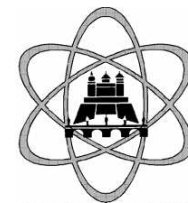


# IMRT und Patientenbewegung

*Klaus Bratengeier*

Klinik und Poliklinik für Strahlentherapie

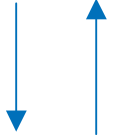


# IMRT und Patientenbewegung

- Patientenbewegung – Ausmaß und Zeitskala
- Wechselwirkung IMRT – Patientenbewegung
- Stochastische Überlegungen
- Anfragen an die bisherigen Modelle zur Beschreibung der Bewegung
- Lösungsansätze und Hilfsmittel



# Patientenbewegung: Zeitskala

- Inter-fraktionell
  - Lagerungsvariationen (Muskeltonus, Organfüllung) (stochastisch)
  - Schwellungen, Gewichtsabnahme (systematisch)
  - ...
- Intra-fraktionell:
  - Spontane Muskelbewegungen, Darmbewegungen (nicht-zyklisch)
  - Atembewegung (zyklisch)
  - ...
- 
- Geschwindigkeit der Leaf-Verschiebung (sliding window)
  - Wechsel von Segment zu Segment (step & shoot)
  - Dauer eines Segments (step & shoot) (MU und Dosisleistung!)



# Patientenbewegung: Ausmaß (Beispiele)

Organ	• Inter-fraktionell	• Intra-fraktionell
Prostata	• >5mm (bei 21 %)	• >2.5mm (bei 6.5 % der Pat.) [Huang 2005]
Pankreas, Leber	• ...	• 10 mm zyklisch [Gierga 2004]
Lunge		• 25 mm zyklisch [Shirato 2000]
Brust		• 15 mm zyklisch [George 2003]
HNO		• 5 mm (geschätzt)
Schädelbasis		• 1-2 mm (geschätzt)

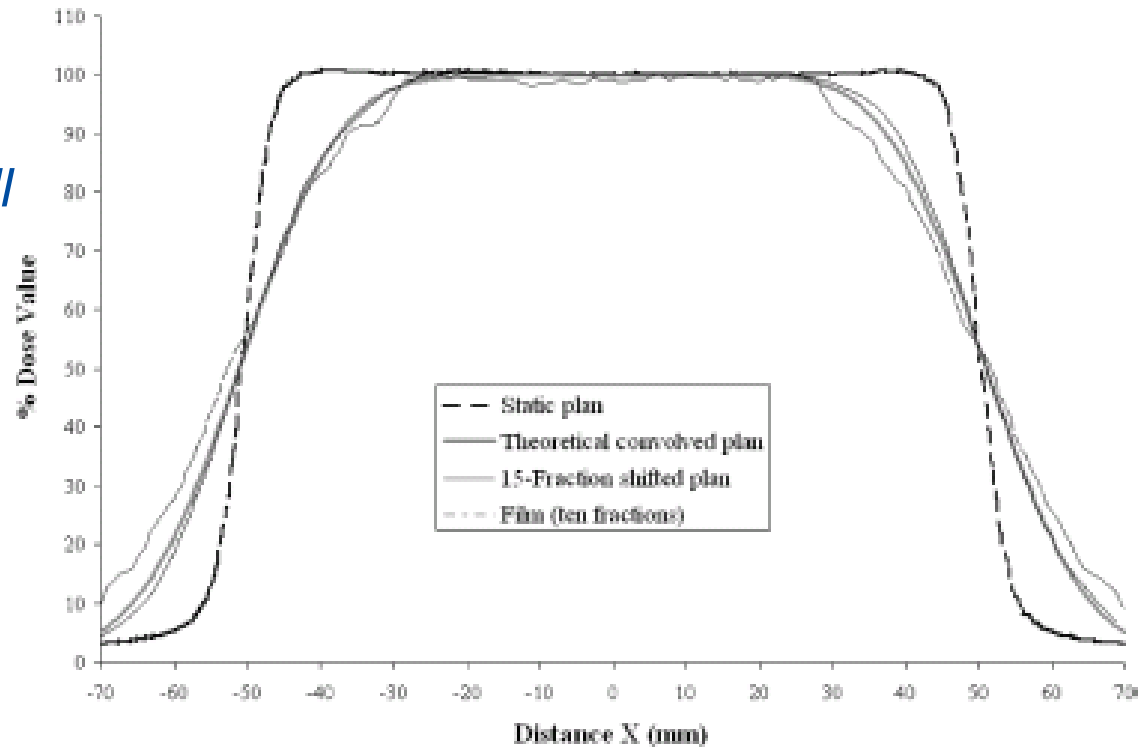


# Wechselwirkung IMRT ↔ Patientenbewegung (1)

## 1. „blurring“ (Verwischung)

*inter- und intra-fractionell*

wie bei  
konformaler  
Bestrahlung,  
[McCarter 2001]



- jedoch kritisch,  
wenn ZV und RO nahe  
beieinander liegen (Einbrüche  
bzw. Überdosierungen)  
wie es typisch für IMRT ist  
[Bortfeld 2004]



# Wechselwirkung IMRT ↔ Patientenbewegung (2)

## 2. „interplay“ (Wechselwirkung)

*nur intrafraktionell*

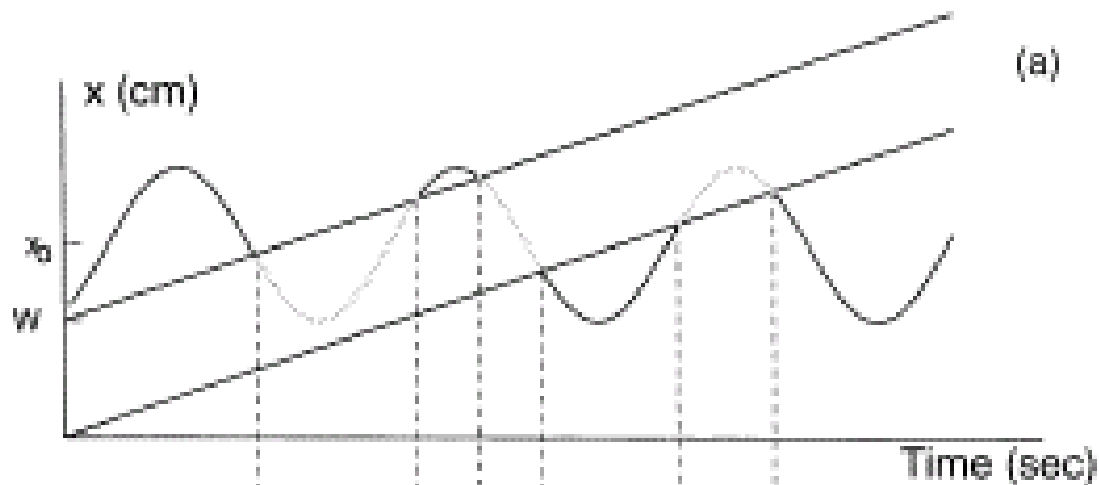
### Unterscheidung

- Leaf-Bewegung || Target-Bewegung  
[Yu 1997] (zyklische Bewegung)
- Leaf-Bewegung ⊥ Target-Bewegung  
[Bortfeld 2002][Jiang 2003][Kung 2003]:  
(zyklische Bewegung)

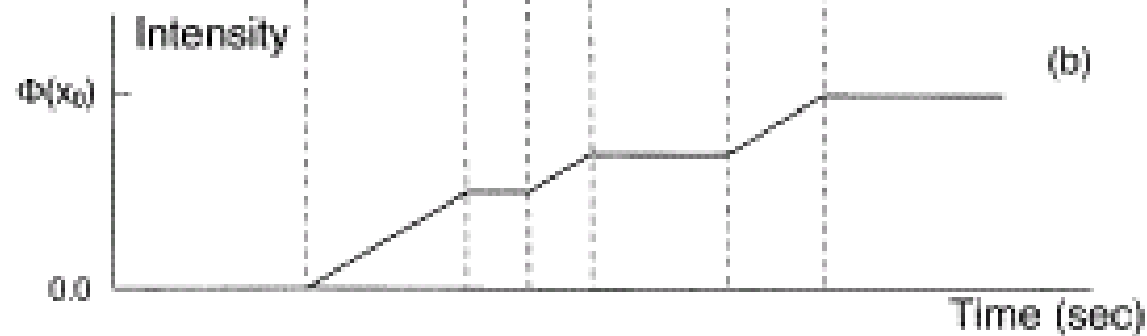


# Leaf-Bewegung || Target-Bewegung (1)

- [Yu 1997]:  
(sliding window

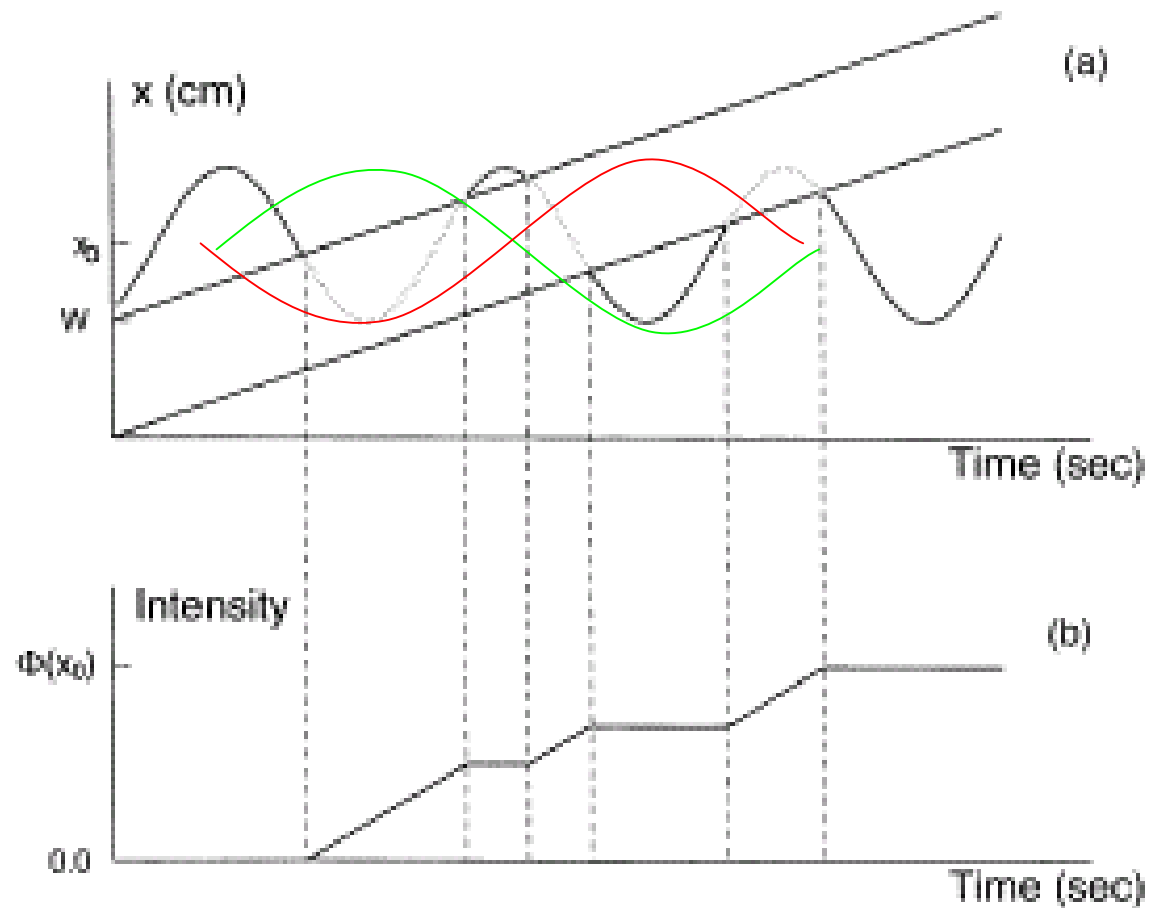


- (vgl. [Pemler 2001] dynamic wedges



# Leaf-Bewegung || Target-Bewegung (1)

- [Yu 1997]:  
(sliding window)



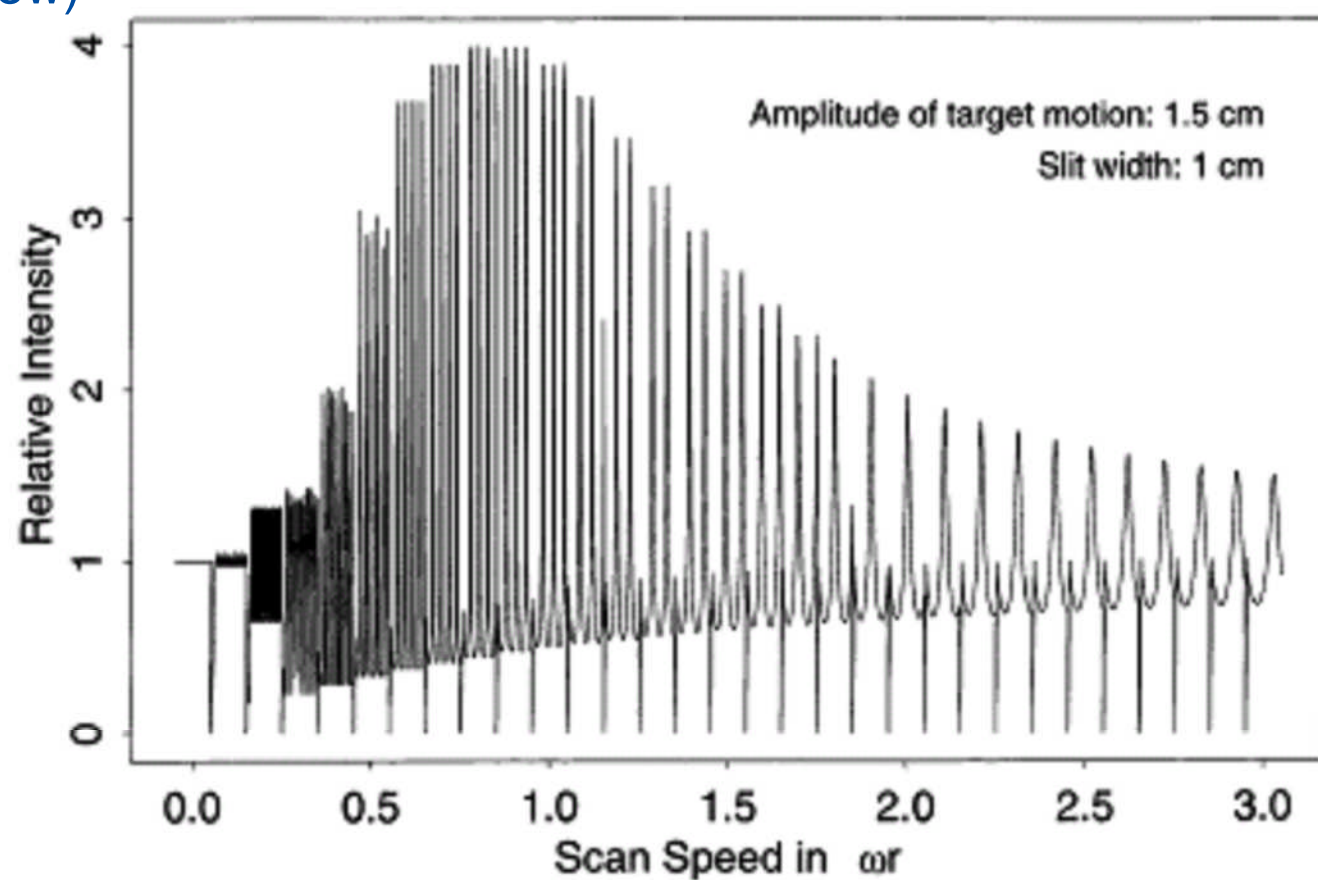
(step & shoot:  
Waagrechte Rechtecke)





# Leaf-Bewegung || Target-Bewegung (2)

- [Yu 1997]:  
(sliding window)

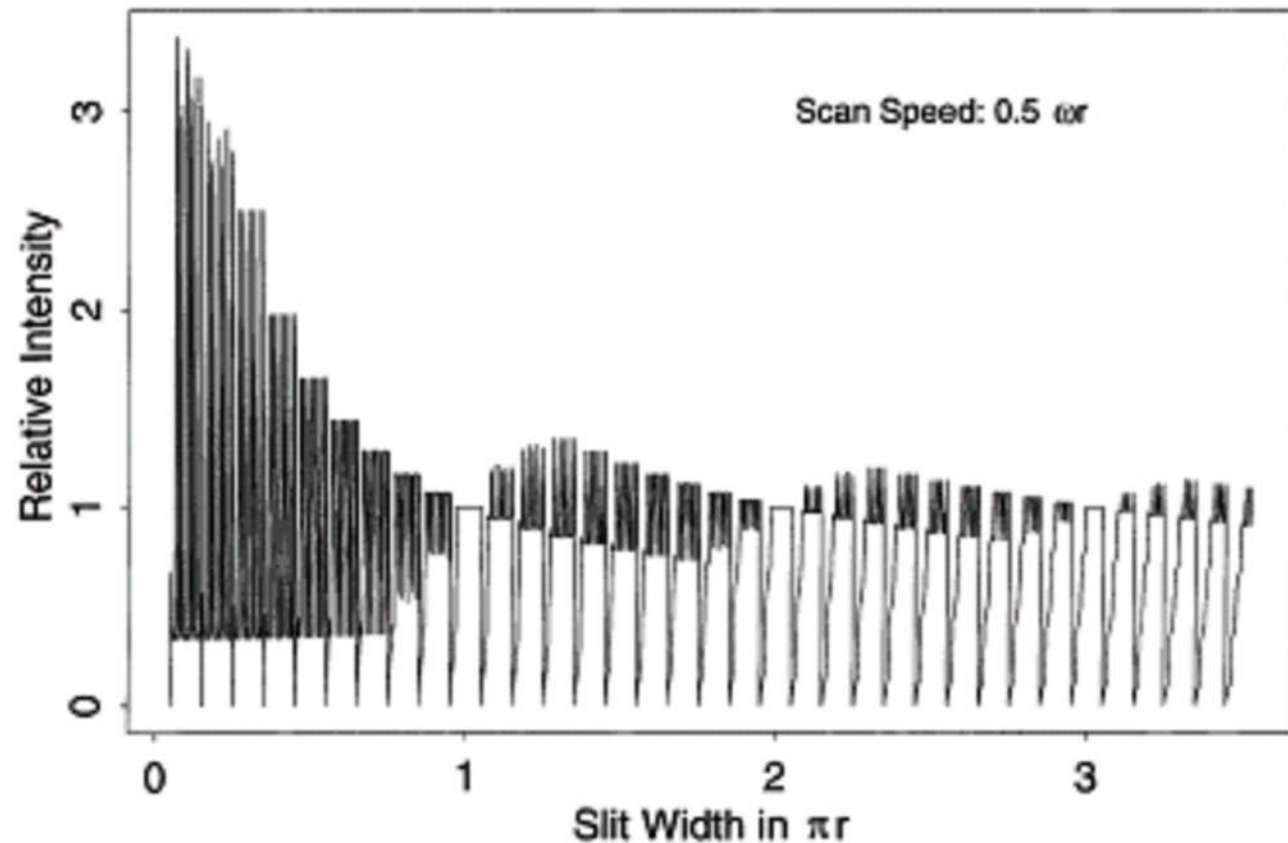


- Kritisch: Leafgeschwindigkeit  $\approx$  maximale Geschwindigkeit des Organs



# Leaf-Bewegung || Target-Bewegung (3)

- [Yu 1997]:  
(sliding window)



- Kritisch: schmales Segment

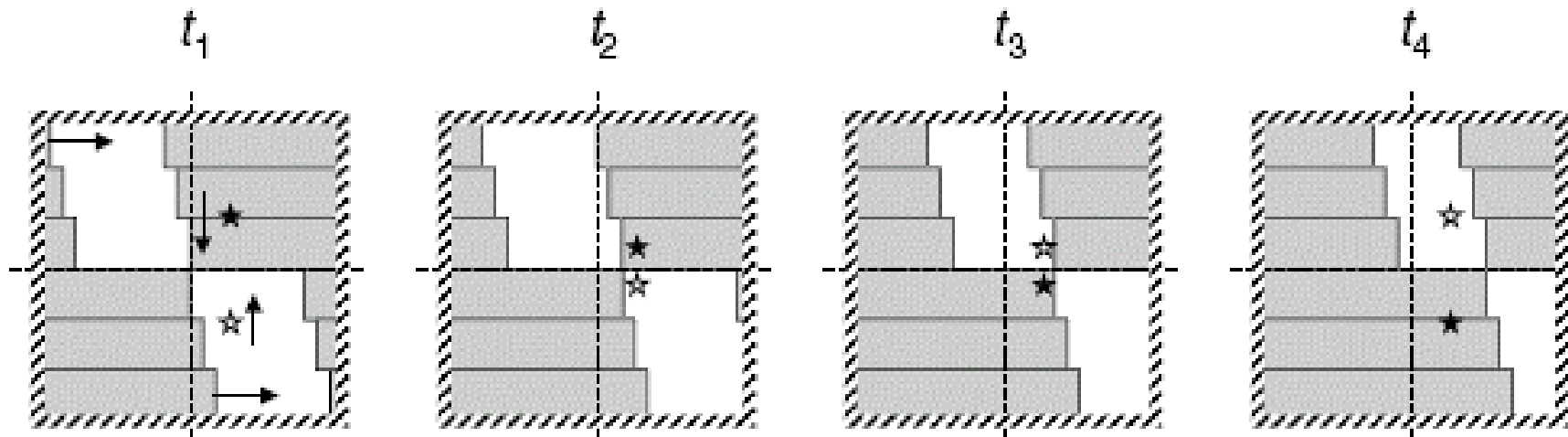
# Leaf-Bewegung || Target-Bewegung (4)

## - Lerneffekt für step & shoot

- Kritisch: (viele) schmale Segmente
- Kritisch: Segmentwechsel korreliert mit Atemzyklus, Segmentbestrahlungsdauern in der Größenordnung einer halben bis zu einer ganzen Atemphase (2-4 s)

# Leaf-Bewegung $\perp$ Target-Bewegung

- [Bortfeld 2002]:  
(sliding window)



Abweichung von der gewünschten Bestrahlungsdauer an einem mobilen Punkt durch Leaf-Bewegung

# Statistische Überlegungen

[Bortfeld 2002]:

- Selbst bei einer bimodalen Aufenthaltsverteilung (Maxima der Aufenthaltswahrscheinlichkeit bei maximaler Einatmung bzw. Ausatmung) sollten etwa fünf Fraktionen reichen, eine im Mittel homogene Dosisverteilung herzustellen
- Voraussetzung: Start der Bestrahlung an stochastischen Atemphasen
- Achtung: genau diese Bedingung gilt nicht für atem-getriggerte Bestrahlungen!
- Achtung: Modell gilt nur für Gebiete mit kleinem effektivem Dosisgradienten!

[Jiang 2003]: Messungen dazu, an 1 zentralen Punkt maximale Abweichungen zum statischen Fall:

- 30% Dosisfehler für ein Feld in 2 Fraktion
- 18% Dosisfehler für alle Felder in 1 Fraktion
- 5% Dosisfehler für alle Felder in 30 Fraktionen



## Anfragen: Einfluss der Volumenauswahl der bisherigen Studien

- Große Abstände zwischen ZV und kleinen OAR (Lunge umgibt ZV relativ gleichmäßig)
- Bisher Untersuchungen mit „harmlosen Fluenzmodulationen“ von  $\pm 30\%$  des Mittelwerts für Kompensationen von Absorption und Streuverlusten
- (Abschattungseffekt ZV-naher OAR erfordern dagegen Fluenzmodulationen um  $+50\%$  bis  $+200\%$  [Bratengeier 2005])
- Daher nur geringe zentrale Fluenz-Gradienten
- Vermutlich sind Fälle mit größerem Gradienten anfälliger für Patientenbewegungen



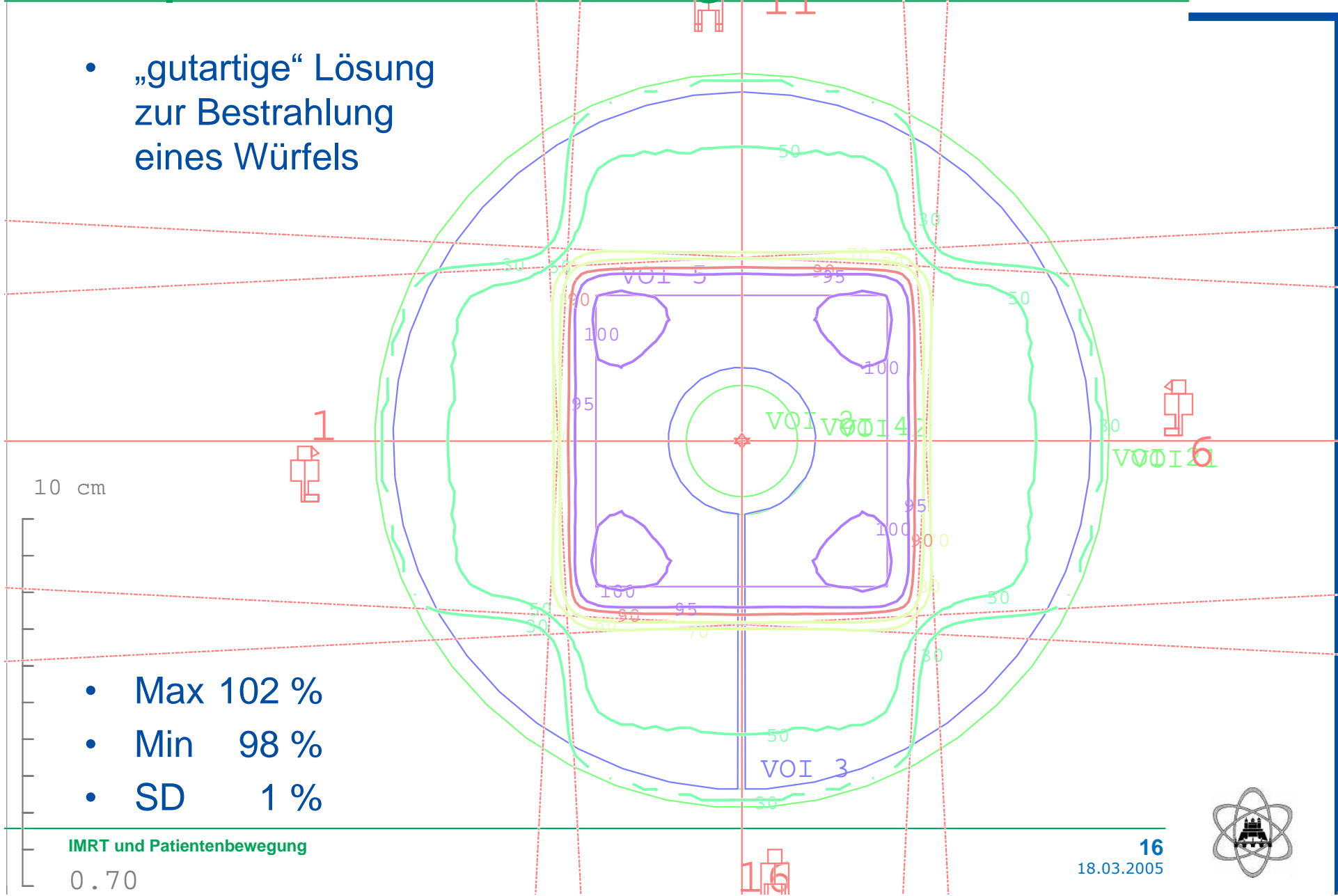
## Anfragen: Einfluss des Optimierungs-Algorithmus der bisherigen Studien

- Fast alle Untersuchungen wurden mit IMRTs durchgeführt, die mit demselben Planungssystem generiert wurden (HELIOS / CADPLAN) (sliding window!)
- Verschiedene Optimierungs-Algorithmen und insbes. Zielfunktionen können zu sehr unterschiedlichen Optimierungslösungen führen
- Die Ursache für die unterschiedlichen Lösungen kann auch in dem meist sehr großen Lösungsraum zu suchen sein, innerhalb dessen verschiedene „entartete“ Lösungen gefunden werden können, d.h. Lösungen mit nahezu gleichem Wert für die Zielfunktion (abhängig von der „Strenge“ der Randbed.) [Wu, Mohan 2002]
- Insbesondere sind „verrauschte“ Lösungen möglich [Mohan 2002]: - Ergebnis in erheblichem Maße abhängig von Startbedingungen
- Sind alle Lösungen gegenüber Bewegungen gleichermaßen unempfindlich?



# Beispiel zum Einfluss des Algorithmus

- „gutartige“ Lösung zur Bestrahlung eines Würfels



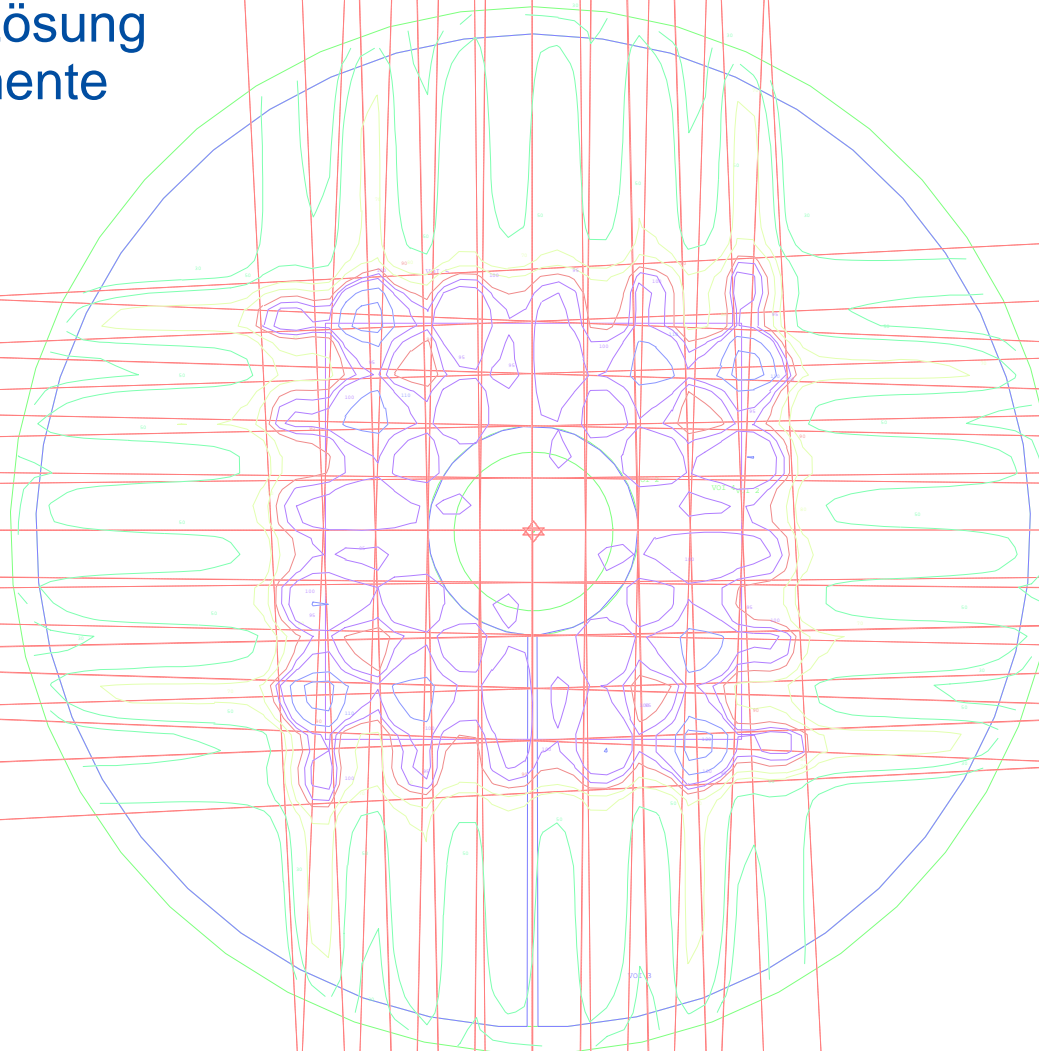
- Max 102 %
- Min 98 %
- SD 1 %





# Beispiel zum Einfluss des Algorithmus

- „böartige“ Lösung  
1 cm - Segmente  
fingerartig  
ineinander  
verzahnt



- Max 126 %
- Min 76 %
- SD 7 %

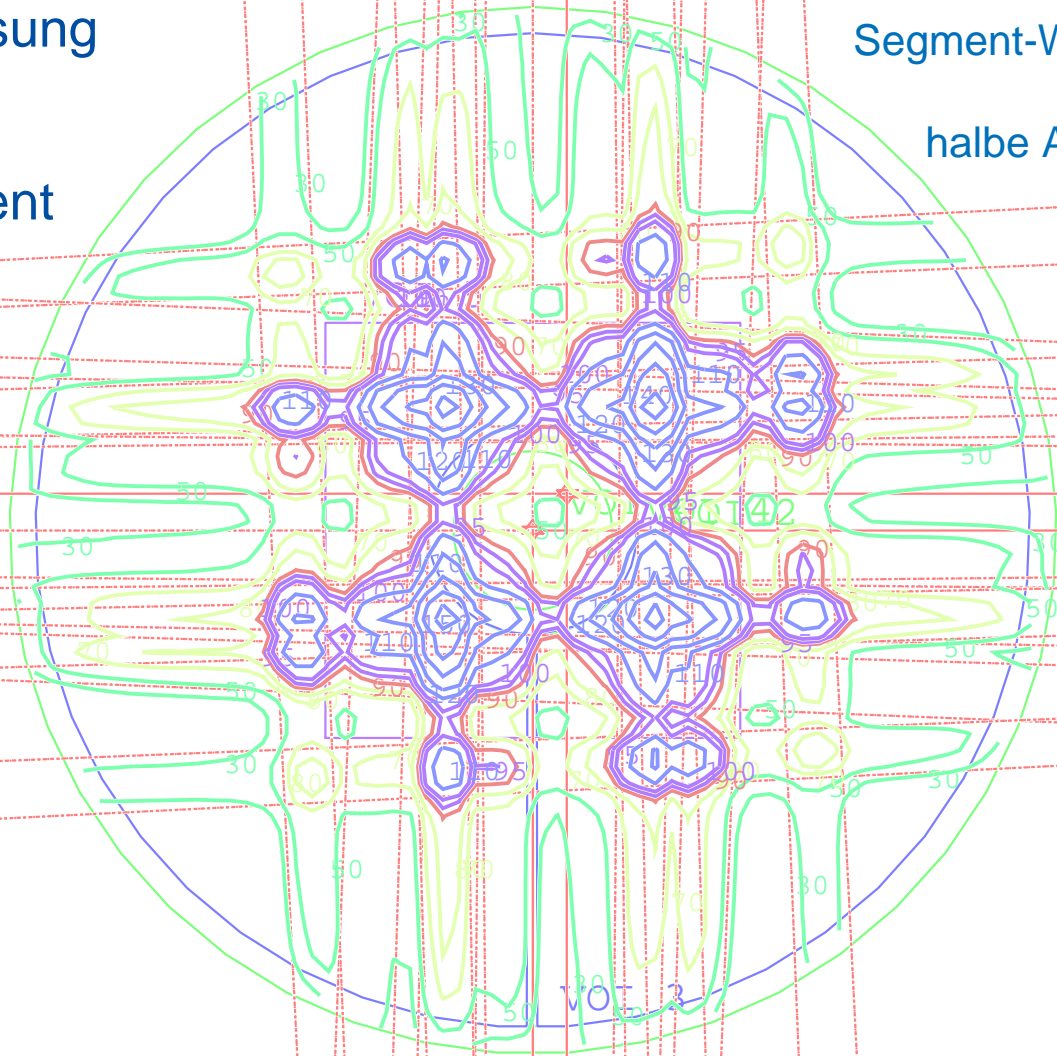


# Beispiel zum Einfluss des Algorithmus

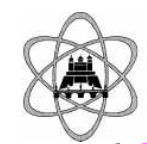
/ 13

- „böartige“ Lösung  
- verschoben  
1 cm diagonal  
jedes 2 Segment

Segment-Wechselphase  
≈  
halbe Atemphase



- Max 162 %
- Min 42 %
- SD 25 %



# Beispiel zum Einfluss des Algorithmus



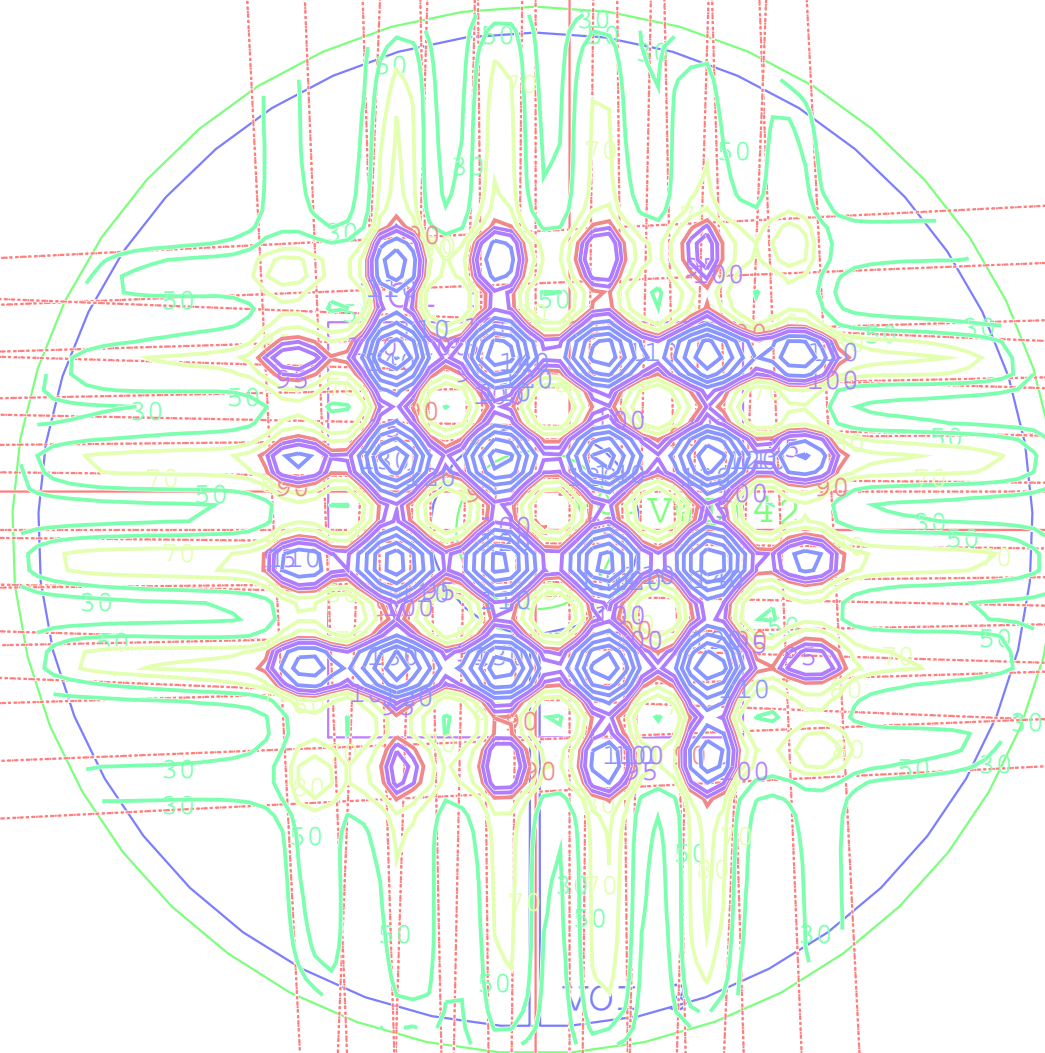
- „böartige“ Lösung  
- verschoben  
1 cm diagonal  
blockweise

10 cm

- Max 155 %
- Min 47 %
- SD 26 %

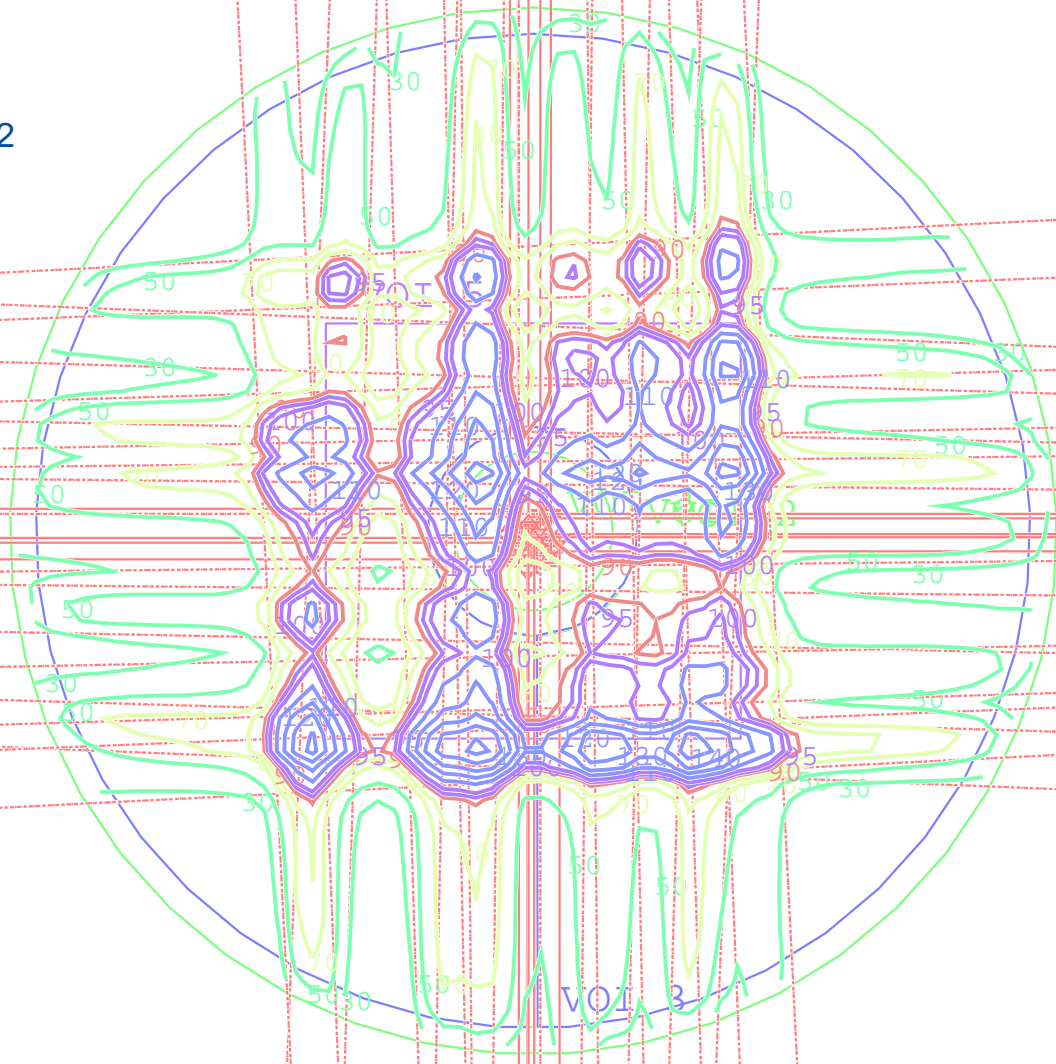
0.70

IMRT und Patientenbewegung

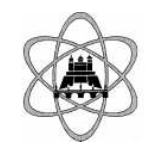


# Beispiel zum Einfluss des Algorithmus

- „böartige“ Lösung  
- verschoben  
gestreut über 1 cm<sup>2</sup>

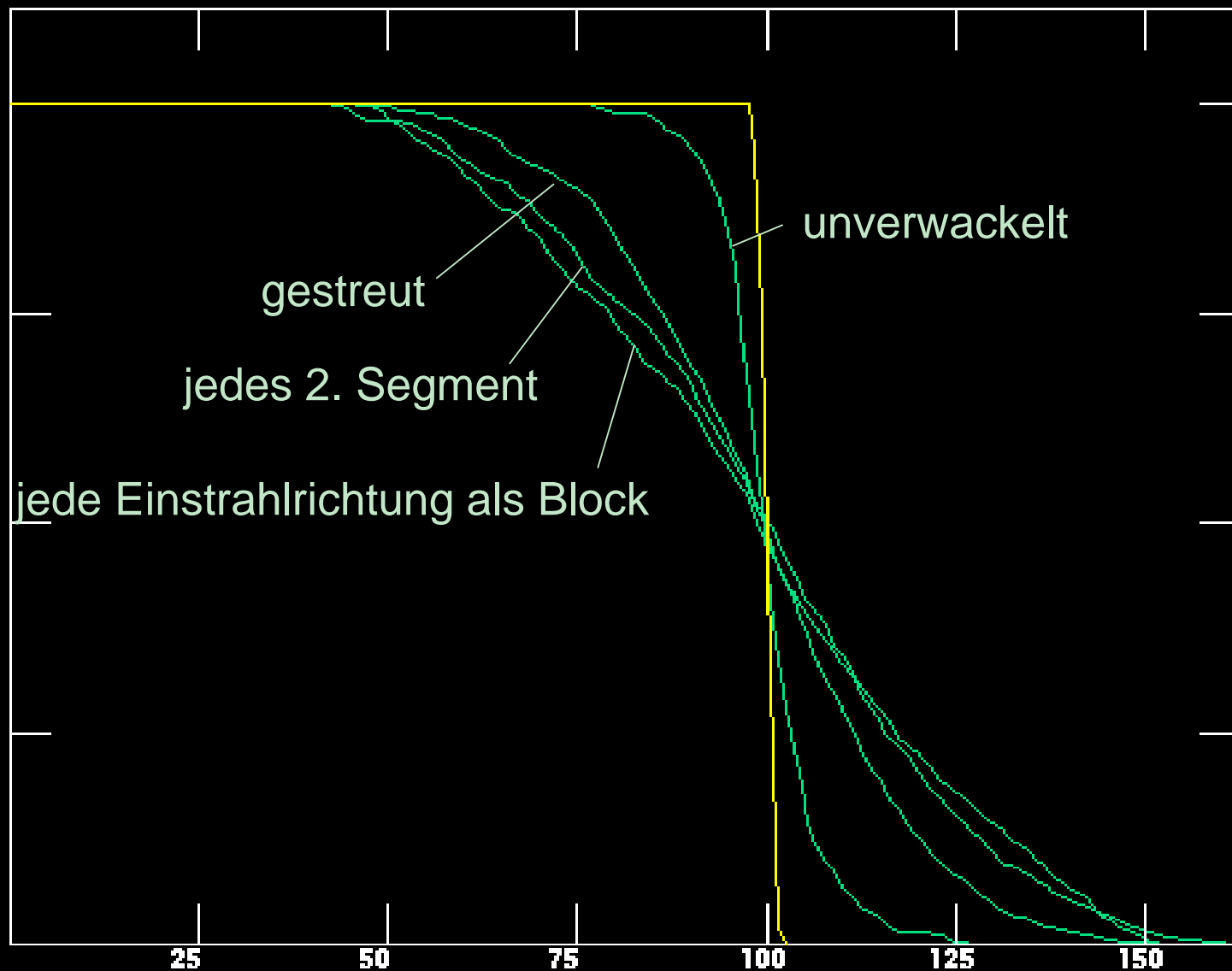


- Max 154 %
- Min 45 %
- SD 19 %



# Beispiel zum Einfluss des Algorithmus

% (Vol)



## Einwände / Anfragen (Sonstiges)

- Für nicht-zyklische, systematische oder korrelierte Bewegungen gibt es nicht einmal den statistischen Ausgleich.  
Gibt es hierzu Untersuchungen?
- Erwartungswert für große Dosisabweichungen ist nicht gleich Null.  
Daher werden in einem größeren Patientenkollektiv gelegentlich große Abweichungen vorkommen.  
Ist dies nur bei adjuvanter Therapie tolerabel?
- Sollten Worst-Case-Analysen für jeden Bestrahlungsplan bzw. jede „Class solution“ an einem bestimmten Planungssystem durchgeführt werden?

## Lösungsansätze und Hilfsmittel (1)

- „Mesh“ – individuell wandernde Gitterpunkte; Akkumulieren der Dosis im sich deformierenden Organ [Yan 1999]
- Recalculation, Reoptimization [Wu, Jerai 2002] (inter-frakt.)
- Deformed intensity distributions [Mohan 2005] (inter-frakt.)
- Statt „margins“ Einbinden statistischer Verfahren in den Optimierungsprozess zur Sicherstellung einer adäquaten Behandlung (gilt nur für „blurring“) [Li 2000], [Birkner 2003]
- Stabilität der Lösung gegenüber Bewegungen als Bewertungskriterium während des Optimierungsvorgangs [Unkelbach 2004/05]



## Lösungsansätze und Hilfsmittel (2)

- IMRT mit minimaler MU- und Segmentzahl (z.B. Hyperion [Alber]); d.h. unempfindlichere IMRT
- IMRT mit „sinnvoll“ gewählten Startbedingungen bzw. Fluenzen [Bratengeier 2005]; d.h. unempfindlichere IMRT
- Gating [Duan 2003]
  - aber „leaf lag“ (Anlaufverzögerung bei sliding window)
  - aber [Bortfeld 2002] keine statistische Unabhängigkeit
- Tisch bzw. MLC folgt ZV-Bewegung  
Synchronized Moving Aperture RT - SMART [Neicu 2003]
- „Leaf-pair Control for Moving Rigid Target“ [Papiez 2004]  
„Modified Dynamic Multileaf“ [Webb 2005]





# Beispiele für „unsensible“ IMRT-Fluenzen

Universität Würzburg, Klinik f.

Evaluation

TMS 6

- 20 Segmente

Z = 14.5

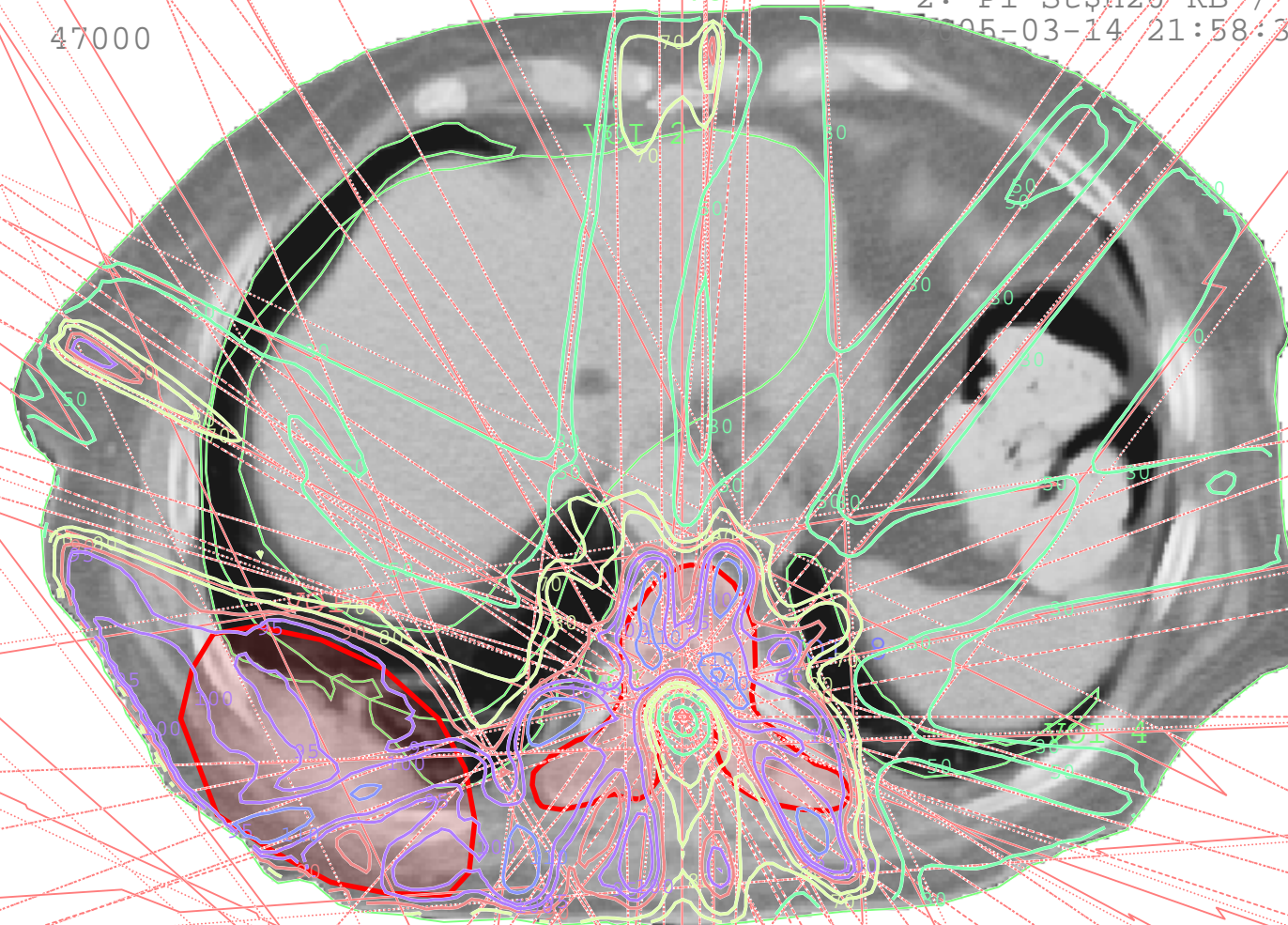
Scan No.: 47000

011312 / 2

2: P1 StSh20 KB / 16

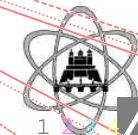
05-03-14 21:58:35

10 cm



IMRT und Patientenbewegung

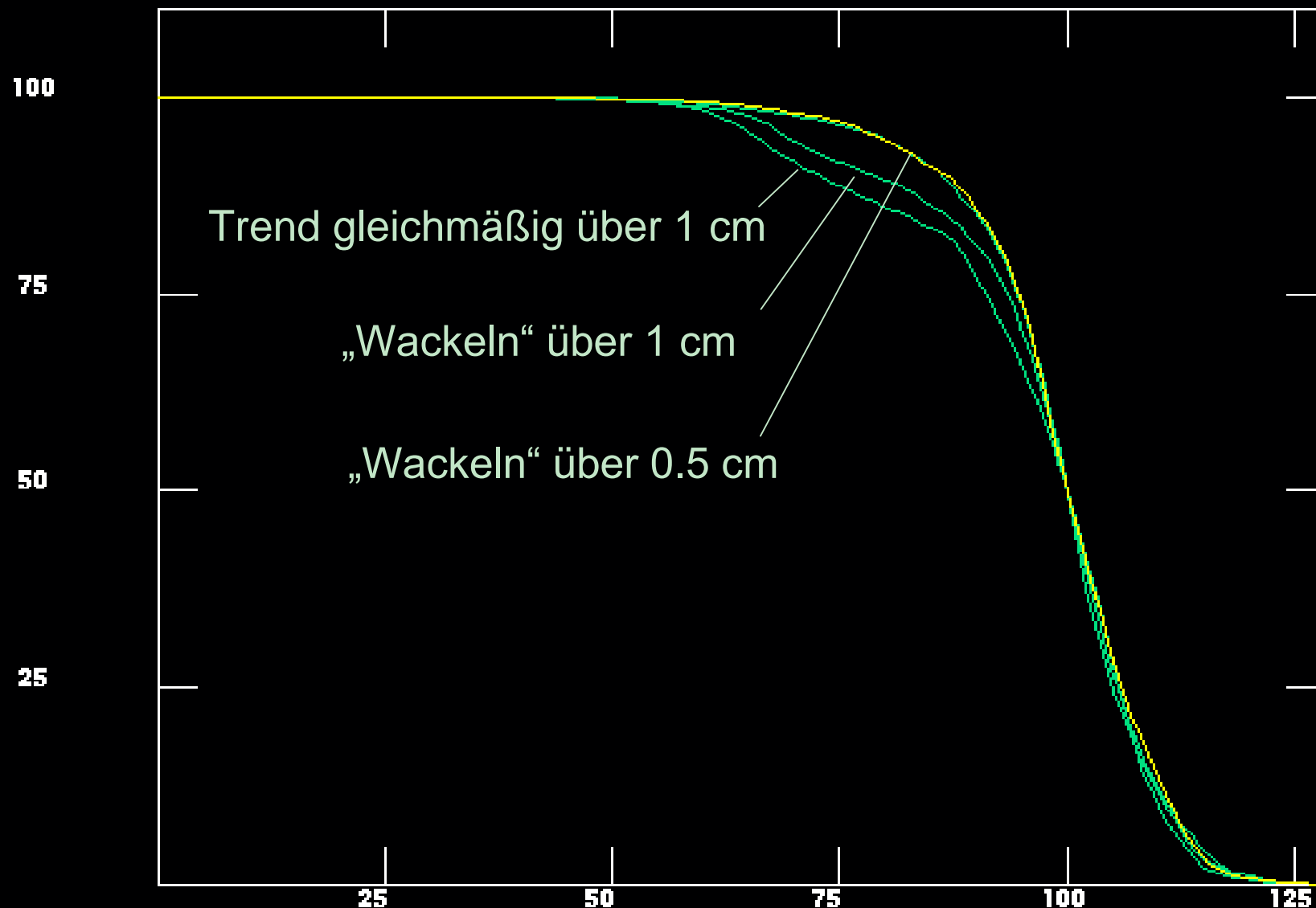
15 25  
18.03.2005



# Beispiele für „unsensible“ IMRT-Fluenzen

% (Vol)

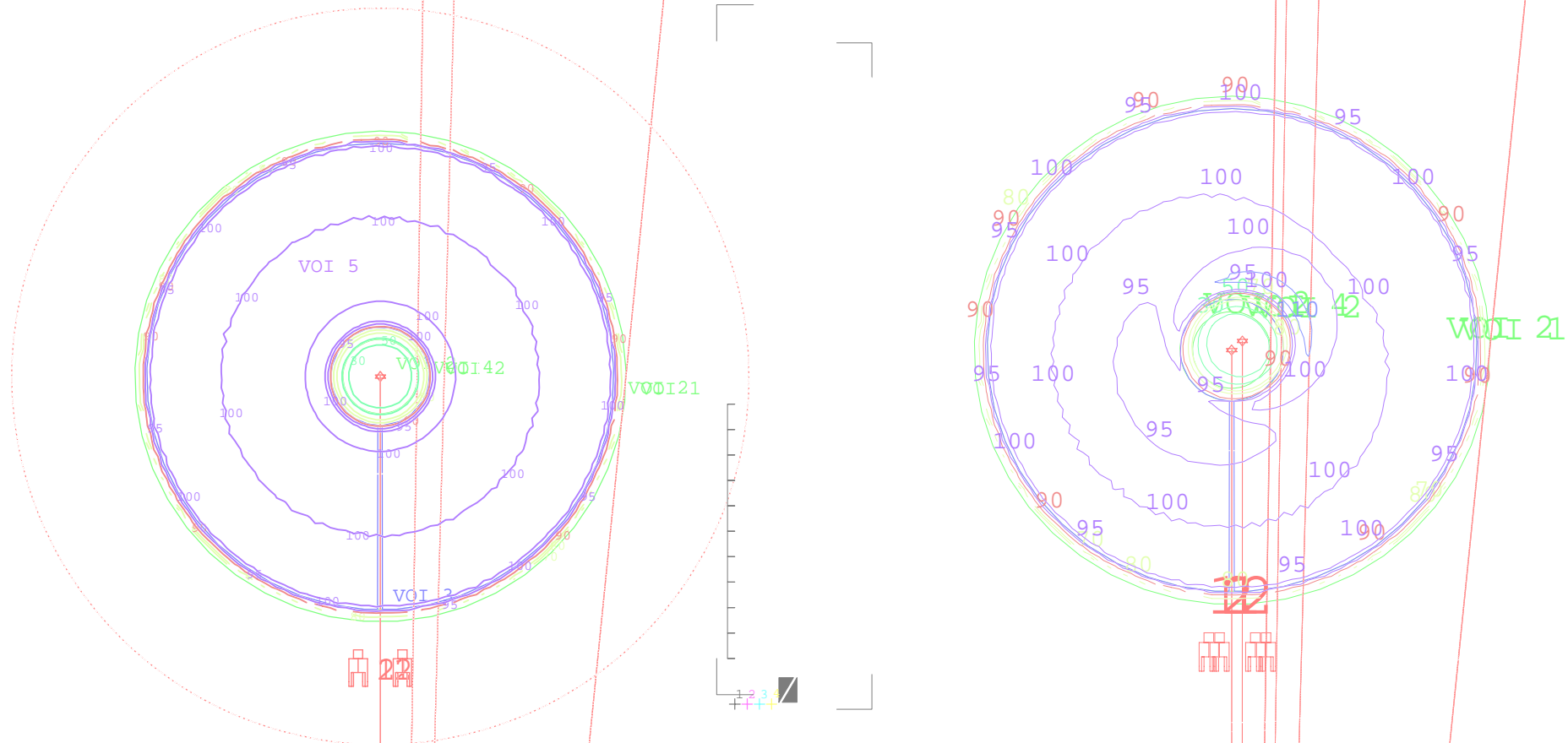
## Variation während 1 Fraktion



## Resümee

- Forschung zum Thema „Patientenbewegung und IMRT“ noch nicht annähernd abgeschlossen
- Noch keine Entwarnung trotz mancher ermutigender Ergebnisse
- Nicht-zyklische „Trend“-Bewegungen besonders kritisch
- Techniken mit vielen MU und vielen (aneinandergrenzenden) Segmenten besonders kritisch

# Weiteres Beispiel für „unsensible“ Technik



# Weiteres Beispiel für „unsensible“ Technik

% (Vol)

