

Phantomstudie zum Vergleich zwischen Computertomografie- und C-Arm-Computertomografie-gesteuertem Punktionsverfahren bei Anwendung durch Weiterbildungsassistenten in der Radiologie

Phantom study for comparison between computed tomography- and C-Arm computed tomography-guided puncture applied by residents in radiology

Autoren

Timo C. Meine¹ , Jan B. Hinrichs¹, Thomas Werncke¹, Saif Afat², Lorenz Biggemann³, Andreas Bucher⁴, Martina Büttner⁵, Sara Christner⁶, Ebba Dethlefsen⁷, Hannes Engel⁸, Mirjam Gerwing⁹, Tobias Getzin¹, Stephanie Gräger¹⁰, Eva Gresser¹¹, Jan-Peter Grunz⁶ , Felix Harder¹², Julius Heidenreich¹³, Lea Hitpaß⁷, Kristina Jakobi¹⁴, Michael Janisch¹⁵, Nadja Kocher¹⁶, Markus Kopp¹⁷, Simon Lennartz¹⁸, Ole Martin¹⁹, Tawfik Moher Alsady¹ , Matthias Pamminer²⁰, Frederico Pedersoli⁷, Paula Louise Piechotta²¹, Natascha Platz Batista da Silva²² , Marcus Raudner²³, Sebastian Roehrich²³, Philipp Schindler⁹, Vincent Schwarze²⁴, Danilo Seppelt²⁵, Malte M. Sieren²⁶, Manuela Spurny²⁷, Jitka Starekova²⁸, Corinna Storz²⁹, Marco Wiesmüller¹⁷, David Zopfs³⁰, Kristina Imeen Ringe¹ , Bernhard C. Meyer¹, Frank K. Wacker¹

Institute

- 1 Institute for Diagnostic and Interventional Radiology, Hannover Medical School, Hannover, Germany
- 2 Institute for Diagnostic and Interventional Radiology, University Hospital Tübingen, Germany
- 3 Institute for Diagnostic and Interventional Radiology, University Medical Center Göttingen, Göttingen, Germany
- 4 Institute of Diagnostic and Interventional Radiology, University Hospital Frankfurt, Germany
- 5 Clinic for Diagnostic and Interventional Radiology, Ulm University Medical Center, Ulm, Germany
- 6 Department of Diagnostic and Interventional Radiology, University Hospital Würzburg, Würzburg, Germany
- 7 Clinic for Diagnostic and Interventional Radiology, University Hospital RWTH Aachen, Germany
- 8 Department of Radiology, Medical Center – University of Freiburg, Faculty of Medicine, University of Freiburg, Germany
- 9 Clinic for Radiology, University Hospital Münster, Germany
- 10 Institute for Diagnostic and Interventional Radiology, Friedrich Schiller University Jena, Germany
- 11 Department of Radiology, Ludwig Maximilians University Munich, München, Germany
- 12 Department of Diagnostic and Interventional Radiology, Technical University of Munich, München, Germany
- 13 Department of Diagnostic and Interventional Radiology, University Hospital Würzburg, Germany
- 14 Institute for Diagnostic and Interventional Radiology, Rostock University Medical Center, Rostock, Germany
- 15 Department of Radiology, University Hospital Graz, Austria
- 16 Department of Diagnostic and Interventional Radiology, Medical Center-University of Freiburg, Germany
- 17 Institute of Radiology, University Hospitals Erlangen Department of Radiology, Erlangen, Germany
- 18 Institute for Diagnostic and Interventional Radiology, Faculty of Medicine and University Hospital Cologne, Köln, Germany
- 19 Department of Diagnostic and Interventional Radiology, University Düsseldorf, Medical Faculty, Düsseldorf, Germany
- 20 Department of Radiology, Medical University Innsbruck Department of Radiology, Innsbruck, Austria
- 21 Department of Diagnostic and Interventional Radiology, University Hospital Leipzig, Germany
- 22 Institute of Diagnostic Radiology, University Hospital Regensburg, Germany
- 23 University Clinic of Radiology and Nuclear Medicine, General Hospital of the City of Vienna-Hospital of the Medical University of Vienna, Wien, Austria
- 24 Department of Radiology, Ludwig Maximilians University Munich, München, Germany
- 25 Department for Diagnostic and Interventional Radiology, University Hospital Carl Gustav Carus Dresden, Germany
- 26 Clinic for Radiology und Nuclear Medicine, University Medical Center Schleswig-Holstein Lübeck Campus, Lübeck, Germany
- 27 Department for Diagnostic and Interventional Radiology, University Hospital Heidelberg, Germany
- 28 Department of Diagnostic and Interventional Radiology, University Hospital Hamburg-Eppendorf Center of Diagnostic, Hamburg, Germany
- 29 Neuroradiology, University Hospital Freiburg, Germany
- 30 Institute for Diagnostic and Interventional Radiology, Faculty of Medicine and University Hospital Cologne, Köln, Germany

Key words

Image Guidance, C-Arm-CT, Phantom Study, Resident in Training

eingereicht 21.02.2021

akzeptiert 27.07.2021

online publiziert 18.11.2021

Bibliografie

Fortschr Röntgenstr 2022; 194: 272–280

DOI 10.1055/a-1586-2733

ISSN 1438-9029

© 2021. Thieme. All rights reserved.

Georg Thieme Verlag KG, Rüdigerstraße 14,
70469 Stuttgart, Germany

Korrespondenzadresse

Prof. Frank K Wacker

Institut für Radiologie, Medizinische Hochschule Hannover,
Carl-Neuberg-Str. 1, 30625 Hannover, Germany

Tel.: +49/5 11/5 32 34 21

Fax: +49/5 11/5 32 94 21

wacker.frank@mh-hannover.de

ZUSAMMENFASSUNG

Ziel Vergleich der Punktionsabweichung und -dauer zwischen Computertomografie (CT) – und C-Arm-CT (CACT) -gesteuertem Punktionsverfahren bei Anwendung durch Assistenzärzte in Weiterbildung (AiW).

Material und Methode In einer Kohorte von 25 AiW, die Teil einer wissenschaftlichen Förderung waren, wurden entweder CT- oder CACT-gesteuerte Punktionsverfahren an einem Phantom durchgeführt. Vor Beginn wurden der Weiterbildungsstand, die Erfahrung mit Spielen eines Musikinstruments, mit Videospielen und mit Ballsportarten und die Selbsteinschätzung von manueller Geschicklichkeit und räumlichem Denkvermögen abgefragt. Jede/r AiW führte 2 Punktionsverfahren durch, wobei die 1. Punktionsverfahren mit einem transaxialen bzw. einfach angulierten Nadelpfad und die 2. Punktionsverfahren mit einem einfach bzw. doppelt angulierten Nadelpfad erfolgte. Punktionsabweichung und -dauer wurden zwischen den Verfahren verglichen und mit den Selbsteinschätzungen korreliert.

Ergebnisse Die beiden Gruppen der AiW zeigten keine Unterschiede in der Erfahrung in der Radiologie ($p = 1$), in der Angiografie ($p = 0,415$) und in der Anzahl bereits durchgeführter Punktionsverfahren gesteuert durch Ultraschall ($p = 0,483$), CT ($p = 0,934$) und CACT ($p = 0,466$). In der CT (ohne Navigationssoftware) war die Punktionsdauer signifikant länger als mit der CACT-Bildsteuerung mit Navigationssoftware ($p < 0,001$). Bei der Punktionsdauer zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen der 1. und 2. Punktionsverfahren im CT ($p = 0,719$), während die 2. Punktionsverfahren mit CACT schneller durchgeführt werden konnte ($p = 0,006$). Die Punktionsabweichung war weder signifikant zwischen CT- und CACT-Bildsteuerung ($p = 0,337$), noch zwischen der 1. und 2. Punktionsverfahren der jeweiligen Verfahren (CT: $p = 0,130$; CACT: $p = 0,391$). Die Selbsteinschätzung der manuellen Geschicklichkeit korrelierte nicht mit der Punktionsabweichung ($p = 0,059$) und

-dauer ($p = 0,158$). Das subjektive räumliche Denkvermögen zeigte eine moderate positive Korrelation zur Punktionsabweichung ($p = 0,011$), aber nicht zur -dauer ($p = 0,541$).

Schlussfolgerung Die AiW erreichten eine dem Ausbildungsstand entsprechende, klinisch adäquate Punktionsabweichung unter CT- und CACT-Bildsteuerung. Die CACT-gesteuerten Punktionsverfahren mit Unterstützung durch Navigationssoftware wurden schneller durchgeführt, und auch die Lernkurve war mit CACT-Bildsteuerung steiler. Räumliches Denkvermögen kann möglicherweise das Erlernen bildgesteuerter Punktionsverfahren beschleunigen.

Kernaussagen:

- Die Erfahrung mit Punktionsverfahren war in einer Gruppe von AiW, die im Rahmen des Programms der Deutschen Röntgengesellschaft e. V. „Forscher-für-die-Zukunft“ ausgesetzt wurden, dem Weiterbildungsstand entsprechend.
- Trotz kollektiv geringerer Erfahrung der radiologischen AiW mit der CACT-gesteuerten Punktionsverfahren mit Navigationssoftwareunterstützung ist die Lernkurve gegenüber der einfachen CT-Punktionsverfahren möglicherweise steiler.
- Bei schwierigen Punktionswegen könnte die CACT-Bildsteuerung mit Softwareunterstützung einen Vorteil in der Durchführung gegenüber der konventionellen CT-Bildsteuerung haben.

Zitierweise

- Meine TC, Hinrichs JB, Werncke T et al. Phantom study for comparison between computed tomography- and C-Arm computed tomography-guided puncture applied by residents in radiology. Fortschr Röntgenstr 2022; 194: 272–280

ABSTRACT

Purpose Comparison of puncture deviation and puncture duration between computed tomography (CT)- and C-arm CT (CACT)-guided puncture performed by residents in training (RiT).

Methods In a cohort of 25 RiTs enrolled in a research training program either CT- or CACT-guided puncture was performed on a phantom. Prior to the experiments, the RiT's level of training, experience playing a musical instrument, video games, and ball sports, and self-assessed manual skills and spatial skills were recorded. Each RiT performed two punctures. The first puncture was performed with a transaxial or single angulated needle path and the second with a single or double angulated needle path. Puncture deviation and puncture duration were compared between the procedures and were correlated with the self-assessments.

Results RiTs in both the CT guidance and CACT guidance groups did not differ with respect to radiologic experience ($p = 1$), angiographic experience ($p = 0,415$), and number of ultrasound-guided puncture procedures ($p = 0,483$), CT-guided puncture procedures ($p = 0,934$), and CACT-guided puncture procedures ($p = 0,466$). The puncture duration was significantly longer with CT guidance (without navigation tool) than with CACT guidance with navigation software ($p < 0,001$).

There was no significant difference in the puncture duration between the first and second puncture using CT guidance ($p = 0.719$). However, in the case of CACT, the second puncture was significantly faster ($p = 0.006$). Puncture deviations were not different between CT-guided and CACT-guided puncture ($p = 0.337$) and between the first and second puncture of CT-guided and CACT-guided puncture (CT: $p = 0.130$; CACT: $p = 0.391$). The self-assessment of manual skills did not correlate with puncture deviation ($p = 0.059$) and puncture duration ($p = 0.158$). The self-assessed spatial skills correlated

positively with puncture deviation ($p = 0.011$) but not with puncture duration ($p = 0.541$).

Conclusion The RiTs achieved a puncture deviation that was clinically adequate with respect to their level of training and did not differ between CT-guided and CACT-guided puncture. The puncture duration was shorter when using CACT. CACT guidance with navigation software support has a potentially steeper learning curve. Spatial skills might accelerate the learning of image-guided puncture.

ABKÜRZUNGEN

AiW	Assistenzarzt/-ärzte in Weiterbildung
CACT	C-Arm Computertomografie
CT	Computertomografie
DRG	Deutsche Röntgengesellschaft e. V.
n	Anzahl
p	Signifikanzniveau
r	Korrelationskoeffizient

Einleitung

Bildgesteuerte diagnostische und therapeutische Eingriffe haben in der Radiologie in den letzten 30 Jahren zugenommen [1]. Sie ermöglichen die genaue Positionierung, was wichtig ist, um die Aussagekraft einer Biopsie zu gewährleisten bzw. bei lokalen Therapieverfahren die Wirksamkeit der Behandlung zu sichern [2–4]. Am häufigsten werden Ultraschall- und Computertomografie (CT)-gesteuerte Punktionen durchgeführt [5]. Vorteil der Ultraschall-gesteuerten Punktion ist die Echtzeitdarstellung. Nachteilig sind die geringe Eindringtiefe, insbesondere bei Adipositas oder Luftüberlagerung, und die Abhängigkeit vom Untersucher [5]. CT-gesteuerte Punktionen profitieren von untersucherunabhängigen, 3-dimensionalen Bildinformationen, wobei ohne Navigationshilfe keine bzw. mit der CT-Fluoroskopie nur eine eingeschränkte Echtzeit-Rückmeldung über die Progression der Punktionsnadel zur Verfügung steht [5, 6]. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, CT-gesteuerte Interventionen durchzuführen. Entweder kann der Untersuchende den CT-Raum verlassen oder neben der CT-Gantry mit Röntgenschutz verbleiben, und es wird wiederholt eine auf den Punktionsstrakt fokussierte Computertomografie mit wenigen Schichten (i. d. R. 3 Schichten mit 5 mm Schichtdicke) angefertigt („Quick-and-Check“). Dabei ist der Untersuchende bei Verlassen des CT-Raums keiner und neben der Gantry einer zu vernachlässigenden Strahlenexposition ausgesetzt, muss allerdings die Punktionsnadel sequenziell und ohne Echtzeit-Darstellung vorschieben. Andererseits ist mit der CT-Fluoroskopie eine Echtzeit-Bildgebung möglich. Hier verbleibt der Untersucher mit Röntgenschutz im Raum und je nach Technik sogar mit der Hand an der Nadel, was mit Strahlenexposition verbunden ist [7].

Eine Alternative zur konventionellen CT ist die C-Arm-Computertomografie (CACT). Vorteil dieses Punktionsverfahrens ist die

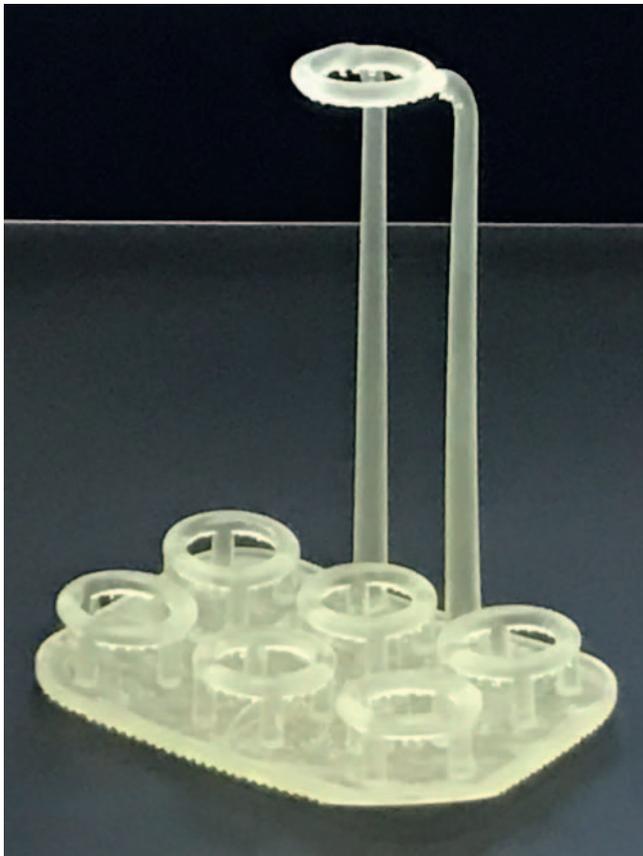
Kombination der räumlichen 3D-Information der CACT mit der Echtzeit-Information durch die Fluoroskopie, ggf. zusätzlich ergänzt durch das Einblenden von Trajektorien [8]. Dies ist im Vergleich zur CT strahlensparend [9] und könnte gleichzeitig die Bildsteuerung komplexer, doppelt angulierter Punktionswege im Vergleich zur CT erleichtern [10]. In der Literatur wird für die CACT eine Reduktion der effektiven Patientendosis um bis zu 40 % im Vergleich zur konventionellen CT-gesteuerten Punktion angegeben [9]. Hinsichtlich der Punktionsgenauigkeit scheint das CACT-gesteuerte Punktionsverfahren gegenüber den konventionellen Verfahren, wie z. B. der CT-gesteuerten Punktion, je nach Studie sogar überlegen zu sein [10–16].

Die Punktionsabweichung und -dauer der CACT-gesteuerten Punktionsverfahren durch erfahrene interventionelle Radiologen wurde kürzlich von Busser et al. in einer Phantomstudie untersucht [10]. Training und Erfahrung von Assistenzärzten in radiologischer Weiterbildung (AiW) mit CT- und CACT-gesteuerten Punktionen wurden bisher noch nicht untersucht, wobei erste Studien zeigen, dass die Simulation bildgesteuerter Verfahren die Lernkurve für vaskuläre Interventionen bei AiW verbessern kann [17, 18]. Das Ziel unserer Studie war es daher, die CT-Bildsteuerung und CACT-Bildsteuerung bei AiW mit limitierter Interventionserfahrung anhand der Punktionsabweichung und -dauer bei unterschiedlichen, räumlichen Schwierigkeitsgraden in einem Phantom zu vergleichen und mit Faktoren wie der manuellen Geschicklichkeit und dem räumlichen Denkvermögen der AiW zu korrelieren.

Material und Methoden

Studienteilnehmer und Kovariaten

Im Rahmen des strukturierten Programms „Forscher-für-die-Zukunft“, welches zur gezielten Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses in der Radiologie von der Deutschen Röntgengesellschaft e. V. (DRG), der Konferenz der Lehrstuhlinhaber in der Radiologie und der Akademie für Fort- und Weiterbildung in der Radiologie 2010 ins Leben gerufen wurde, waren insgesamt 38 AiW aus den Universitätskliniken in Deutschland und Österreich am 14. und 15.03.2019 an der Medizinischen Hochschule eingeladen, 35 waren in Hannover anwesend. Davon haben 5 AiW aus organisatorischen Gründen und 5 aus persönlichen

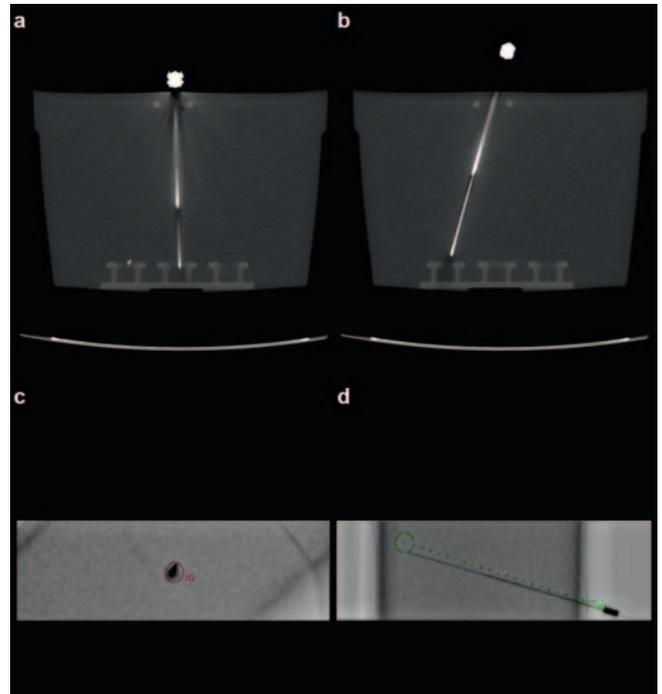


► **Abb. 1** Punktionsphantom. Diese Abbildung zeigt eine Fotografie des Punktionsphantoms. Das Punktionsphantom besteht aus einem Eintrittsring und 6 Zielringen aus Harz und war in einer nicht röntgendichten Gelatinematrix eingelassen.

Gründen nicht aktiv teilgenommen. Somit haben 25 AiW am Phantom punktiert.

Im Vorfeld der Veranstaltung wurden über einen Fragebogen Angaben zum Weiterbildungsstand erfasst. Dies umfasste Fragen zur radiologischen Berufserfahrung in Jahren sowie zur Anzahl der eigenständig durchgeführten Punktionsen (Ultraschall-, CT-gesteuert), Angiografien und CACT-gesteuerten Punktionsen. Weiterhin wurden in diesem Fragebogen auch die Selbsteinschätzung von manueller Geschicklichkeit und räumlichem Denkvormögen auf einer Skala von 1–6 (1: sehr gut, 2: gut, 3: befriedigend, 4: ausreichend, 5: mangelhaft, 6: ungenügend) sowie die Erfahrung mit dem Spielen eines Musikinstruments, mit Videospielen und mit Ballsport qualitativ sowie quantitativ (Art des Musikinstruments, der Videospielekonsole und des Ballsports sowie Anzahl der Jahre, die es ausgeübt wurde) abgefragt.

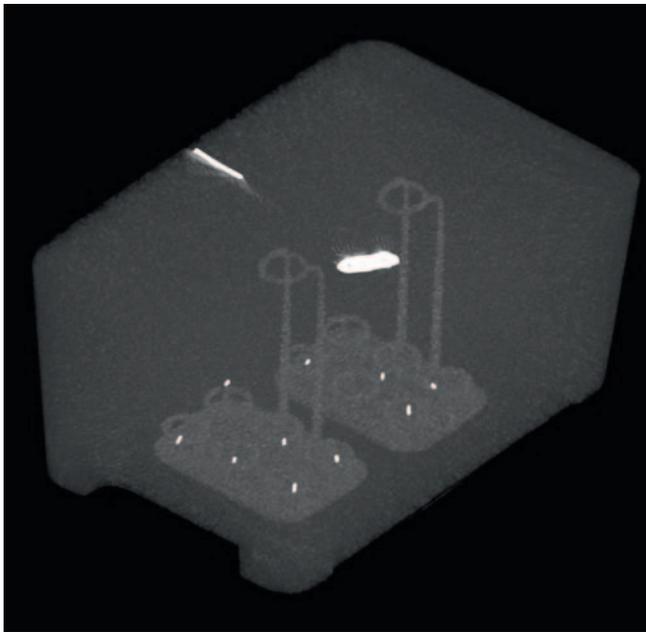
Nach einer kurzen Schulung in CT- und CACT-gesteuerten Punktionsverfahren an dem Phantom wurden die AiW zur Durchführung der Punktionsen in 6 gleich große Gruppen mit vergleichbarer radiologischer Erfahrung eingeteilt. Für jeden AiW waren 2 Punktionsen entweder mit CT- oder CACT-Bildsteuerung an einem Punktionsphantom in einem geplanten Zeitintervall von 30 Minuten geplant.



► **Abb. 2** Computertomografie- und C-Arm-Computertomografie-gesteuertes Punktionsverfahren. **a** Die 1. Punktion war in einem transaxialen oder einfach angulierten Nadelpfad geplant, exemplarisch mit Computertomografie (CT)-Bildsteuerung abgebildet. **b** Die 2. Punktion ist in einem schwierigeren, einfach angulierten bzw. doppelt angulierten Nadelpfad durchgeführt worden, wie hier unter CT-Bildsteuerung dargestellt. **c** Das Fluoroskopiebild zeigt die Aufsicht auf die Punktionsnadel, wobei sich diese innerhalb des rot markierten Fadenkreuzes der Navigationssoftware befindet („bull's eye view“). **d** In der seitlichen Ansicht ist die gesamte Punktionsnadel in der Fluoroskopie abgebildet, und der Nadelpfad der Navigationssoftware ist in grüner Markierung dargestellt („progression view“).

Punktionsphantom

Zur Analyse der Punktionsabweichung wurden Punktionsphantome verwendet. In einer Gelatinematrix (4l Aquadest, 350 g 7% Gelatine, 35 g Mehl und 15 ml 20% Chlorhexidin) ist hierfür ein 3-dimensional gedrucktes Modell mit einem Eintrittsring und 6 Zielringen aus Harz (Form 2, Material Clear resin, Formlabs, Somerville, Massachusetts, USA) eingebettet (► **Abb. 1, 2**). Nach vollendetem Punktionsvorgang wurde die Zielposition mit einem 5mm-Fragment eines Führungsdrahts (Transend Shapeable Tip, Guidewire with ICE Hydrophilic Coating, 190 cm, 0,014 inch, <0,37mm; Boston Scientific, Marlborough, Massachusetts, USA) markiert, das durch die Punktionsnadel (One-Piece Angiographic needle with snap-on wing, 18 Gauge, 70 mm, 0,038 inch; Cordis, Santa Clara, California, USA/Chiba Access and Biopsy Needle, 22 Gauge, 15cm; COOK MEDICAL, Bloomington, Indiana, USA) vorgeschoben wurde. Für die 6 Gruppen standen insgesamt 12 Punktionsphantome zur Verfügung. Nach Abschluss aller CT- und CACT-gesteuerten Punktionsen wurden die Positionen der Markierungsdrahtstücke im Phantom mit einer nativen CT (helikal, 271 Schichten, 1,25 mm Schichtdicke, 120 kV, 10mA; GE Lightspeed 16; General Electric, Boston, Massachusetts, USA) detektiert.



► **Abb. 3** Computertomografie des Phantoms. In dieser 3-dimensionalen Rekonstruktion der nativen CT sind die positionierten, röntgendichten Markierungen abzugrenzen, die mit CT- und C-Arm-CT-gesteuerten Punktionen abgelegt wurden. Zwei Büroklammern sind als weitere, röntgendichte Markierung als räumliche Orientierungshilfe in der Gelatinematrix eingebettet.

Der kürzeste Abstand vom distalen Ende des Markierungsdrahtstücks zur Mitte des Zielrings in der CT (Punktionsabweichung (mm)) wurde mit einer Linealfunktion (Visage 7, Visage Imaging GmbH, Berlin, Deutschland) gemessen. Zusätzlich wurde die Nadelplatzierungszeit (Punktionsdauer (min)) dokumentiert, die sich vom Beginn des ersten CT bzw. CACT bis zur erfolgreichen Ablage des Markierungsdrahtstücks erstreckte.

Nadelplatzierungsverfahren

Die Punktionen wurden CT-gesteuert (GE Lightspeed 16; General Electric Healthcare, Chicago, Illinois, Vereinigte Staaten von Amerika) und CACT-gesteuert (Siemens Pheno; Siemens Healthineers, Erlangen, Deutschland) durchgeführt. Die 1. Punktion erfolgte mit einem streng transaxialen Nadelpfad und die 2. Punktion mit einem einfach angulierten Nadelpfad bzw. zuerst in einem einfach angulierten und dann in einem doppelt angulierten Nadelpfad (► **Abb. 2**).

CT-gesteuerte Punktion

Zu Beginn wurde eine native CT (helikal, 271 Schichten, 1,25 mm Schichtdicke, 120 kV, 10mA) vom Punktionsphantom mit konventionellen, röntgendichten Markierungshilfen angefertigt. Daran wurden der optimale Eintrittspunkt und der Nadelpfad zum Ziel bestimmt. Die Markierungshilfe wurde entfernt, und nach dem Platzieren der Nadel am Eintrittspunkt wurden wiederholt native CT in transaxialer Richtung zur Kontrolle der Nadelspitzenposition aufgenommen (transaxial, 5 Schichten, 2,5 mm Schichtdicke, 120 kV, 60mA).

CACT-gesteuerte Punktion

Das CACT-gesteuerte Punktionsverfahren begann mit der Erstellung einer nativen CACT (5 s, 95 Projektionen/s, 397 Projektionen, 90 kV, 100mA) und der Rekonstruktion eines 3-dimensionalen Datensatzes. Darin wurden mithilfe der Navigationssoftware sowohl der Eintrittspunkt als auch der Zielpunkt vom Punkteur festgelegt. Daraus wurde automatisch der Nadelpfad berechnet. Im ersten Schritt wurde die zur Punktionsrichtung senkrechte Projektionsebene vom C-Arm automatisch angefahren („bullseye view“) (► **Abb. 2**). Die sich kreuzenden Ebenen des im Detektor der Angiografieanlage integrierten Laserfadenkreuzes markieren dabei den Eintrittspunkt auf dem Phantom und die Trajektorie. Um die Progression der Punktionsnadel in Echtzeit fluoroskopisch zu kontrollieren, wurde mit dem C-Arm automatisch eine zum geplanten Nadelpfad parallele Projektionsebene angefahren („progression view“) (► **Abb. 2**). Beide Ansichtseinstellungen konnten von jedem/r Assistenzarzt/-ärztin nach individuellem Bedarf gewechselt werden, bis die Nadel bzw. die Markierung im Ziel platziert wurde (► **Abb. 3**).

Evaluation der Phantomstudie

In einer nachträglichen Umfrage mithilfe von SurveyMonkey (www.surveymonkey.com, SurveyMonkey Inc., San Mateo, California, USA) wurden die 35 in der MHH anwesenden AiW eingeladen, die Phantomstudie zu evaluieren, wobei 10 AiW nicht aktiv punktiert haben. Folgende Fragen wurden unter Verwendung einer Likert-Skala von 1–5 (1: stimme überhaupt nicht zu, 2: stimme nicht zu, 3: stimme weder zu noch lehne ab, 4: stimme zu, 5: stimme voll und ganz zu) beantwortet:

1. Ist das verwendete Phantom grundsätzlich für das Training von CT/CACT-gesteuerten Punktionen geeignet?
2. Kann durch das Training am Phantom die Patientenversorgung verbessert werden?
3. Sollte das Training von CT/CACT-gesteuerten Punktionen an einem Phantom fest in der Weiterbildung verankert werden?
4. Ist das aktuelle Angebot (z. B. im Rahmen von Kongressen oder Workshops oder im eigenen Institut) für das Training von CT/CACT-gesteuerten Interventionen in Deutschland und Österreich (vor der Pandemie) ausreichend?

Statistische Analyse

Die Angaben der AiW aus den Fragebögen wurden in den oben beschriebenen Kategorien mit Mittelwert und Standardabweichung erfasst. Der Weiterbildungsstand der AiW, die mit CT-Bildsteuerung die Punktionen durchgeführt hatten, wurde mit den AiW verglichen, die mit CACT-Bildsteuerung punktiert haben. Die Punktionsabweichung und Punktionsdauer wurden zwischen den Verfahren sowie zwischen der 1. und 2. Punktion eines Verfahrens verglichen. Zuletzt wurden die Punktionsabweichung und Punktionsdauer mit der Selbsteinschätzung von manueller Geschicklichkeit und räumlichem Denkvermögen der AiW korreliert, um einen potenziellen Unterschied und gegebenenfalls Vorteil für das Erlernen bildgesteuerter Verfahren zu erkennen. Die Evaluationsergebnisse wurden mit der Anzahl der Antworten auf der Likert-Skala dokumentiert.

► **Tab. 1** Assistenzärzte in Weiterbildung in der Radiologie.

	CT (n = 11)	CACT (n = 14)	p-Wert
radiologische Berufserfahrung (Jahre)	3 ± 1	3 ± 1	1
Anzahl an konventionellen CT-gesteuerten Punktionen (Anzahl)	36 ± 47	35 ± 42	0,934
Anzahl an sonografisch gesteuerten Punktionen (Anzahl)	14 ± 25	14 ± 40	0,483
Anzahl an Angiografien (Anzahl)	11 ± 19	45 ± 89	0,415
Anzahl an CACT-gesteuerten Punktionen (Anzahl)	5 ± 15	11 ± 39	0,466

In dieser Tabelle ist die berufliche Erfahrung der Assistenzärzte in Weiterbildung (ÄiW) in der Radiologie übersichtlich dargestellt, die entweder Computertomografie (CT) – oder C-Arm-Computertomografie (CACT) -gesteuerte Punktionen durchgeführt haben. Es sind Mittelwerte und Standardabweichung sowie der p-Wert des Mann-Whitney-U-Tests angegeben. Abkürzungen: n = Anzahl an Assistenzärzten in Weiterbildung.

► **Tab. 2** Punktionsabweichung und -dauer am Phantom zwischen Computertomografie- und C-Arm-Computertomografie-gesteuertem Punktionsverfahren.

	CT (n = 21)	CACT (n = 28)	p-Wert
Punktionsabweichung (mm)	7,2 ± 3,3	7,9 ± 3,3	0,337
Punktionsdauer (min)	11 ± 11	6 ± 2	<0,001

In dieser Tabelle ist die Punktionsabweichung und -dauer am Phantom von den Assistenzärzten in Weiterbildung aufgeführt, die entweder Computertomografie (CT) – oder C-Arm-Computertomografie (CACT) -gesteuerte Punktionen durchgeführt haben. Es sind Mittelwerte und Standardabweichung sowie der p-Wert des Mann-Whitney-U-Tests angegeben. Abkürzungen: min = Minute(n); mm = Millimeter; n = Anzahl an Werten.

Die statistische Auswertung erfolgte mit R 3.6.2 statistical computation system (<https://www.r-project.org>). Bei nichtparametrischer Verteilung, welche mit dem Shapiro-Wilk-Test analysiert wurde, ist für den Vergleich zwischen CT- und CACT-Bildsteuerung der Mann-Whitney-U-Test für unabhängige Stichproben angewendet worden. Für den Vergleich zwischen der 1. und 2. Punktion innerhalb einer Gruppe ist der Wilcoxon-Test für abhängige Stichproben durchgeführt worden. Für einen abhängigen Vergleich zwischen der 1. und 2. Punktion innerhalb der Gruppe mit CT-Bildsteuerung wurde ein Teilnehmer ausgeschlossen, der nur die 1. Punktion in der zur Verfügung stehenden Zeit durchgeführt hat. Die Korrelation wurde mit dem Spearman-Rangkorrelationskoeffizienten (r) analysiert. Es wurde 2-seitig mit einem Signifikanzniveau von $p < 0,05$ getestet.

Ergebnisse

Studienteilnehmer und Kovariaten

Die mittlere radiologische Berufserfahrung pro AiW betrug jeweils 3 ± 1 Jahre. Die Anzahl an bereits durchgeführten Punktionen pro AiW betrug für Ultraschall-gesteuerte Punktionen 14 ± 34 Punktionen, für CT-gesteuerte Punktionen 36 ± 44 Punktionen, für Angiografien 30 ± 70 Punktionen und für CACT-gesteuerte Punktionen 8 ± 31 Punktionen. Die Selbsteinschätzung der manuellen

Geschicklichkeit und des räumlichen Denkvermögens wurde jeweils mit dem Wert 2 ± 1 angegeben. Erfahrung mit einem Musikinstrument hatten 18 AiW, mit Videospiele 20 AiW und mit Ballsport 17 AiW. Als Musikinstrumente wurden Akkordeon, Cello, E-Bass, Gitarre, Klarinette, Klavier, Orgel, Querflöte und Violine angegeben. An Ballsportarten waren vertreten Basketball, Fußball, Handball, Squash, Tennis, Tischtennis und Volleyball. Zwischen den AiW, die mit CT und CACT punktiert haben, war weder der Weiterbildungsstand noch die Erfahrung mit Punktionen statistisch unterschiedlich (► **Tab. 1**).

Punktionsabweichung im Phantom

Die Punktionsabweichung zwischen CT und CACT unterschied sich mit $7,2 \pm 3,3$ mm und $7,9 \pm 3,3$ mm nicht signifikant ($p = 0,337$). Auch zwischen der 1. und 2. Punktion gab es jeweils keinen statistischen Unterschied in der CT ($6,4 \pm 2,7$ mm und $8,5 \pm 3,5$ mm; $p = 0,130$) bzw. der CACT ($8,3 \pm 4,2$ mm und $7,6 \pm 2,2$ mm; $p = 0,391$). Die Resultate sind in den ► **Tab. 2, 3** detailliert aufgeführt.

Punktionsdauer am Phantom

Die Punktionsdauer der CACT-gesteuerten Punktionen war mit 6 ± 2 min signifikant kürzer als die der CT-gesteuerten Punktionen mit 11 ± 11 min ($p < 0,001$). Im CACT wurde die zweite, schwierigere Punktion mit 5 ± 2 min schneller durchgeführt als die erste

► **Tab. 3** Punktionsabweichung und -dauer am Phantom zwischen 1. und 2. Punktion des Computertomografie- oder C-Arm-Computertomografie-gesteuerten Punktionsverfahrens.

	1. Punktion	2. Punktion	p-Wert
CT	n = 10	n = 10	
Punktionsabweichung (mm)	6,4 ± 2,7	8,5 ± 3,5	0,130
Punktionsdauer (min)	13 ± 17	9 ± 3	0,719
CACT	n = 14	n = 14	
Punktionsabweichung (mm)	8,3 ± 4,2	7,6 ± 2,2	0,391
Punktionsdauer (min)	7 ± 2	5 ± 2	0,006

In dieser Tabelle ist die Punktionsabweichung und -dauer am Phantom von der 1. und 2. Punktion der Assistenzärzte in Weiterbildung gezeigt, die entweder Computertomografie (CT) – oder C-Arm-Computertomografie (CACT) – gesteuert durchgeführt wurden. Es sind Mittelwerte und Standardabweichung sowie der p-Wert vom Wilcoxon-Test angegeben. Abkürzungen: min = Minute(n); mm = Millimeter; n = Anzahl an Werten.

► **Tab. 4** Einfluss der Selbsteinschätzung auf die Punktionsabweichung und -dauer am Phantom.

Korrelation	r-Wert (n = 49)	p-Wert
Punktionsabweichung/räumliches Denkvermögen	+ 0,356	0,011
Punktionsabweichung/manuelle Geschicklichkeit	+ 0,271	0,059
Punktionsdauer/räumliches Denkvermögen	-0,089	0,541
Punktionsdauer/manuelle Geschicklichkeit	-0,204	0,158

Die Tabelle zeigt die Korrelation zwischen der Punktionsabweichung und -dauer mit der Selbsteinschätzung in räumlichem Denkvermögen und manueller Geschicklichkeit der Assistenzärzte in Weiterbildung. Es sind der Korrelationskoeffizient, r-Wert und p-Wert der Spearman-Rangkorrelationsanalyse gezeigt. Abkürzungen: n = Anzahl an Werten.

mit 7 ± 2 min ($p = 0,006$). Bei den CT-gesteuerten Punktionsverfahren war zwischen der 1. und 2. Punktion mit 13 ± 17 min gegenüber 9 ± 3 min statistisch kein Unterschied zu verzeichnen ($p = 0,719$). Die Ergebnisse sind in den ► **Tab. 2, 3** dargestellt.

Einfluss der Selbsteinschätzung

Die Selbsteinschätzung der manuellen Geschicklichkeit korrelierte nicht mit der Punktionsabweichung ($r: +0,271$; $p = 0,059$) und der Punktionsdauer ($r: -0,204$; $p = 0,158$). Eine signifikante Korrelation bestand zwischen der Selbsteinschätzung des räumlichen Denkvermögens und der Punktionsabweichung ($r: +0,356$; $p = 0,0118$), aber nicht zwischen räumlichem Denkvermögen und Punktionsdauer ($r: -0,089$; $p = 0,541$). Die Ergebnisse sind in ► **Tab. 4** dargestellt.

Evaluation der Phantomstudie

Bei der nachträglichen Umfrage zur Phantomstudie war die Teilnahmebereitschaft mit 33 von 35 AiW (94 %) hoch. Insgesamt stimmten 97 % der AiW zu, dass das verwendete Phantom grundsätzlich für das Training von CT/CACT-gesteuerten Punktionsverfahren geeignet ist (Anzahl der Antworten auf der Likert-Skala: 1 = 0, 2 = 0, 3 = 1, 4 = 14, 5 = 18) und dass durch das Training an dem

Phantom die Patientenversorgung verbessert werden kann (Antwortverteilung der Likert-Skala: 1 = 0, 2 = 0, 3 = 1, 4 = 10, 5 = 22). Das Training von CT/CACT-gesteuerten Punktionsverfahren an einem Phantom sollte auch fest in der Weiterbildung verankert werden, finden 91 % der AiW (Antwortverteilung der Likert-Skala: 1 = 0, 2 = 2, 3 = 1, 4 = 5, 5 = 25). Dahingegen waren 27 % der AiW neutral und 61 % der AiW dagegen, dass das aktuelle Angebot für das Training von CT/CACT-gesteuerten Interventionen in Deutschland und Österreich ausreichend ist (Antwortverteilung der Likert-Skala: 1 = 5, 2 = 15, 3 = 9, 4 = 2, 5 = 2).

Diskussion

In unserer Studie führten AiW aus universitären radiologischen Instituten in ganz Deutschland, die im Rahmen des strukturierten Programms „Forscher-für-die-Zukunft“ der DRG zusammengekommen sind, Punktionsverfahren durch. Im Durchschnitt befanden sich die von den jeweiligen Universitätskliniken ausgewählten AiW im dritten Jahr der Weiterbildung und erfüllten bereits die Richtzahl für nichtvaskuläre Interventionen, die in der Weiterbildungsordnung für die Erlangung des Facharztes gefordert wird [19]. Dabei ist anhand der klinische Praxis erwartungsgemäß die Erfahrung

mit CT-gesteuerten Punktionen größer als die mit CACT-gesteuerten Punktionen. Insgesamt zeigte sich in unserer Studie eine sowohl bei CT- als auch bei CACT-Bildsteuerung etwas höhere Punktionsabweichung vom Ziel mit ca. 7 mm im Vergleich zur Literatur, in der bei erfahrenen interventionellen Radiologen eine Abweichung von mm in der Phantomstudie von Busser et al. sowie zwischen 3 und 12 mm in der klinischen Praxis berichtet wird [10, 20, 21]. Da in unserer Phantomstudie jedoch AiW mit kurzer Einarbeitung in fremder Umgebung punktiert haben, ist die Punktionsabweichung nicht unerwartet und klinisch in vielen Fällen akzeptabel.

Betrachtet man die Punktionszeit, so war diese bei den CACT-gesteuerten Punktionen mit 6 ± 2 min deutlich kürzer als im CT mit 11 ± 11 min. Dies könnte zum einen durch die Arbeitsabläufe bedingt sein, denn bei der CACT-gesteuerten Punktion verblieben die AiW mit Röntgenschutzbekleidung im Angiografieraum, bei der CT-gesteuerten Punktion verließen die AiW den Untersuchungsraum. Zum anderen wird die Punktionsführung im CACT mit einem Navigationstool unterstützt, während im CT keine Softwareunterstützung zur Verfügung stand. Diese Navigationssoftware scheint auch für gering erfahrene Punkteure intuitiv zu bedienen zu sein, denn die 2. und deutlich schwierigere Punktion im CACT wurde schneller als die 1. Punktion durchgeführt, während dieser Lerneffekt im CT ohne Navigationstool geringer und statistisch nicht signifikant war. Der Lerneffekt hinsichtlich der Punktionsabweichung konnte in der Phantomstudie von Busser et al. auch für erfahrene interventionelle Radiologen gezeigt werden [10]. Damit kann aus unserer Studie abgeleitet werden, dass navigierte CACT-gesteuerte Punktionen auch bei nahezu unerfahrenen radiologischen AiW eine steile Lernkurve ermöglichen. Vermutlich würde auch die Punktion im CT von einer Softwareunterstützung profitieren, sofern diese ähnlich intuitiv eingesetzt werden kann. Dahingehend sollte die Durchführung von CT- und CACT-gesteuerten Verfahren mit der Nutzung moderner Navigationstools an Phantomen simuliert und erprobt werden sowie auch intensiver als Trainingseinheit in der Weiterbildung zur Vorbereitung der klinischen Anwendung für gering erfahrene AiW angeboten werden.

Zwischen der Selbsteinschätzung der manuellen Geschicklichkeit von den AiW und der Punktionsabweichung oder Punktionsdauer bestanden keine signifikanten Korrelationen. Bezüglich der Selbsteinschätzung des räumlichen Denkvermögens und der Punktionsdauer bestand auch keine Korrelation, aber zwischen dem räumlichen Denkvermögen und der Punktionsabweichung war eine moderate, positive Korrelation zu erkennen. Letzteres Ergebnis unterstreicht die Relevanz der räumlichen Vorstellungskraft für das Erlernen bildgesteuerter Verfahren. Diese ist zwar unterschiedlich ausgeprägt, kann aber auch durch Training verbessert werden [22]. Somit könnte das Training des räumlichen Denkvermögens, z. B. an einem Phantom bzw. Simulator, zu einer steileren Lernkurve von bildgesteuerten Verfahren beitragen. Dieses konnte aus anderen Studien für endovaskuläre Interventionen bereits gezeigt werden, sodass beispielsweise durch das Simula-

tortraining der Stent-Implantation in die A. carotis interna oder von diagnostischen Koronarangiografien die Fluoroskopiezeit und die Interventionsdauer der darauffolgend ausgeübten Eingriffe im klinischen Alltag tatsächlich deutlich reduziert werden konnten [17, 18]. Um die Selbsteinschätzung zu objektivieren, wurde auch die Erfahrung mit einem Musikinstrument, mit Videospiele und mit Ballsport abgefragt. Da bei der großen Mehrheit der AiW zwei oder mehr Hobbies vorhanden waren, die manuelle Geschicklichkeit erfordern, war eine weitere statistische Auswertung aufgrund der nicht verfügbaren Gruppe von AiW ohne Hobbies nicht möglich.

Die Umfrage zur Phantomstudie ergab mit einer hohen Rücklaufquote von 94 % und einem einheitlichen Antwortmuster ein eindeutiges Ergebnis. Das verwendete Phantom wurde grundsätzlich als geeignet für das Training von CT/CACT-gesteuerten Punktionen empfunden, und das Training an dem Phantom könnte auch zu einer Verbesserung der Patientenversorgung beitragen. Bisher ist das Training an einem Phantom nicht in der Weiterbildung verankert, wofür sich die AiW aber ausgesprochen haben und was in anderen Berufsgruppen, wie z. B. in der Aus- und Weiterbildung von Piloten, etabliert ist. Aktuell wird das Angebot an Trainingsmöglichkeiten für nichtvaskuläre Interventionen an einem Phantom in Deutschland und Österreich als nicht ausreichend eingeschätzt.

Es gibt Limitationen unserer Phantomstudie. Die Einschätzung von manueller Geschicklichkeit und räumlichem Denkvermögen war subjektiv und nicht durch Tests objektiviert. Aufgrund der Nutzung der „Quick-and-Check“-Technik im CT und der Navigationssoftware im CACT ist der Methodenvergleich eingeschränkt, gleichwohl entspricht dies dem klinischen Vorgehen, da in vielen Institutionen für Biopsien und Drainagen im CT keine Hilfsmittel eingesetzt werden. Umgekehrt ist das CACT-gesteuerte Verfahren ohne Navigation wenig praktikabel, zudem ist die Strahlenexposition bei CACT-gesteuerten Punktionsverfahren mit Overlay im Vergleich zu konventionellen CT-gesteuerten Punktionen 40 % geringer [9]. Die letzte und wichtigste Limitation ist die geringe Zahl der Experimente und Teilnehmer. Die AiW hatten zwar im Mittel eine dem Ausbildungsstand entsprechende Punktionserfahrung, waren aber als Gruppe sehr heterogen, was die hohe Streuung der Werte und entsprechende Limitationen einer statistischen Auswertung erklärt. Leider war die Zeit im Rahmen des Programms „Forscher-für-die-Zukunft“ limitiert, sodass die Anzahl der Punktionen nicht erhöht werden konnte und die AiW auch nicht abwechselnd nacheinander beide Punktionsverfahren durchführen konnten. Es bietet sich an, auf unseren Ergebnissen und der Umfrage aufbauend weitere Studien mit entsprechender Fallzahl und entsprechendem Studiendesign zu planen, um Simulatoren zu verbessern und gleichzeitig Vor- und Nachteile von Punktionsverfahren, insbesondere für weniger erfahrene Punkteure, weiter zu evaluieren.

Funding

Deutsche Röntgengesellschaft e. V. (Forscher-für-die-Zukunft)

KLINISCHE RELEVANZ DER STUDIE

- In der Gruppe der im Rahmen des Programms „Forscher-für-die-Zukunft“ aus universitären radiologischen Instituten selektierten AiW entspricht die Erfahrung mit CT-gesteuerten Punktionen dem Standard, welcher in der Weiterbildungsordnung vorgegeben ist.
- Die Erfahrung mit CACT-Bildführung ist deutlich geringer ausgeprägt, wobei die CACT mit Softwareunterstützung eine steilere Lernkurve als die konventionelle CT zu haben scheint.
- Die AiW schätzen ihre Fähigkeiten hoch ein und erreichten im Rahmen der Studie eine dem Stand der Weiterbildung entsprechende Treffgenauigkeit.

Interessenkonflikt

Lorenz Biggemann: L. B. declares travel grant from Siemens Healthineers and speakers honorarium from Bristol Myer-Squibb unrelated to this project.

Jan –Peter Grunz: J.-P. G. declares employment as “Research Consultant” at Siemens Healthineers unrelated to this project.

Markus Kopp: M. B. declares participation at the Siemens Healthineers speakers’ bureau unrelated to this project.

Simon Lennartz: S. L. declares institutional research support from Philips unrelated to this project.

Timo C. Meine: T.C.M. declares passive participation at the BTG TheraSphere™ DACH Summit 2018 unrelated to this project.

Bernhard C. Meyer: B.C.M. declares relationships with Siemens Healthcare and ProMedicus (outside the submitted work).

Frank K. Wacker: F. K. W. declares relationships with Siemens Healthcare and ProMedicus (outside the submitted work).

David Zopf: D. Z. declares institutional research support from Philips Healthcare unrelated to this project.

Literatur

- [1] Helmberger T, Marti-Bonmati L, Pereira P et al. Radiologists’ leading position in image-guided therapy. *Insights Imaging* 2013; 4: 1–7. doi:10.1007/s13244-012-0213-9
- [2] Ahmed M, Brace CL, Lee FT et al. Principles of and Advances in Percutaneous Ablation. *Radiology* 2011; 258: 351–369. doi:10.1148/radiol.10081634
- [3] Goldberg SN, Gazelle GS, Mueller PR. Thermal Ablation Therapy for Focal Malignancy: A Unified Approach to Underlying Principles, Techniques, and Diagnostic Imaging Guidance. *American Journal of Roentgenology* 2000; 174: 323–331. doi:10.2214/ajr.174.2.1740323
- [4] Zhao G, Shi X, Sun W et al. Factors affecting the accuracy and safety of computed tomography-guided biopsy of intrapulmonary solitary nodules ≤30 mm in a retrospective study of 155 patients. *Experimental and Therapeutic Medicine* 2017; 13: 1986–1992. doi:10.3892/etm.2017.4179
- [5] Charboneau JW, Reading CC, Welch TJ. CT and sonographically guided needle biopsy: current techniques and new innovations. *American Journal of Roentgenology* 1990; 154: 1–10. doi:10.2214/ajr.154.1.2104689
- [6] Silverman SG, Tuncali K, Adams DF et al. CT Fluoroscopy-guided Abdominal Interventions: Techniques, Results, and Radiation Exposure. *Radiology* 1999; 212: 673–681. doi:10.1148/radiology.212.3.r99se36673
- [7] Sarti M, Brehmer WP, Gay SB. Low-Dose Techniques in CT-guided Interventions. *RadioGraphics* 2012; 32: 1109–1119. doi:10.1148/rg.324115072
- [8] Racadio JM, Babic D, Homan R et al. Live 3D Guidance in the Interventional Radiology Suite. *American Journal of Roentgenology* 2007; 189: W357–W364. doi:10.2214/AmJ Roentgenol.07.2469
- [9] Braak SJ, van Strijen MJL, van Es HW et al. Effective Dose during Needle Interventions: Cone-beam CT Guidance Compared with Conventional CT Guidance. *Journal of Vascular and Interventional Radiology* 2011; 22: 455–461. doi:10.1016/j.jvir.2011.02.011
- [10] Busser WMH, Braak SJ, Fütterer JJ et al. Cone beam CT guidance provides superior accuracy for complex needle paths compared with CT guidance. *BJR* 2013; 86: 20130310 doi:10.1259/bjr.20130310
- [11] Jin KN, Park CM, Goo JM et al. Initial experience of percutaneous transthoracic needle biopsy of lung nodules using C-arm cone-beam CT systems. *Eur Radiol* 2010; 20: 2108–2115. doi:10.1007/s00330-010-1783-x
- [12] Choo JY, Park CM, Lee NK et al. Percutaneous transthoracic needle biopsy of small (≤1 cm) lung nodules under C-arm cone-beam CT virtual navigation guidance. *Eur Radiol* 2013; 23: 712–719. doi:10.1007/s00330-012-2644-6
- [13] Higashihara H, Osuga K, Onishi H et al. Diagnostic accuracy of C-arm CT during selective transcatheter angiography for hepatocellular carcinoma: comparison with intravenous contrast-enhanced, biphasic, dynamic MDCT. *Eur Radiol* 2012; 22: 872–879. doi:10.1007/s00330-011-2324-y
- [14] Braak SJ, van Melick HHE, Onaca MG et al. 3D cone-beam CT guidance, a novel technique in renal biopsy—results in 41 patients with suspected renal masses. *Eur Radiol* 2012; 22: 2547–2552. doi:10.1007/s00330-012-2498-y
- [15] Lee WJ, Chong S, Seo JS et al. Transthoracic fine-needle aspiration biopsy of the lungs using a C-arm cone-beam CT system: diagnostic accuracy and post-procedural complications. *BJR* 2012; 85: e217–e222. doi:10.1259/bjr/64727750
- [16] Hwang HS, Chung MJ, Lee JW et al. C-Arm Cone-Beam CT-Guided Percutaneous Transthoracic Lung Biopsy: Usefulness in Evaluation of Small Pulmonary Nodules. *American Journal of Roentgenology* 2010; 195: W400–W407. doi:10.2214/AmJ Roentgenol.09.3963
- [17] Gosling AF, Kendrick DE, Kim AH et al. Simulation of carotid artery stenting reduces training procedure and fluoroscopy times. *Journal of Vascular Surgery* 2017; 66: 298–306. doi:10.1016/j.jvs.2016.11.066
- [18] Prenner SB, Wayne DB, Sweis RN et al. Simulation-based education leads to decreased use of fluoroscopy in diagnostic coronary angiography. *Catheter Cardiovasc Interv* 2018; 91: 1054–1059. doi:10.1002/ccd.27203
- [19] Bundesärztekammer A der deutschen Ä. (Muster-)Weiterbildungsordnung 2018. Im Internet (Stand: 01.08.2020): 2020 https://www.bundesärztekammer.de/fileadmin/user_upload/downloads/pdf-Ordner/Weiterbildung/20200428_MWBO_2018.pdf
- [20] Abi-Jaoudeh N, Kruecker J, Kadoury S et al. Multimodality image fusion-guided procedures: technique, accuracy, and applications. *Cardiovasc Intervent Radiol* 2012; 35: 986–998. doi:10.1007/s00270-012-0446-5
- [21] Abi-Jaoudeh N, Fisher T, Jacobus J et al. Prospective Randomized Trial for Image-Guided Biopsy Using Cone-Beam CT Navigation Compared with Conventional CT. *J Vasc Interv Radiol* 2016; 27: 1342–1349. doi:10.1016/j.jvir.2016.05.034
- [22] Wiedenbauer G, Jansen-Osmann P. Manual training of mental rotation in children. *Learning and Instruction* 2008; 18: 30–41. doi:10.1016/j.learninstruc.2006.09.009