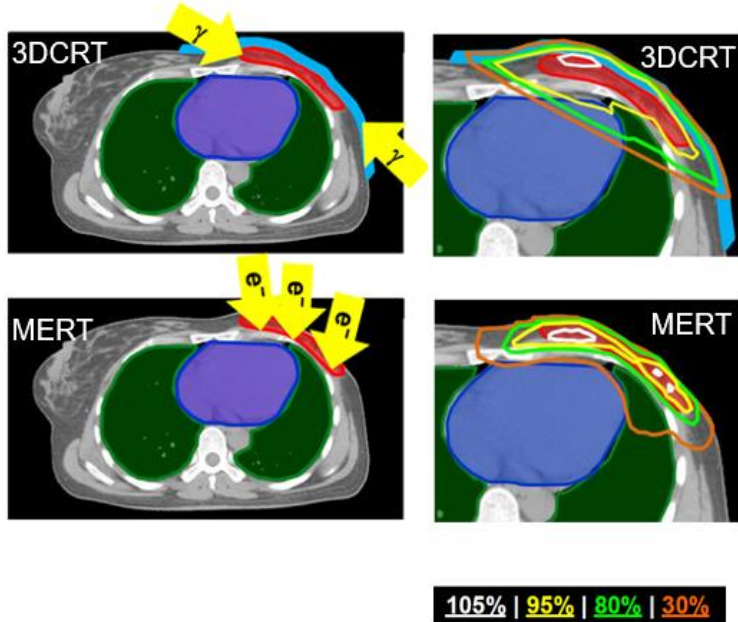
Step & shoot pMLC
electron apertures

... mit SSD 75 cm

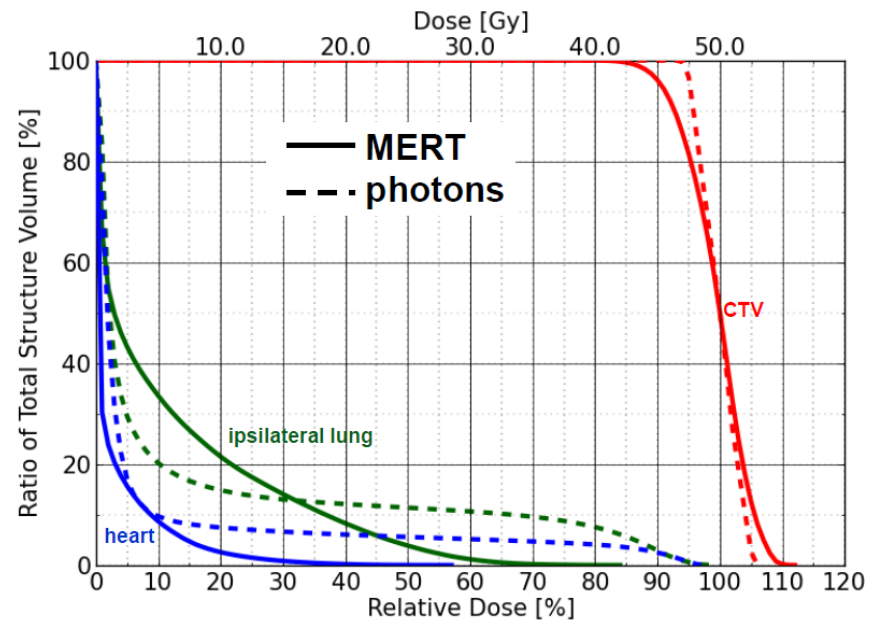


... im Vergleich pMLC mit Block



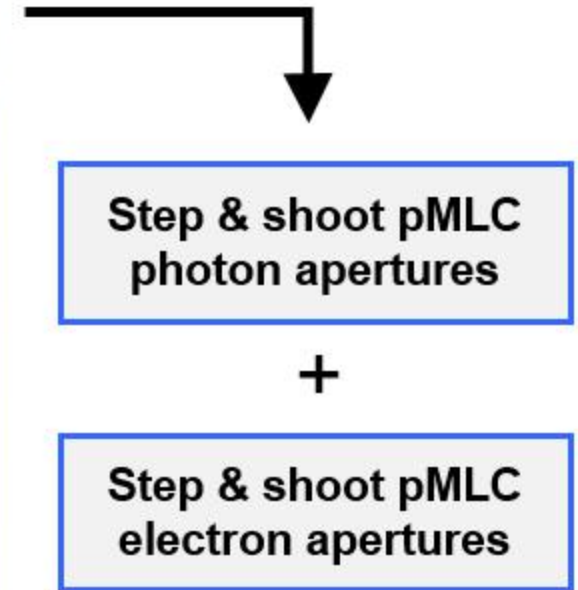
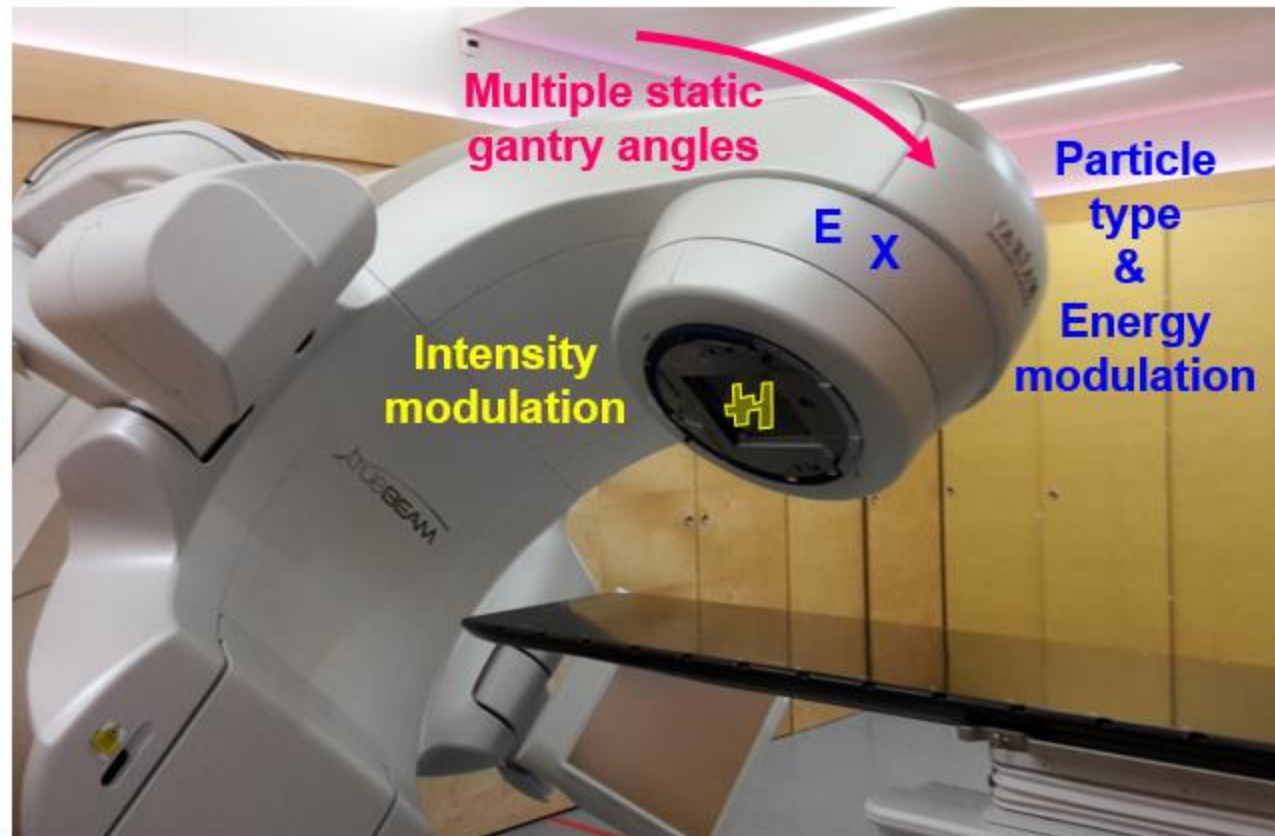


... im Vergleich 3D mit MERT

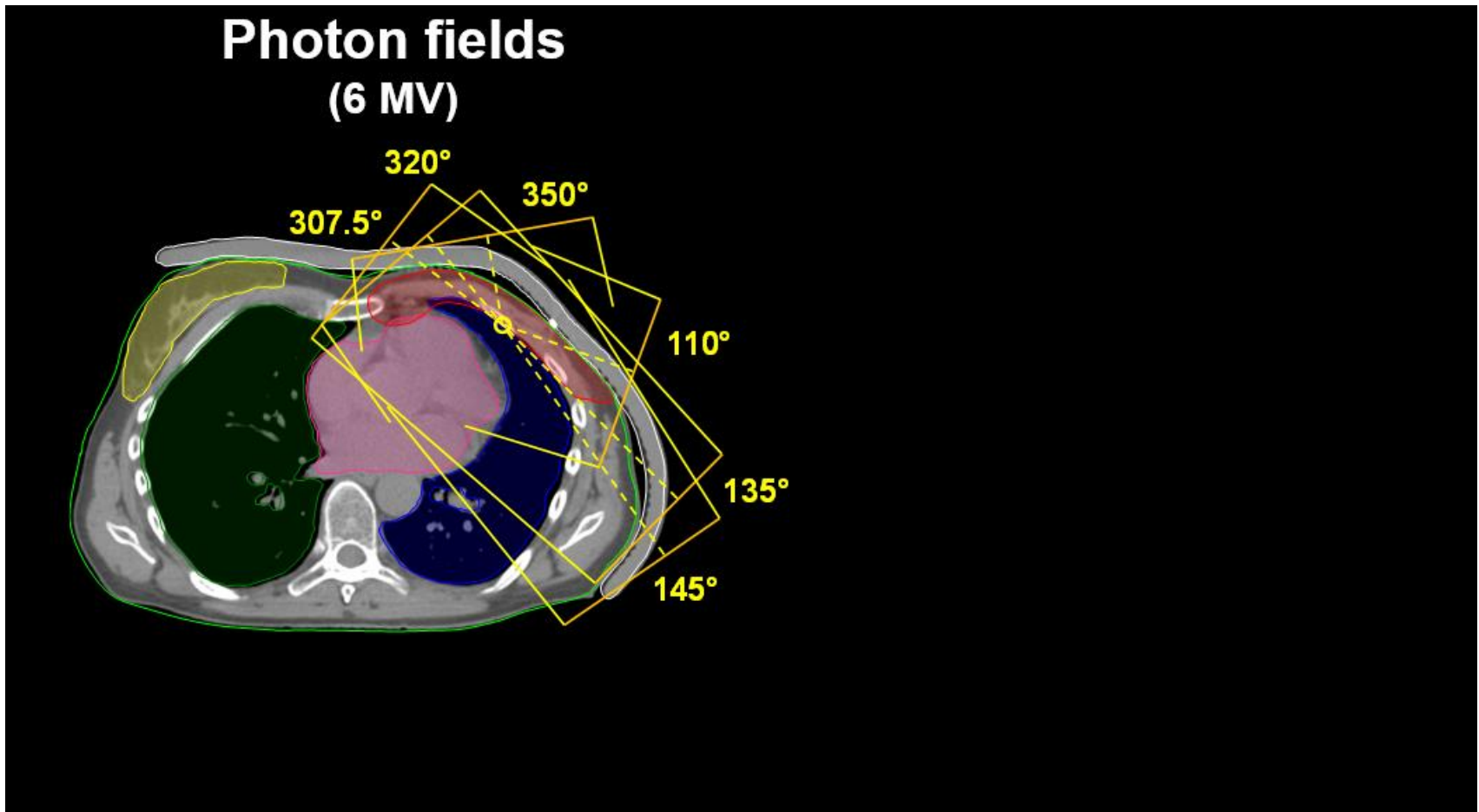


Elektronen – aus der Forschung

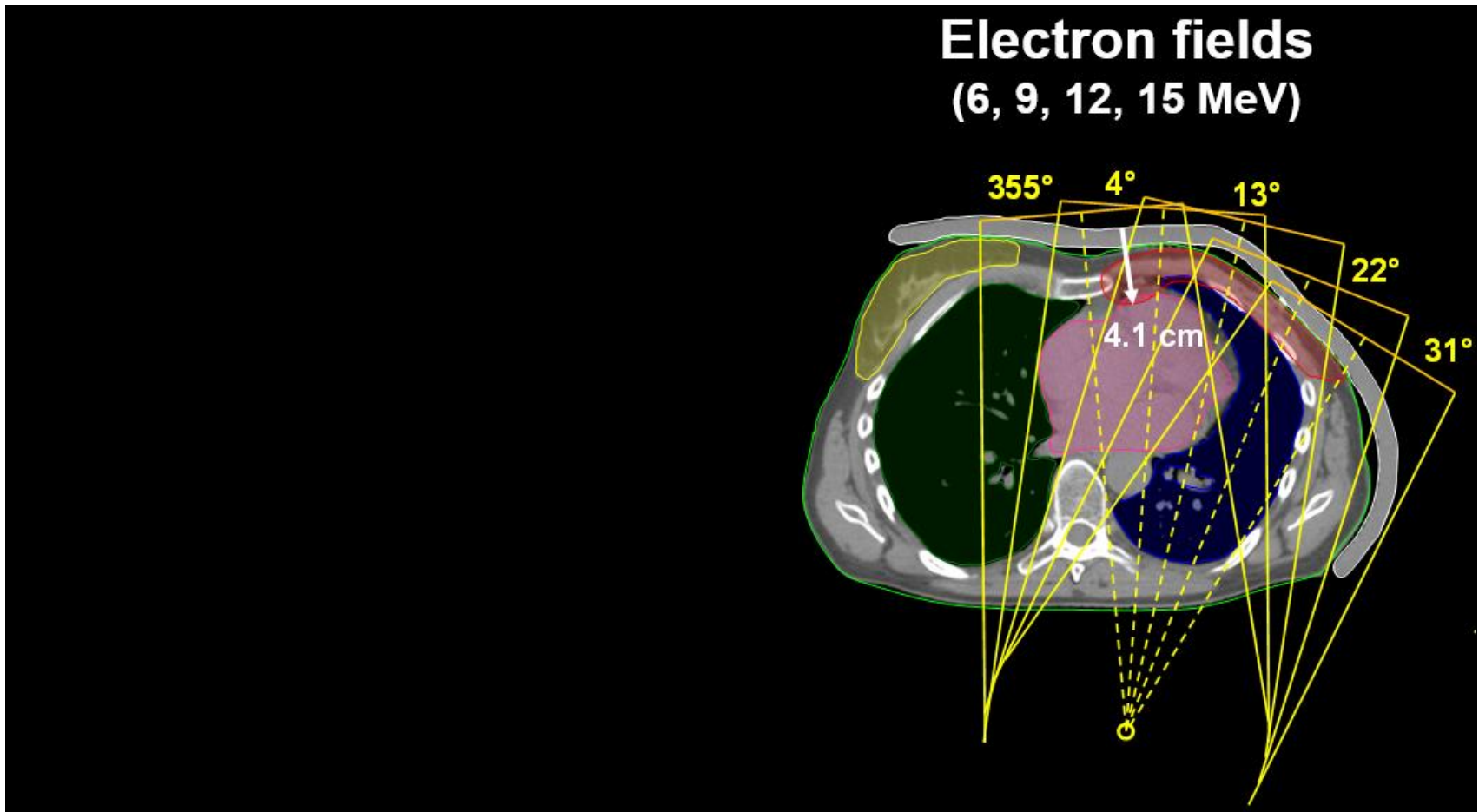
- Neuartige Elektronenkollimationstechniken
- **Modulierte Elektronenstrahlentherapie** **MERT**
Modulated electron radiotherapy
- **Step-and-Shoot-Mixed-Beam-Radiotherapie** **ssMBRT**
Step & shoot mixed beam radiotherapy
- **Dynamische Mixed-Beam-Strahlentherapie** **DYMBER**
Dynamic mixed beam radiotherapy



Photonen-Felder

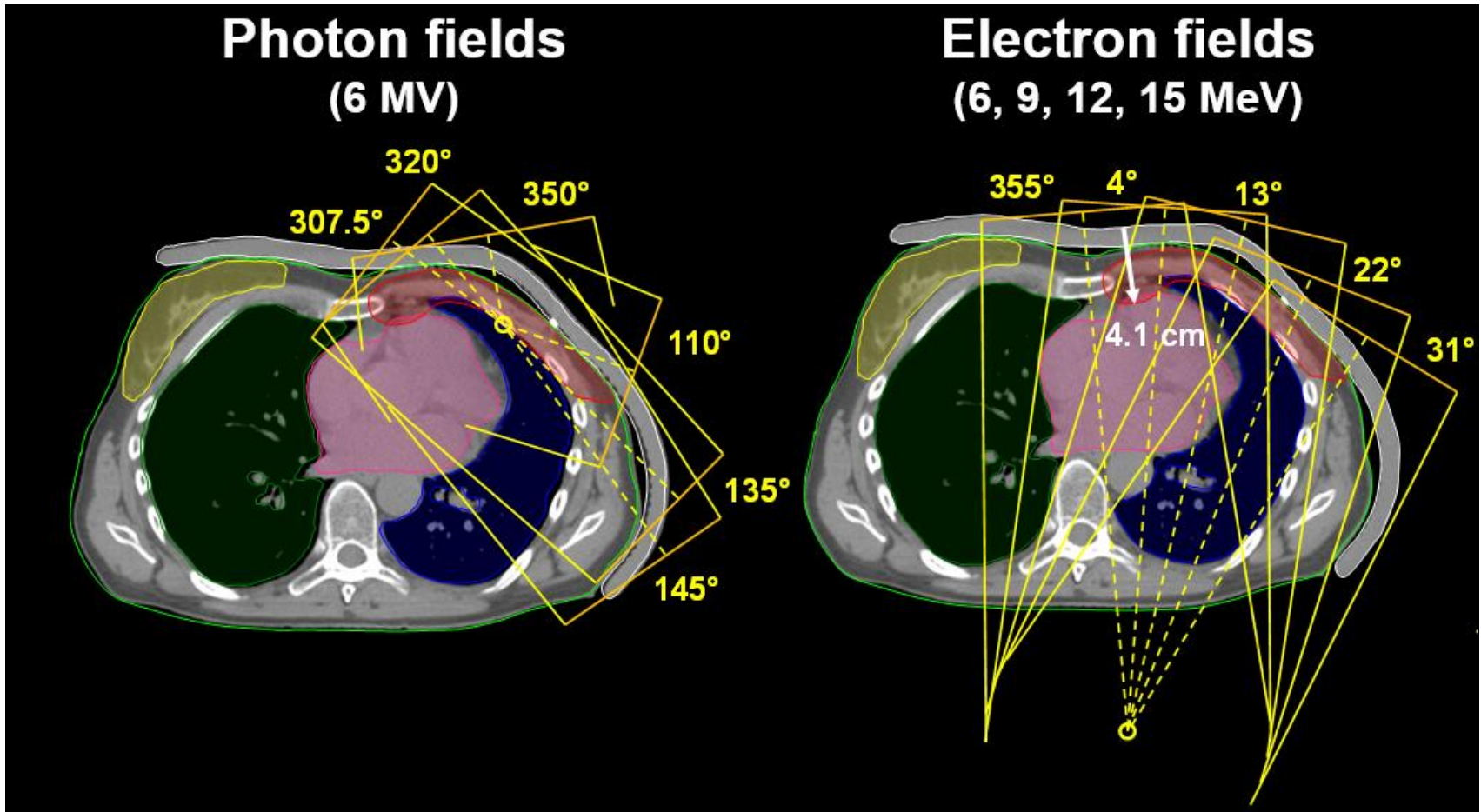


Elektronen-Felder, 1 Iso-Zentrum

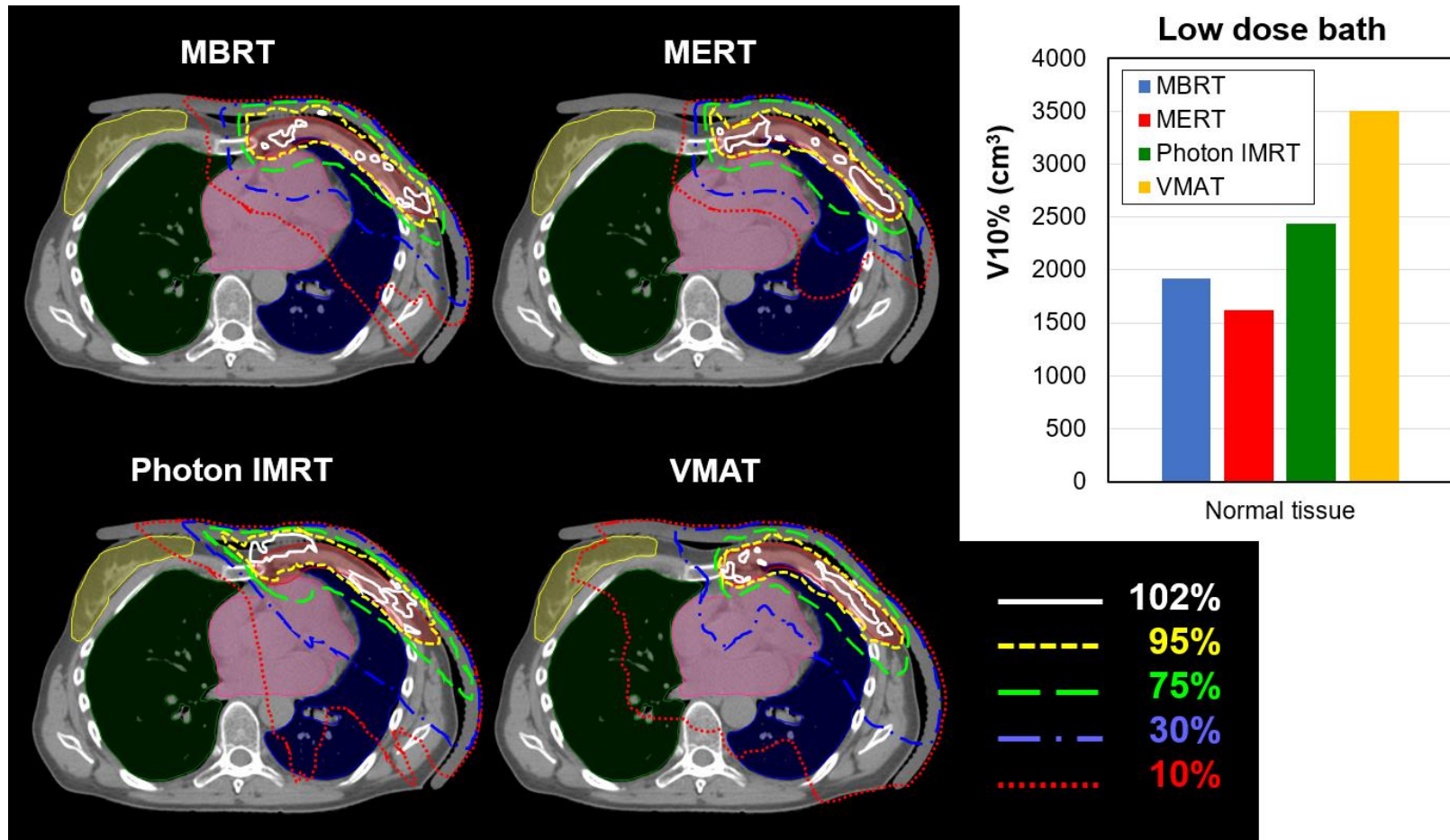


Photonen-Felder

Elektronen-Felder, 1 Iso-Zentrum

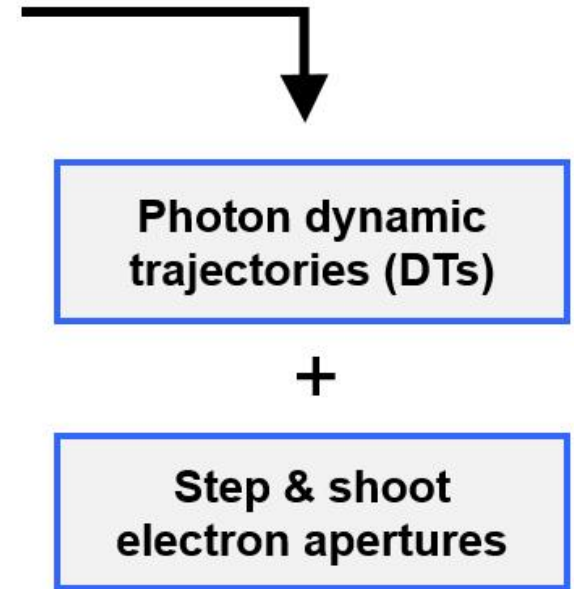
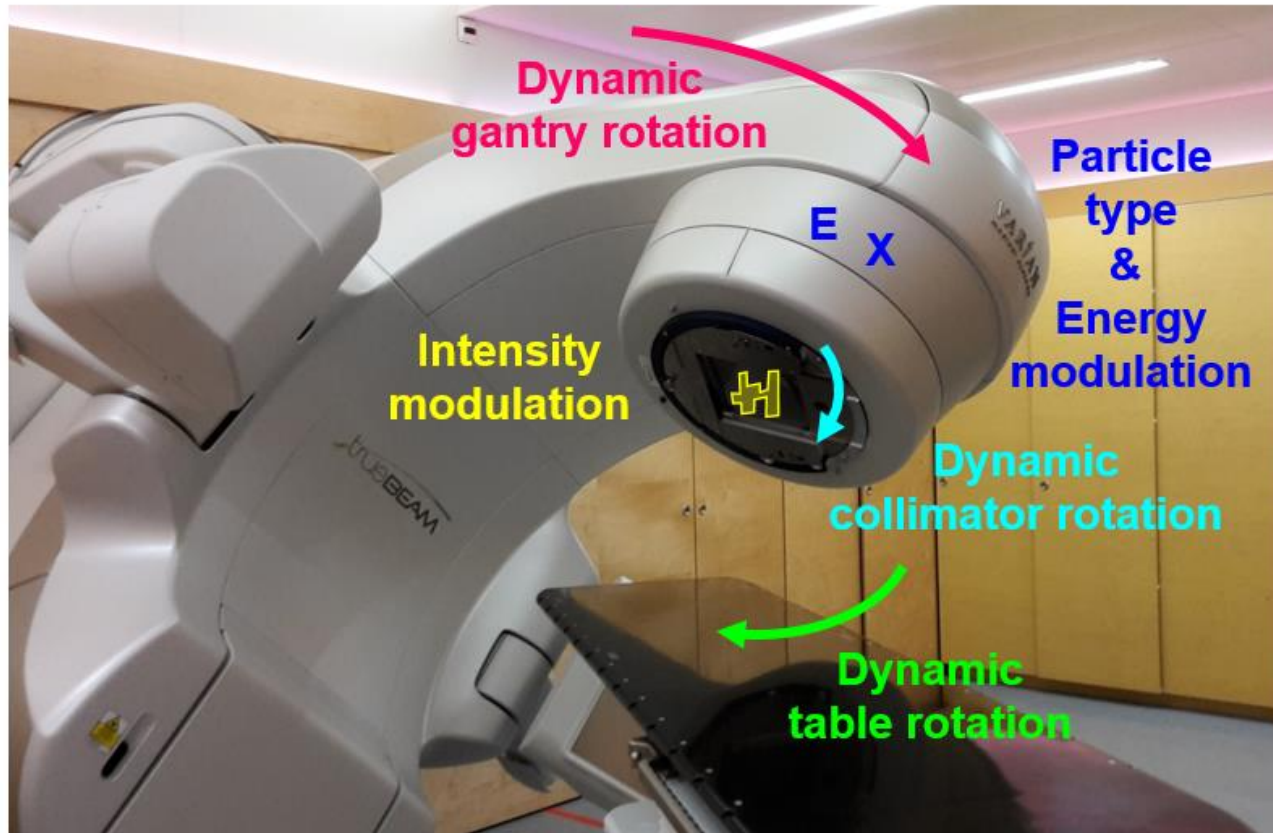


Plan-Vergleiche

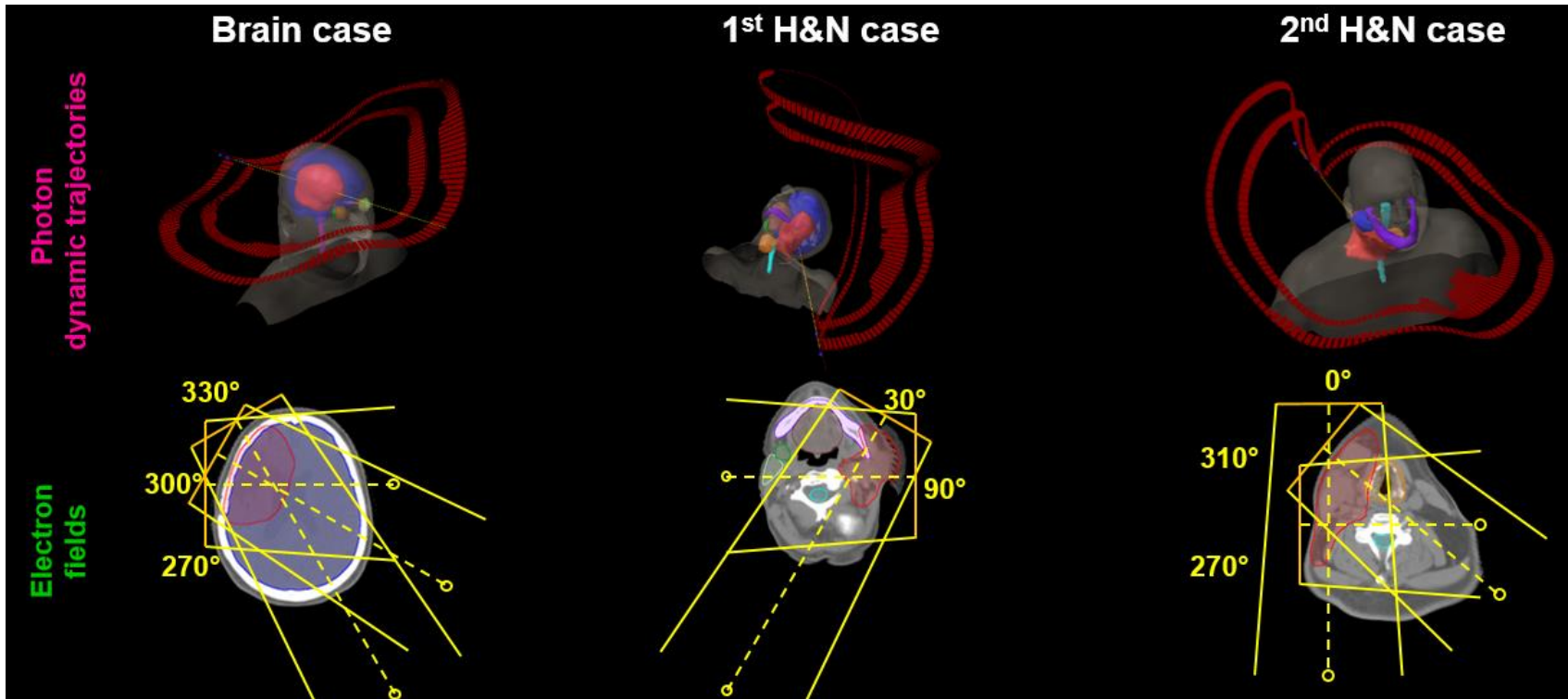


Elektronen – aus der Forschung

- Neuartige Elektronenkollimationstechniken
- Modulierte Elektronenstrahlentherapie MERT
Modulated electron radiotherapy
- Step-and-Shoot-Mixed-Beam-Radiotherapie ssMBRT
Step & shoot mixed beam radiotherapy
- **Dynamische Mixed-Beam-Strahlentherapie** **DYMBER**
Dynamic mixed beam radiotherapy

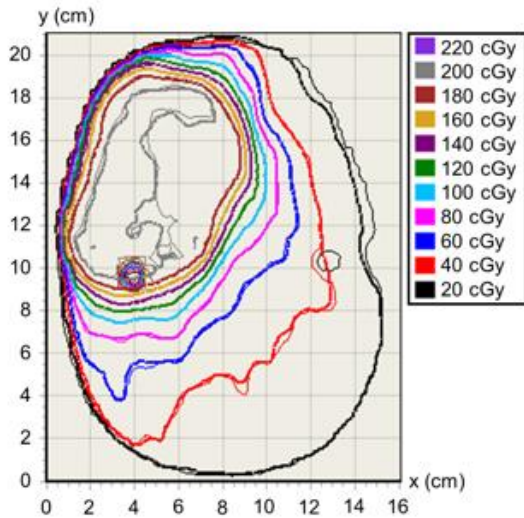


Pläne auf Phantom abgestrahlt

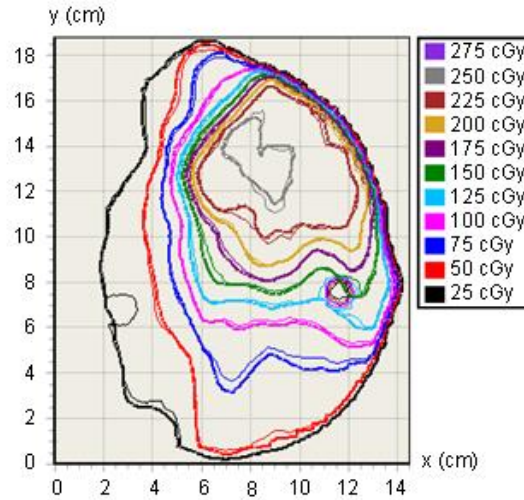


Pläne auf Phantom abgestrahlt

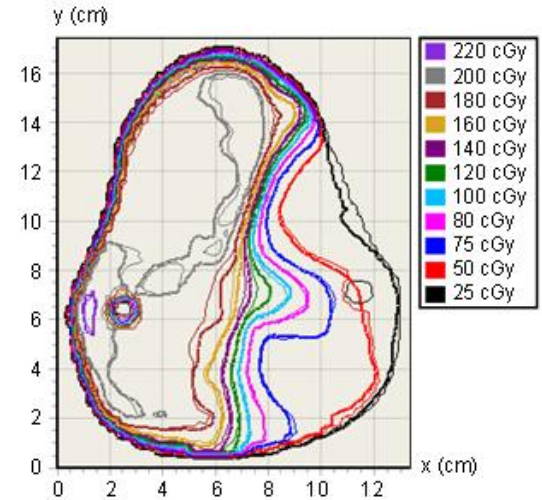
Brain case



1st H&N case

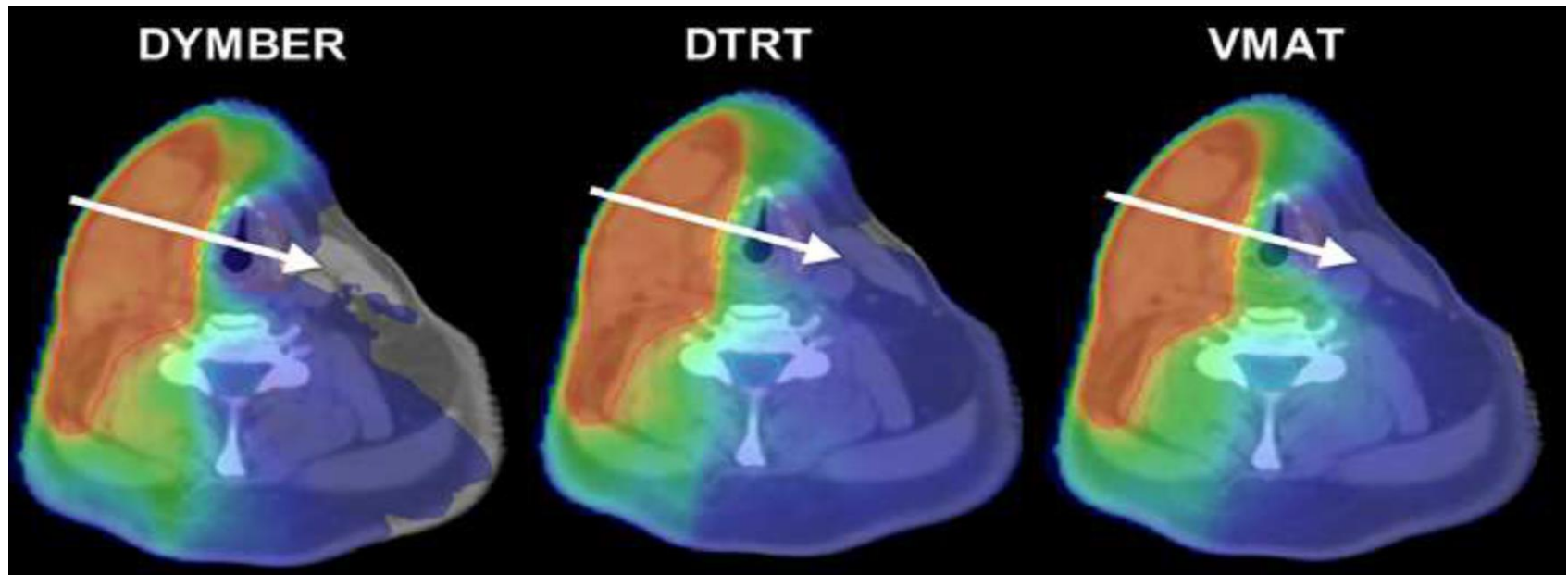


2nd H&N case



— Messungen
 — Berechnungen

Pläne auf Phantom abgestrahlt

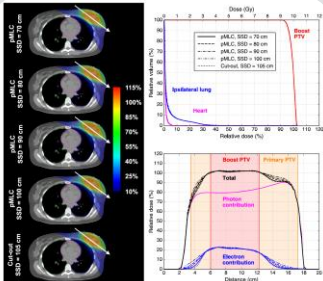


Elektronen – zukünftige Anwendungen

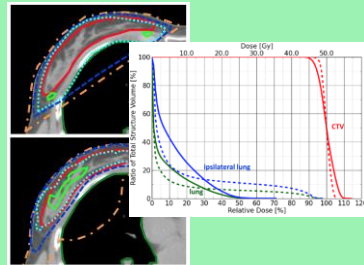
- Nach *Mueller et al., Phys. Med. Biol. 2017*
- Die pMLC-Kollimation würde den klinischen Arbeitsablauf gegenüber Blöcken drastisch verbessern
- Applizierbare ssMBRT- und DYMBER-Pläne zeigen ein grosses Potenzial zur Verbesserung der Behandlungsplanqualität gegenüber Nur-Photonen-Plänen für alle Ziele mit mindestens einem oberflächlichen Teil
- Der TrueBeam eignet sich sehr gut für pMLC-kollimierte Elektronenbestrahlungen und die Einführung von ssMBRT und DYMBER

Elektronen – zukünftige Anwendungen

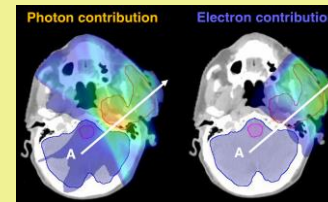
Standard electron beams using photon MLC



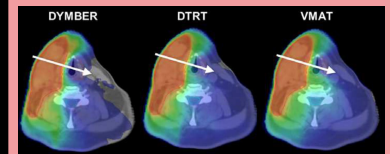
Modulated electron radiation therapy (MERT)



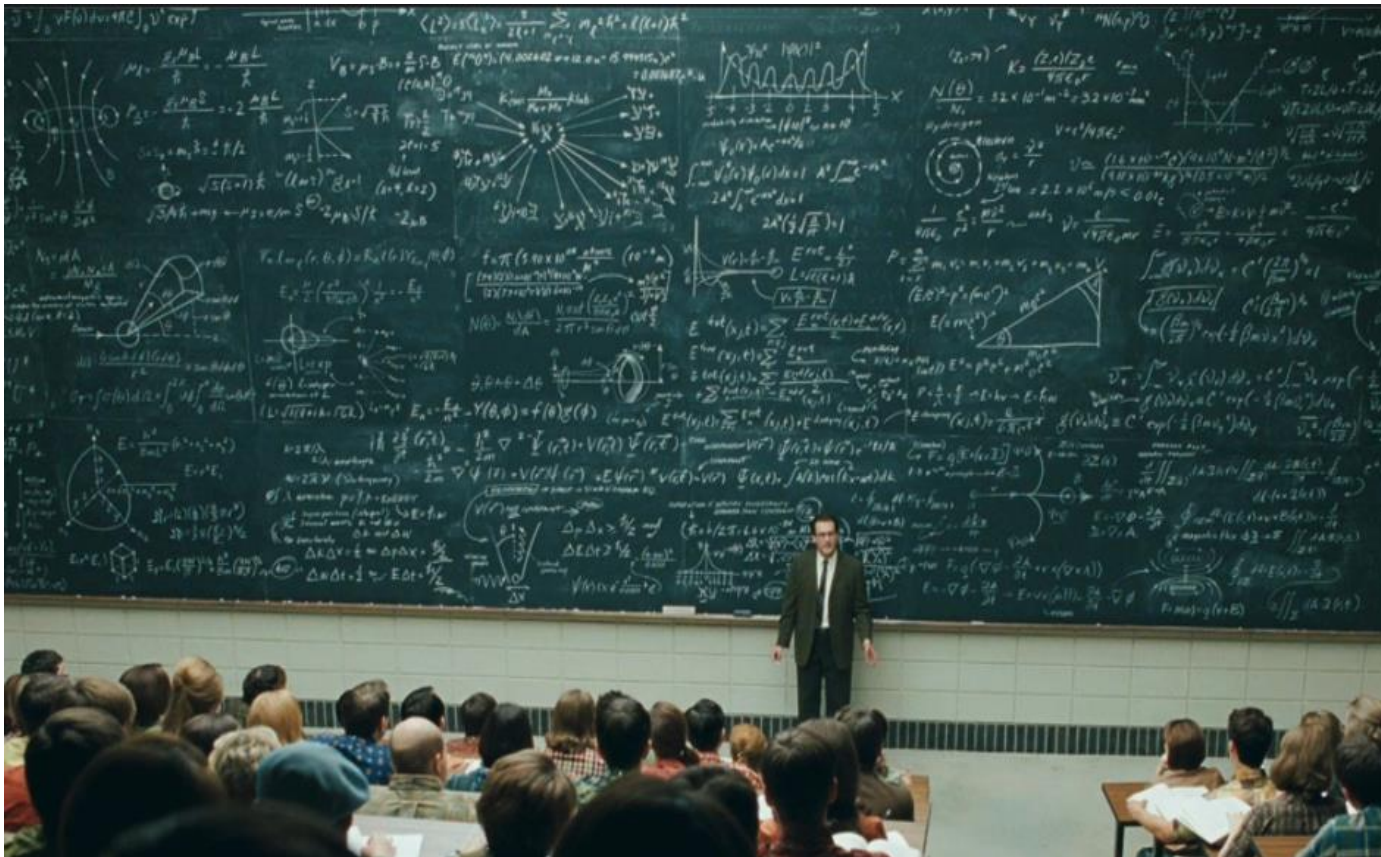
ssMixed beam radiation therapy (ssMBRT)



Dynamic mixed beam radiation therapy (DYMBER)



Elektronen – alles klar?



<http://www.radioonkologie.insel.ch/de/>

UNIVERSITÄTSKLINIK FÜR RADIO-ONKOLOGIE

<http://www.ams.unibe.ch>



Abteilung für **Medizinische Strahlenphysik**

- [AMS Info](#)
- [Forschung/Entwicklung](#)
- [Lehre](#)
- [Strahlentherapie](#)
- [Strahlenschutz](#)
- [Links](#)
- [Kontakt](#) | [Anreise](#)

Abteilung für Medizinische Strahlenphysik Division of Medical Radiation Physics

AMS INFORMATION

FORSCHUNG

STRAHLENTHERAPIE

LEHRE

$$E = mc^2$$

STRAHLENSCHUTZ

INTERN

Vielen Dank Silvan Müller, Dr. sc. ETH



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit

