

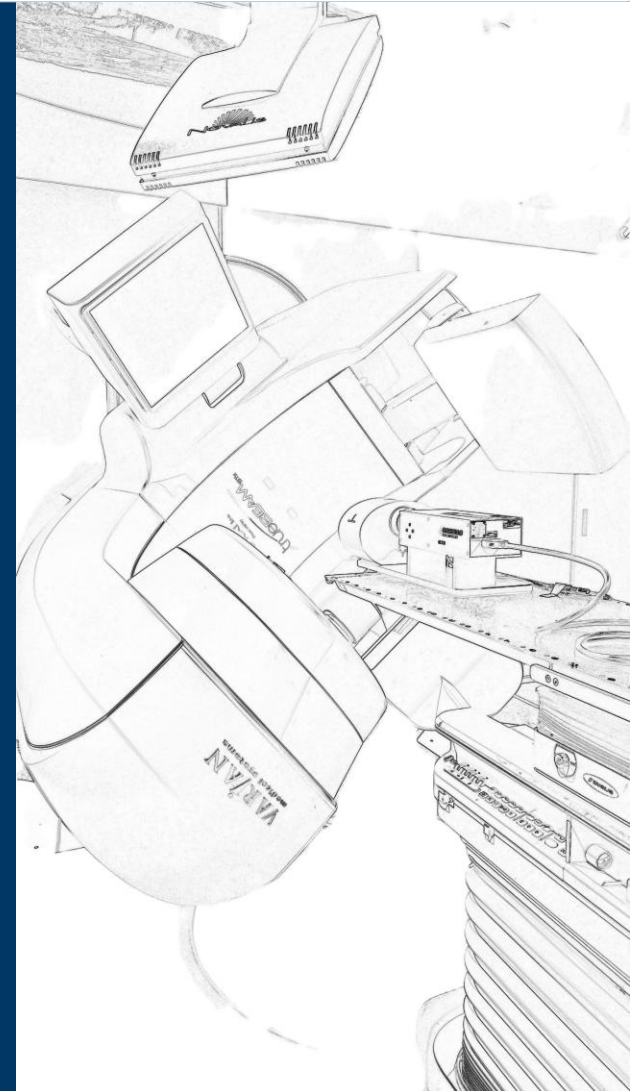
End-to-End Tests mit Bewegungsphantomen

Melanie Grehn

Graz, den 07.02.2026

Übersicht

- Einleitung: End-to-End Tests
- Zusammenfassung: Review Bewegungsphantome
- Konsensus Statements zu Phantomanforderungen, Durchführung und Auswertung von E2E Tests unter Bewegung
- Umfrage verfügbare Bewegungsphantome



Einleitung

- **Definition:** Methodik zur Überprüfung eines Anwendungsablaufes
- Wozu brauchen wir **End-to-End Tests**?
 - Zunahme der **Komplexität** der Behandlungsmethoden
 - **Verifikation** der gesamten **strahlentherapeutischen Kette** (Konstanzprüfung nach DIN 6864-1)
 - **Überprüfung** der **Kommunikation** einzelner Komponenten miteinander (Software, Datenbanken, Netzwerk etc.)
 - **Überprüfung** der **Systemgenauigkeit**
 - Festlegung von Sicherheitssäumen
 - **Verifikation** neuer oder geänderter **Workflows**
 - **Identifizierung** von **Systemabhängigkeiten**
 - alle Mitglieder des klinischen Teams kennen den Ablauf und sind **sicher in der Durchführung**

Strahlenther Onkol (2020) 196:421–443
<https://doi.org/10.1007/s00066-020-01583-2>

REVIEW ARTICLE



Technological quality requirements for stereotactic radiotherapy

Expert review group consensus from the DGMP Working Group for Physics and Technology in Stereotactic Radiotherapy

Daniela Schmitt¹ · Oliver Blanck² · Tobias Gauer³ · Michael K. Fix⁴ · Thomas B. Brunner⁵ · Jens Fleckenstein⁶ · Britta Loutfi-Krauss⁷ · Peter Manser⁴ · Rene Werner⁸ · Maria-Lisa Wilhelm⁹ · Wolfgang W. Baus¹⁰ · Christos Moustakis¹¹



Details durch die Strahlenschutzkommission

- steigende **Komplexität** in Aufbau und Ablauf strahlentherapeutischer Behandlungen
- komplexe Gesamtsysteme durch **Vernetzung verschiedener Einzelkomponenten**
 - Austausch vieler Daten
- Notwendigkeit der **Qualitätssicherung** des gesamten strahlentherapeutischen Prozesses und nicht nur der Einzelkomponenten
- herstellerunabhängige **Toleranzwerte** für perkutane Strahlentherapie mit Photonen und Elektronen
 - nicht automatisch übertragbar auf Spezialgeräte und Protonen/Schwerionen Therapie



Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn

<http://www.ssk.de>

Festlegung von Reaktionsschwellen und Toleranzgrenzen für die Prüfung des Gesamtsystems bei der perkutanen Strahlentherapie mit Photonen und Elektronen

Stellungnahme der Strahlenschutzkommission
mit wissenschaftlicher Begründung

2 Stellungnahme

Eine Festlegung von Reaktionsschwellen und Toleranzgrenzen für verschiedene therapeutische Maßnahmen sollte auf der Basis der folgenden Indikationsklassen (IK) erfolgen:

- IK 1: Indikationen mit höchster Präzisionsanforderung
z. B. einzeitige oder stark hypofraktionierte Bestrahlung von Herden in kritischer Nähe zu Risikostrukturen mittels Hochpräzisionstherapie (Radiochirurgie),
- IK 2: Indikationen mit erhöhten Präzisionsanforderungen
z. B. Dosisescalation beim Prostatakarzinom (z. B. mittels IMRT), fraktionierte Bestrahlungen mit möglicher organschädigender Dosis, z. B. in unmittelbarer Nähe zum Rückenmark oder anderen kritischen Organen, auch 3D geplante fraktionierte kleinvolumige Bestrahlung oder fraktionierte Stereotaxie bzw. Körperstereotaxie ohne Nähe zum Rückenmark,

Details durch die Strahlenschutzkommission

- häufigere Überprüfung **kritischer Einzelkomponenten** mit möglicher Variabilität im zeitlichen Verlauf
- bei Erreichen der **Reaktionsschwelle**: Ergreifen **geeigneter Überprüfungs- und Korrekturmaßnahmen**
- Einflussfaktoren auf **dosimetrische Gesamtunsicherheit**:
 - Dosis im Kalibrierpunkt
 - Dosis in anderen Punkten
 - Stabilität Monitorsystem
 - Flatness
 - Patient*innendaten
 - Feld- und Patient*innen-Setup
 - Dosisberechnung
- Einflussfaktoren auf **geometrische Gesamtunsicherheit**:
 - Strahlenfeld (Lage und Feldränder)
 - Radius Isozentrumskugel
 - Gantrywinkel
 - Tischtoleranzen
 - Abweichung Koordinatensystem Beschleuniger / Bildgebungssystem

Toleranzgrenzen und Reaktionsschwellen für dosimetrische Abweichungen (weitere Differenzierung siehe Abschnitt 3.3 der wissenschaftlichen Begründung)

Indikationsklasse (IK)	Toleranzgrenze (%)	Reaktionsschwelle (%), gerundet
IK 1	5	3
IK 2	5	3

Toleranzgrenzen und Reaktionsschwellen für geometrische Abweichungen (weitere Differenzierung siehe Abschnitt 3.3 der wissenschaftlichen Begründung)

Indikationsklasse (IK)	Toleranzgrenze (mm)	Reaktionsschwelle (mm), gerundet
IK 1	2	1
IK 2	5	4

Tab. 2: Medizinische Anforderungen an die physikalisch-technische Präzision (Werte aus einer Meinungsumfrage bei 49 Radioonkologen der DEGRO, MW: Mittelwert, s: Standardabweichung, 90%: 90%-Perzentile)

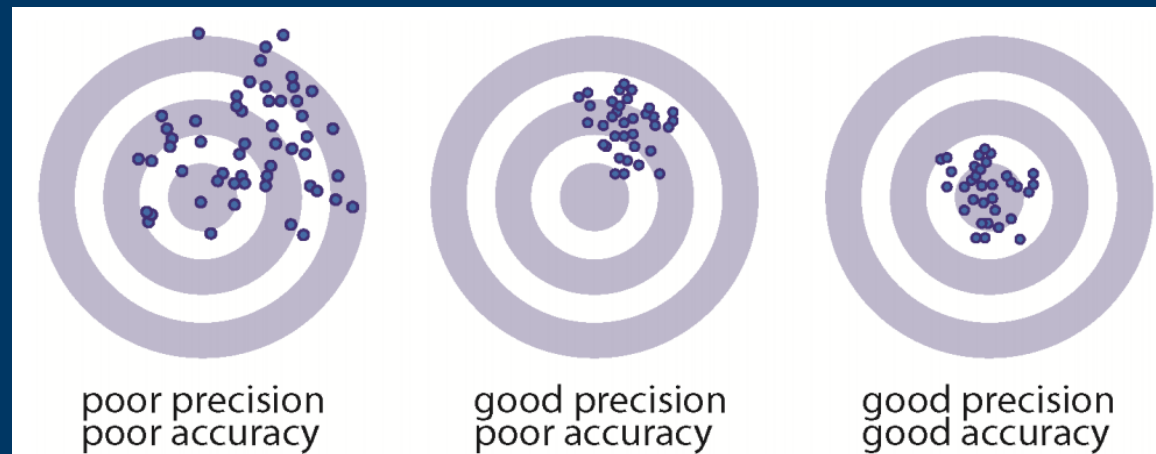
	geometrische Präzision	dosimetrische Präzision in der Nähe des Zielgebietes
einzeitige Hochpräzisionstherapie	MW: 1,4 mm s: 0,6 mm 90 % ≤ 2 mm	MW: 3,6 % s: 1,8 % 90 % ≤ 5 %
fraktionierte Hochpräzisionstherapie	MW: 2,8 mm s: 1,2 mm 90 % ≤ 5 mm	MW: 3,8 % s: 1,4 % 90 % ≤ 5 %

Entwicklung eines E2E-Tests

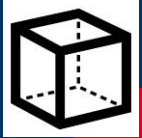
- Was ist alles Teil einer strahlentherapeutischen Kette?
 - Welche Bildgebungsmodalitäten sind involviert, Welche zusätzliche Software etc.?
- Welche speziellen Techniken kommen zum Einsatz?
 - verschiedene Trackingmethoden; Gating; Deep Inspiration Breathhold (DIBH); freie Atmung mit/ohne abdomineller Kompression
 - adaptive (ART), bildgestützte (IGRT) und/oder Oberflächengestützte Strahlentherapie (SGRT)
- Wer macht im klinischen Alltag welchen Schritt?
- Welche Bestrahlungstechnik kommt zum Einsatz?
 - 3D konformal / dynamische, konformale Rotationsbestrahlung (DCA)
 - intensitätsmodulierte Strahlentherapie (IMRT; Step and Shoot / Sliding Window)
 - intensitätsmodulierte Rotationsbestrahlung (VMAT/IMAT)
 - Modulationsgrad, Robustheit, etc.
- Patientenlagerung und Immobilisation
- geeignete Phantome; mit und ohne Bewegungssimulation; respiratorische vs. organische Bewegung

Zusammenfassung E2E Tests

- Qualitätssicherung der gesamten strahlentherapeutischen Kette notwendig, nicht nur der Einzelkomponenten
- komplexe Prozesse verstehen und Systemabhängigkeiten erkennen
- Verifikation neuer und geänderter Abläufe
- regelmäßige Überprüfung und nach Änderungen von Einzelkomponenten
- dringender Bedarf an geeigneten, bezahlbaren Phantomen für die gesamte Kette, sowie genauen Durchführungsempfehlungen und Evaluationskriterien



Zusammenfassung Review zu Bewegungsphantomen



- 36 publications / 5 phantoms / 18 motion platforms
- 10 commercial / 13 in-house
- mostly solid
- materials: mostly PMMA
- dosimeters: diodes, film, ion chamber, gel
- imaging: all CT only
- motion: mostly respiratory
- motion type: mostly external
- motion dimension: mostly 3D, but also 6D simulations and 1D



- 70 publications / 31 phantoms
- 16 commercial / 15 in-house
- 20 modular / 11 solid
- 15 anthropomorph / 16 simple
- materials: lung-, bone- and water-equivalent or fillable with water, 3D printed
- dosimeters: mostly film and ion chamber
- imaging: all useful CT contrast, 6 MRI+ 3 PET compatible
- motion: respiratory
- motion type: mostly internal (moving insert)
- motion dimension: 1D / 3D



- 4 publications / 4 phantoms
- 4 in-house, 1 with commercial motion platform combined
- 2 modular / 2 solid
- all anthropomorph
- materials: silicone, plastic, 3D printed
- dosimeters: TLD, film, gel, plastic scintillation dosimeter
- imaging: all useful CT contrast, 2 MRI, 1 PET, 1 US
- motion: 3 respiratory, 1 organ
- motion type: external
- motion dimension: mostly 1D; 1x 3D



- 5 publications / 4 phantoms
- 2 commercial / 2 in-house
- 3 modular / 1 solid
- all anthropomorph
- materials: bone- and water-equivalent, PMMA, silicone, gel, gypsum
- dosimeters: film, gel, TLD
- imaging: all useful CT contrast, 2 MRI, 1 PET
- motion: organ
- motion type: 1 internal / 3 external
- motion dimension: 3D

Konsensus Statements

- Erarbeitung Statements anhand geltender Richtlinien (DIN-Normen), Review Ergebnissen und eigenen Erfahrungen
- Statements zu
 - Anforderungen an Bewegungsphantome (Phantomeigenschaften, Bewegungssimulationen)
 - allgemeine Statements zur Anwendung und Wiederholung von E2E Tests
 - spezifische Statements zu jedem Schritt in strahlentherapeutischer Kette, inkl. Auswertekriterien
- Formulierung von Mindestanforderungen und erweiterten Empfehlungen (Bsp. spezielle Anforderungen)
- Bewegungsdimension und Messdimension müssen übereinstimmen (Bsp. Linien-Array bei 1D Bewegung)
- aus Publikationen: validierte Workflows als Anwendungsbeispiele für komplette Prozesse

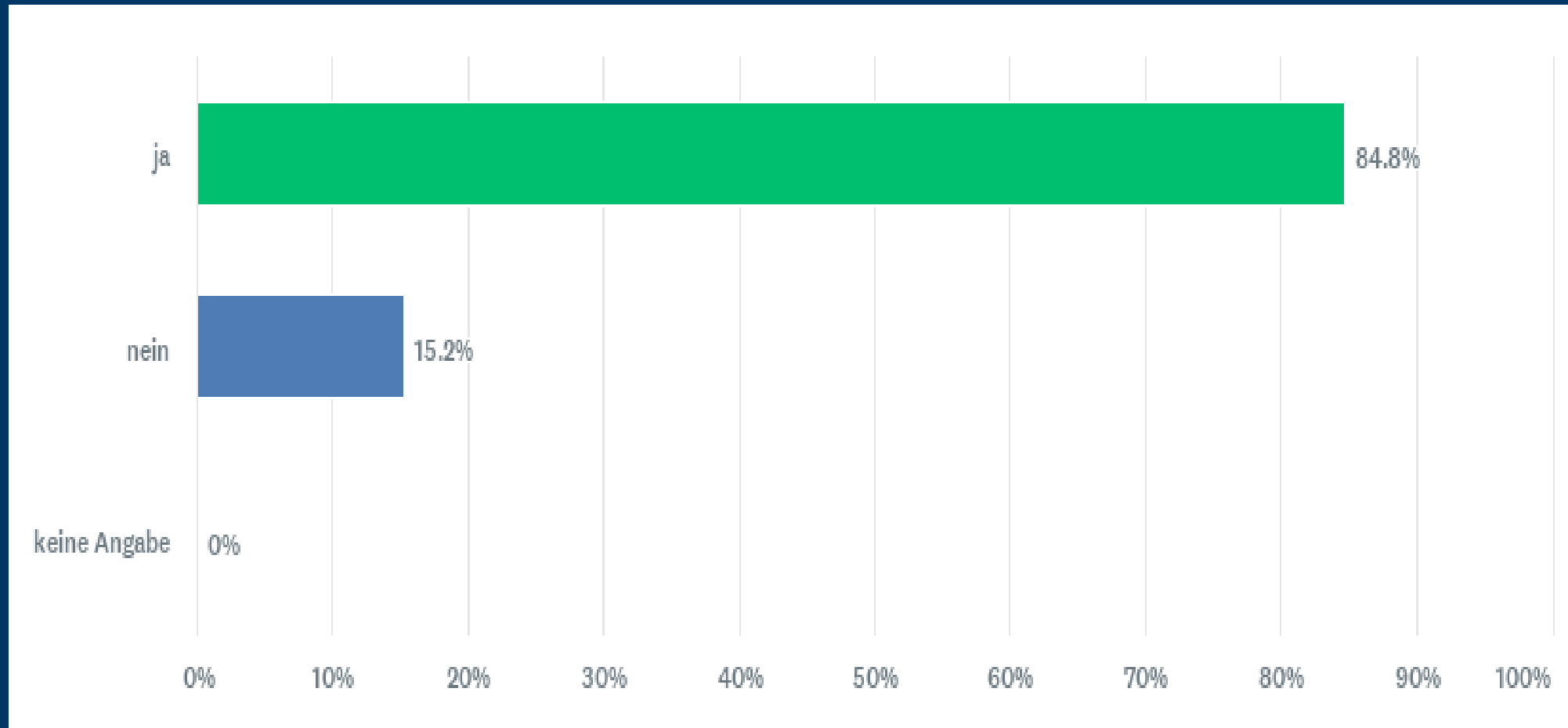
Konsensus – Diskussionspunkte

- Magnet-Resonanz-Tomographie
- ITV-Konzept extra ausarbeiten als Empfehlungen
- 4DCT
- Statements zu: Test fehlgeschlagen: Testproblem oder Fehler im Behandlungsablauf
- Standard Szenarien und deren Bewegungsmuster müssen am Phantom vorprogrammiert sein und per Auswahlknopf abrufbar sein (ohne Anschluss an externen Computer)
- Abbruchkriterien bspw. beim Gating durch Husten müssen überprüfbar sein
- 1D SI-Bewegung plus 1D Surrogatbewegung als Minimum, 3D als Empfehlung, Rotationen nicht notwendig?
- Autokonturierung nicht als Teil des E2E (nur Übertragungen, Koordinatensysteme, HU etc.)
- Auswertesoftware bspw. bei Filmeinsätzen müssen zum Phantom mit angeboten werden (eigene vom Hersteller oder externe Software im Paket dazu)

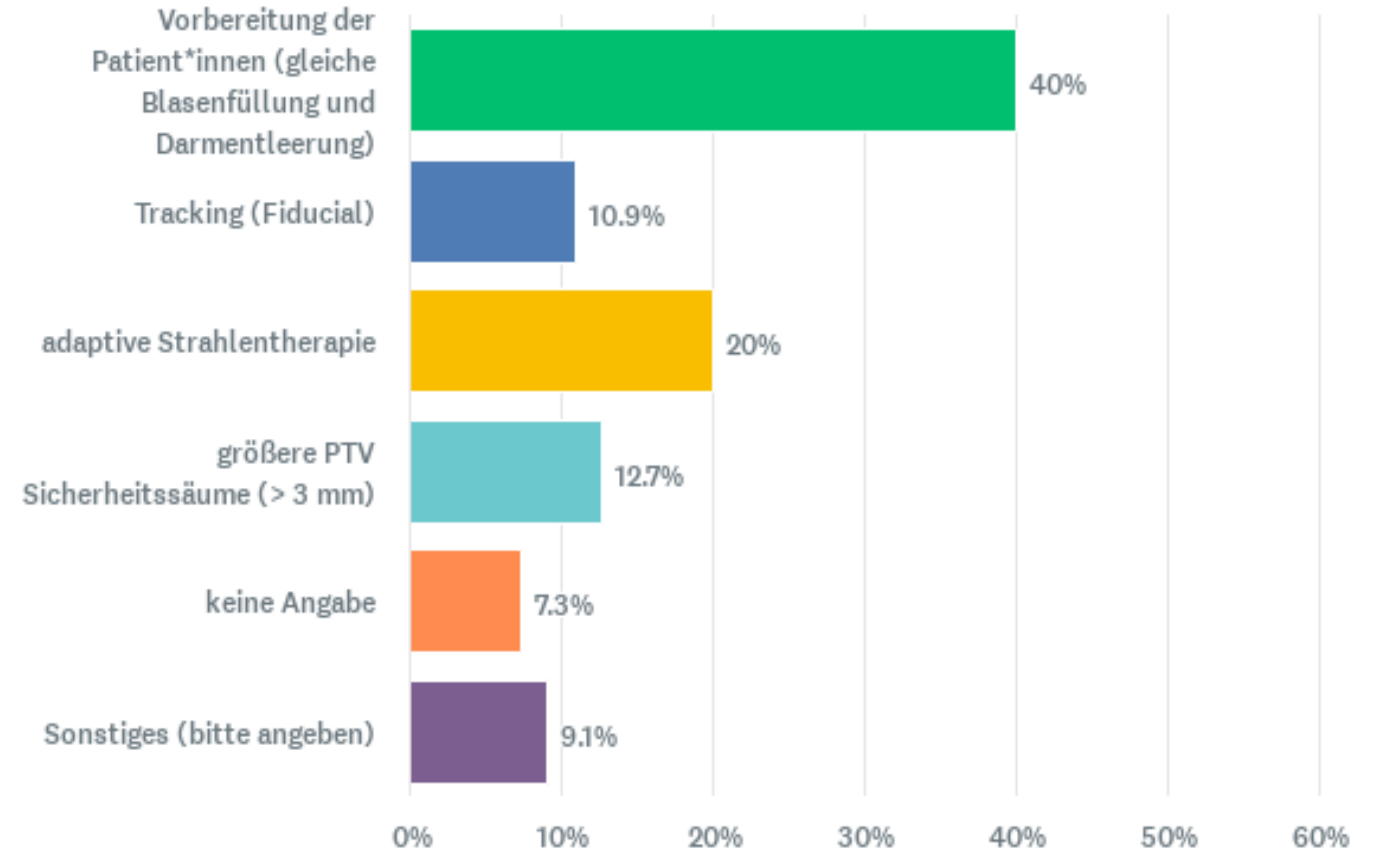
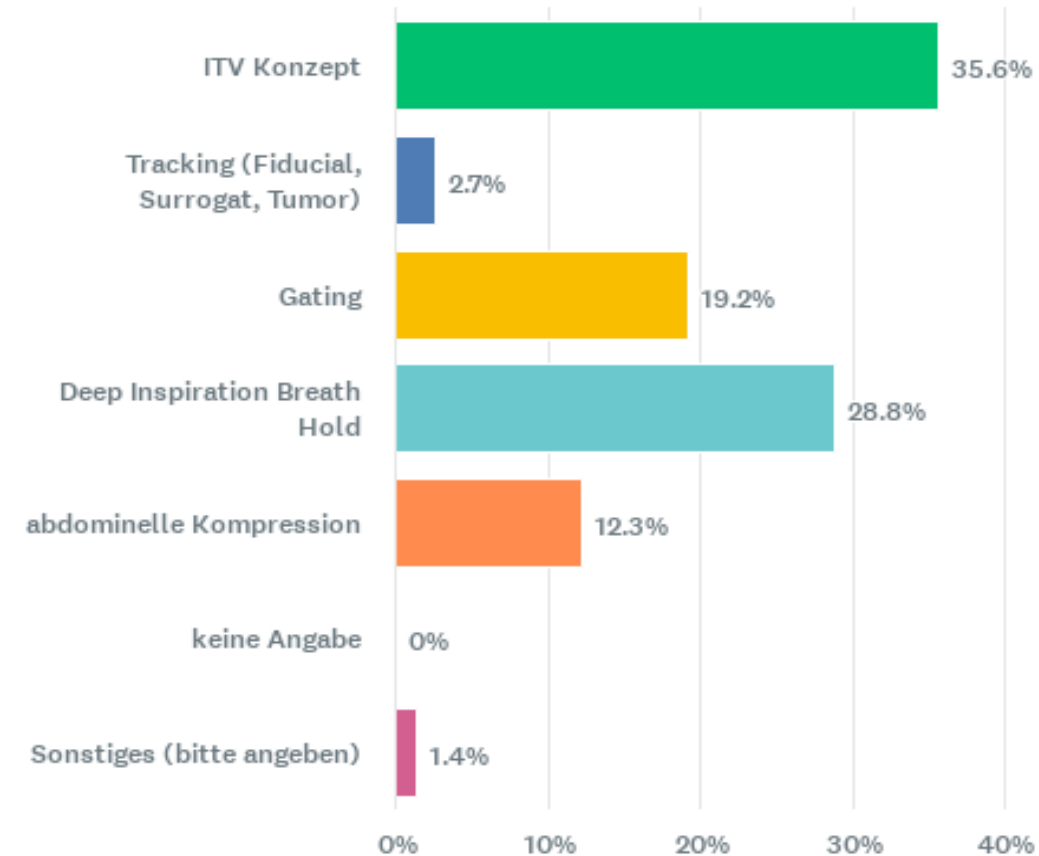
Konsensus – Diskussionspunkte

- Was wollen wir empfehlen?
 - Bewegungsphantom vs. statisches Phantom mit Bewegungsplattform (innere vs. äußere Bewegung)
 - Zwingend anthropomorph? Oder nur notwendig bei bestimmten Systemen? HU/Dichte-Gradienten der Körperregion ausreichend?
 - Bewegungs-Dimension
- gleichzeitige Messung von Geometrie (Target-Position) und Dosis?
- Welche Messmethoden wollen wir empfehlen?
 - Geht eigentlich nur Film aktuell?
 - 2D in verschiedenen Ebenen

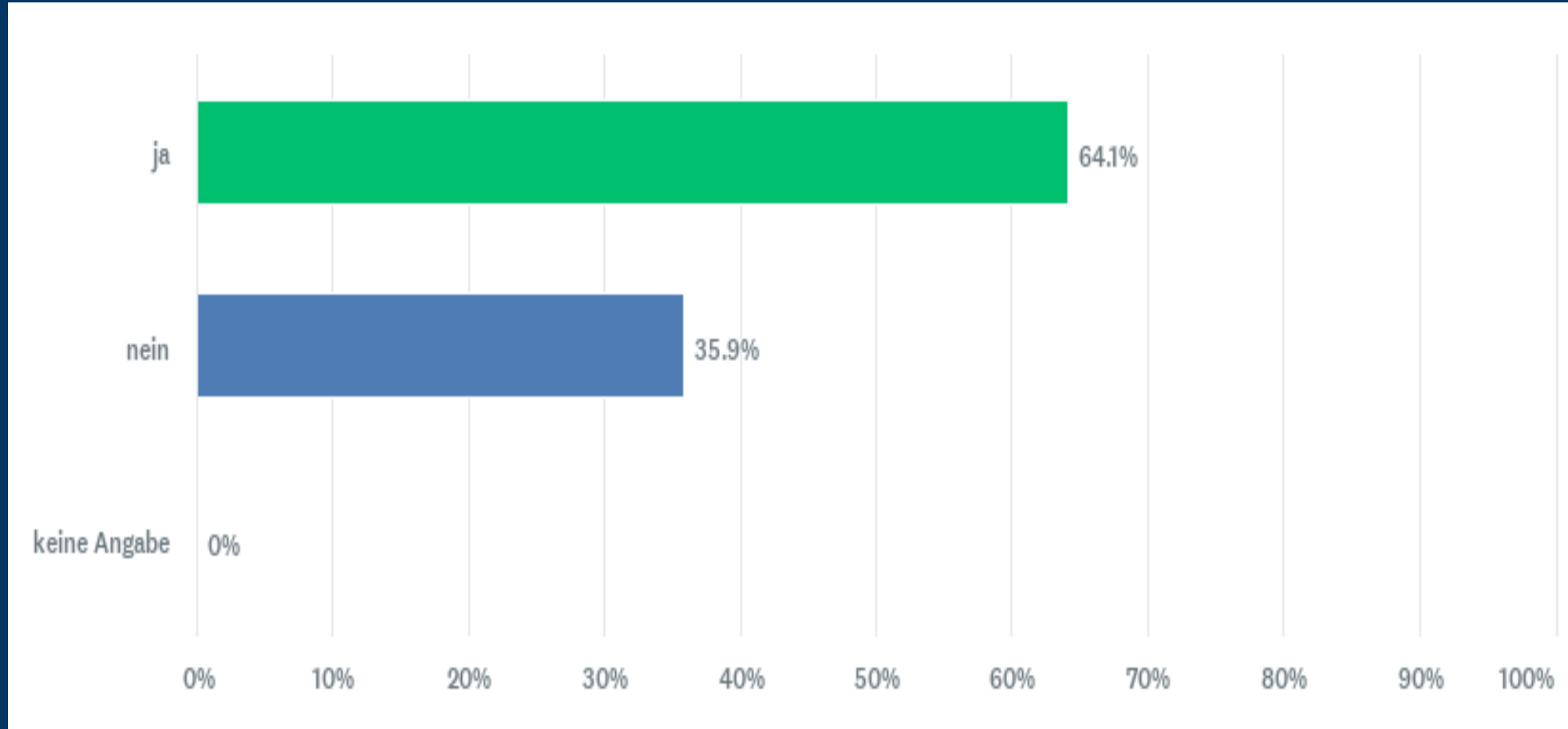
Umfrage zu verfügbaren Bewegungsphantomen – Durchführung von Körperstereotaxien



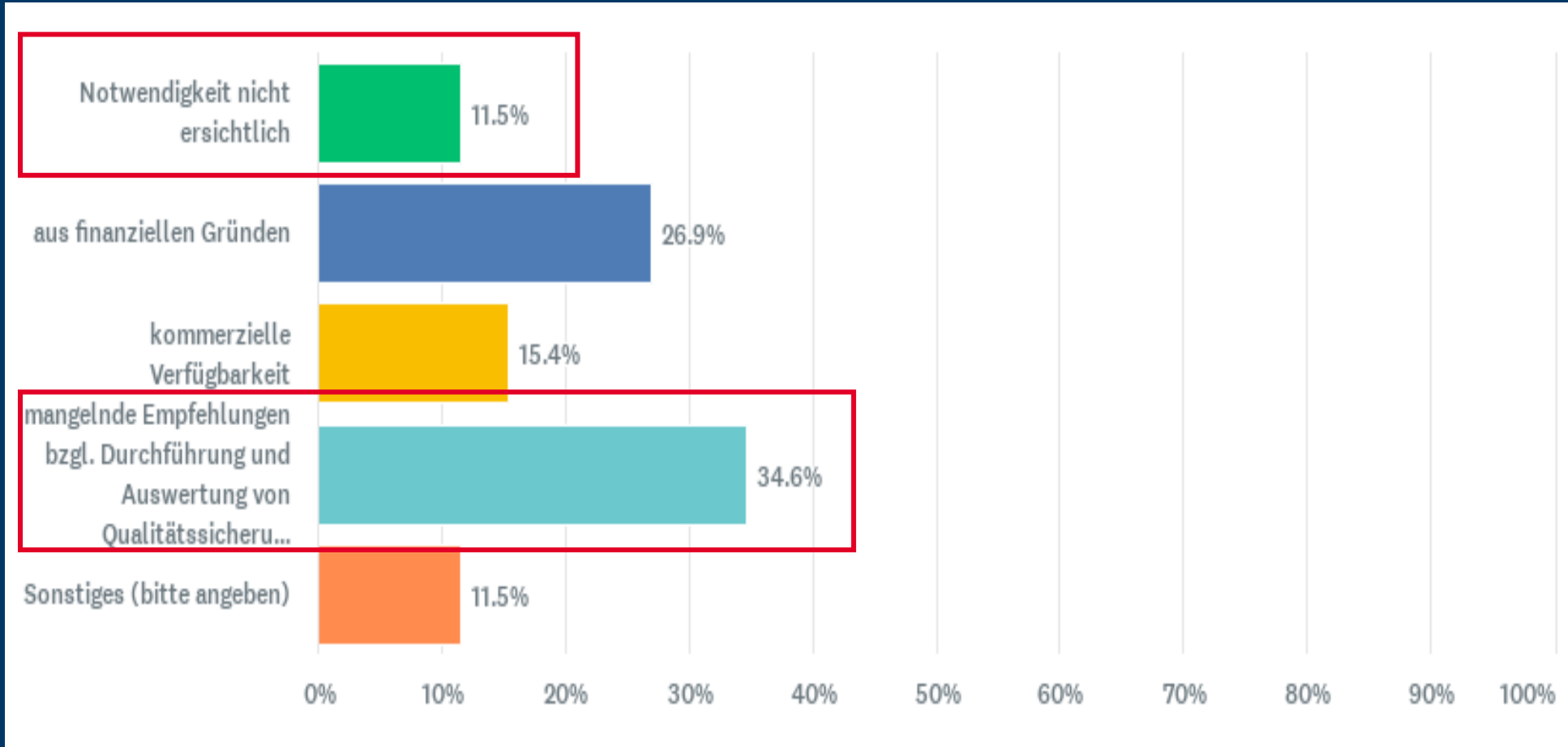
Umfrage zu verfügbaren Bewegungsphantomen



Umfrage zu verfügbaren Bewegungsphantomen – Bewegungsphantome verfügbar

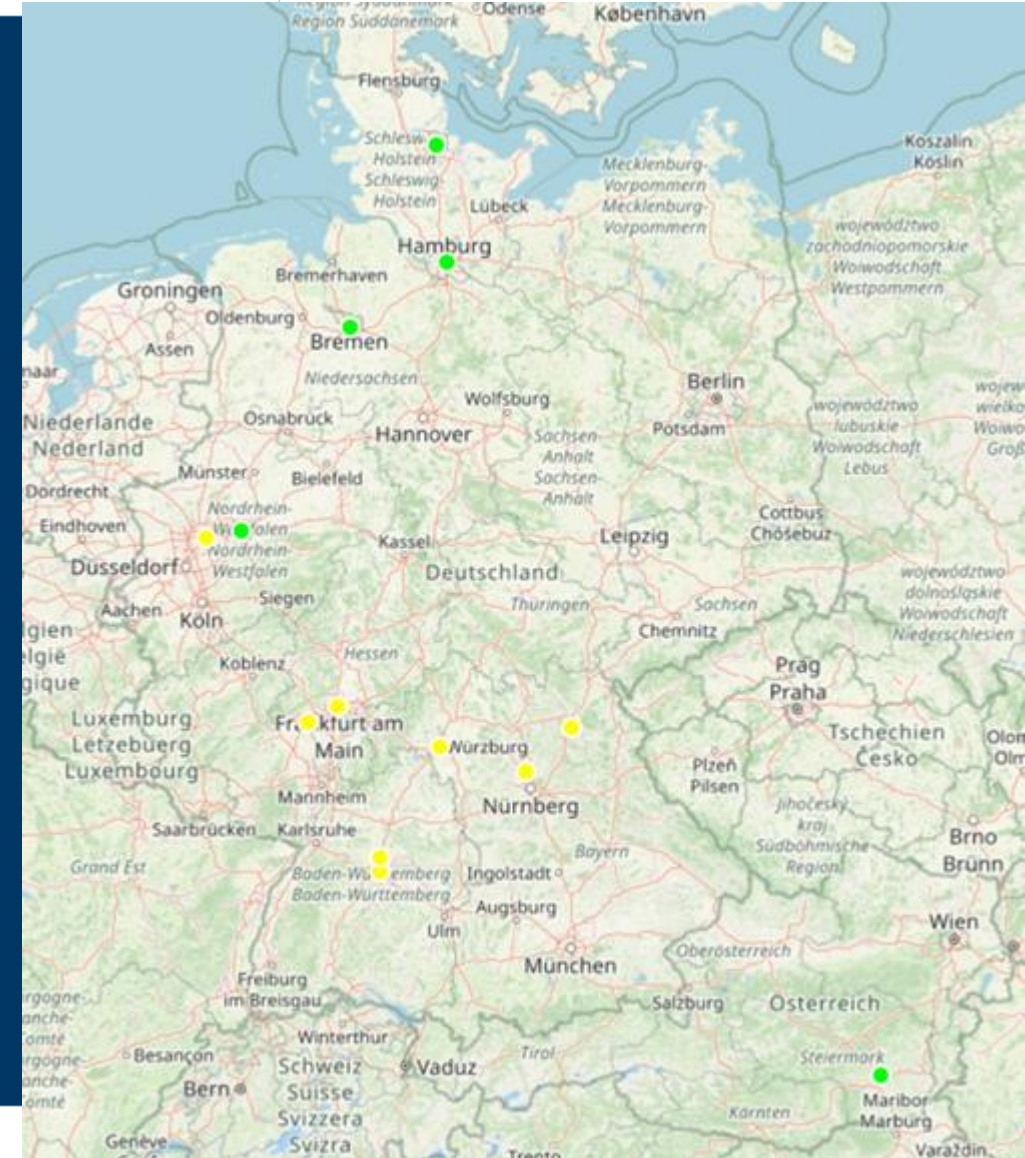


Umfrage zu verfügbaren Bewegungsphantomen – Was spricht gegen die Anschaffung



Übersicht Einrichtungen

- verfügbare Bewegungsphantome in:
 - Hamburg (UKE + Strahlencentrum)
 - Strahlentherapie Nord, Bremen
 - Klinikum Dortmund
 - Uniklinikum Graz
 - Saphir Radiochirurgie, Kiel
- verfügbare Bewegungsphantome; Ausleihe nach interner Klärung:
 - Uniklinikum Erlangen
 - Westdeutsches Protonentherapiezentrum, Essen
 - Kliniken Ludwigsburg – Bietigheim
 - Klinikum Stuttgart
 - Universitätsmedizin Mainz
 - Uniklinik Würzburg
 - Krankenhaus Nordwest, Frankfurt am Main
 - Klinikum Bayreuth



Danke für die Zusammenarbeit und Unterstützung für dieses Projekt:

J. Köhn, C. Stengl, M. Shariff, A. Bakhtiari Moghaddam, M. Mayer, M. Hettich, S. Lydiard, W. Baus, G. Echner, C. Bert, T. Gauer, H. Gottschlag, F. Kamp, M. Hoogeman, D. Verellen, M. F. Fast, S. Tanadini-Lang, P. R. Poulsen, P. Keall, C. Moustakis, D. Schmitt, O. Blanck

Danke an E. Gührs für die Hilfe bei der Umfrage 😊

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit 😊

